



Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Geología y Geotecnia

Tema: FILTRACIONES

Adscripto: Nicolás Alejandro Torres

Dirección de la adscripción: Mter. Ing. Silvia Angelone

Co-dirección de la adscripción: Ing. María Teresa Garibay

OCTUBRE 2010

ÍNDICE:

1) INTRODUCCIÓN

- 1-1) Características de la masa de suelo**
- 1-2) Aspectos geotécnicos del movimiento del agua en el suelo**

2) REDES DE FILTRACIÓN

- 2-1) Conceptos generales**
- 2-2) Ecuaciones hidrodinámicas que rigen el flujo de agua a través de los suelos**
 - 2-2-1) Solución de la ecuación de Laplace**
 - 2-2-2) Propiedades de las líneas de corriente y equipotenciales**
- 2-3) Trazado de la red de flujo**
 - 2-3-1) Condiciones hidráulicas de borde**
 - 2-3-2) Recomendaciones para el trazado de la red de flujo**
- 2-4) Cálculo del gasto o caudal en suelos isótropos**
 - 2-4-1) Cuadrados singulares**
- 2-5) Cálculo de presiones en el agua dentro de la masa de suelo**
- 2-6) Estabilidad del suelo**
 - 2-6-1) Gradiente hidráulico crítico**
 - 2-6-2) Defensas contra la erosión**
 - 2-6-2-1) Filtros naturales**
 - 2-6-2-2) Filtros con geosintéticos**
- 2-7) Cálculo del gasto o caudal en suelos anisótropos**

3) ANALISIS DE FILTRACIONES UTILIZANDO SEEP/W – GeoStudio 2007

4) EJEMPLOS DE APLICACIÓN

- 4-1) Resolución Manual**
- 4-2) Resolución Automática: Programa GeoStudio 2007**

5) BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

FILTRACIONES

1) INTRODUCCIÓN:

1-1) Características de la masa de suelo:

El suelo es un sistema disperso, heterogéneo, trifásico y poroso. La naturaleza dispersa del suelo y su consecuente actividad interfacial, da origen a fenómenos tales como la adsorción del agua, el intercambio iónico, la adhesión, la contracción-dilatación, la dispersión y floculación y la capilaridad.

Las tres fases que representan al suelo se muestran en la Fig.1.1 y se pueden clasificar en:

- Los constituyentes de la fase sólida o matriz.
- La fase líquida o agua, en la cual están disueltas sustancias y que se denomina comúnmente solución del suelo.
- La fase gaseosa o atmósfera.

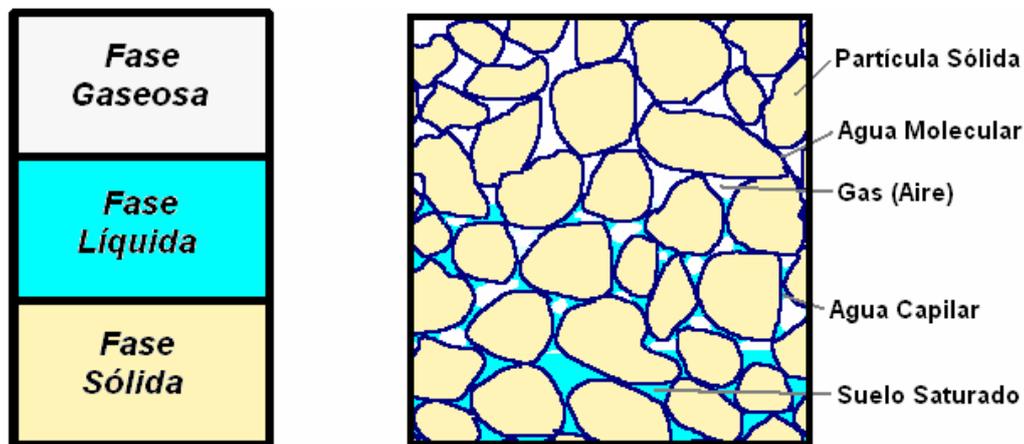


Fig.1.1

La matriz incluye partículas, las cuales varían en su composición química y mineralógica, así como, en tamaño, forma y comportamiento. Ésta también contiene sustancias amorfas, particularmente materia orgánica, la cual está asociada a partículas minerales y que frecuentemente se unen entre sí para formar agregados.

La organización de los componentes sólidos determinan las características geométricas de los espacios porosos en los cuales el agua y el aire son transmitidos y retenidos. El agua y el aire varían ambos en composición en el tiempo y en el espacio y las proporciones relativas de las tres fases varían continuamente, y dependen sobre todo, de variables tales como el clima, la vegetación y el manejo de dicho suelo.

1-2) Aspectos geotécnicos del movimiento del agua en el suelo:

El agua presente en un estrato puede clasificarse en tres categorías, dependiendo de su movilidad dentro del suelo. En primer lugar esta la llamada agua adsorbida, ligada a las partículas del suelo por fuerzas de origen eléctrico, que no se mueve en el interior de la masa porosa y por lo tanto no participa en el flujo.

En segundo lugar se encuentra el agua capilar, cuyo flujo representa gran importancia en algunos casos, tales como el humedecimiento de un pavimento por flujo ascendente y otras analogías pertinentes. Sin embargo, en la mayoría de los problemas de filtración de agua, el efecto del flujo en la zona capilar es pequeño y suele despreciarse en atención a las complicaciones que plantearía al ser tomada en

cuenta teóricamente su influencia. En tercer y último lugar, existe en el suelo la llamada agua libre o gravitacional que, bajo el efecto de la gravedad terrestre, puede moverse en el interior de la masa sin otro obstáculo que el que le impone su viscosidad y la trama estructural del suelo. En la teoría del flujo se trata exclusivamente del agua libre o gravitacional.

En la masa de suelo, esta última está separada del agua capilar por una superficie a la que se denomina **Nivel Freático**. En condiciones estáticas del agua de un cierto suelo, el nivel freático sería una superficie horizontal; sin embargo, si se admite la posibilidad de que el agua fluya dentro del suelo, ya no hay razón para que el nivel freático siga siendo horizontal y de hecho, naturalmente, no lo es.

En muchos problemas geotécnicos, el movimiento del agua que llena los poros y diaclasas del terreno, tiene una influencia esencial. Pero, esta influencia tiene tres aspectos distintos.

El primero se refiere al caudal de agua que circula, por ejemplo si se trata de un embalse, importa saber la cantidad de agua que se perderá a través de la presa y del terreno. Si se trata de obtener un recinto seco en un cauce de agua (por ejemplo un río), tendremos que prever la potencia de las bombas necesarias para el agotamiento como se muestra en la *Fig. 1.2*.

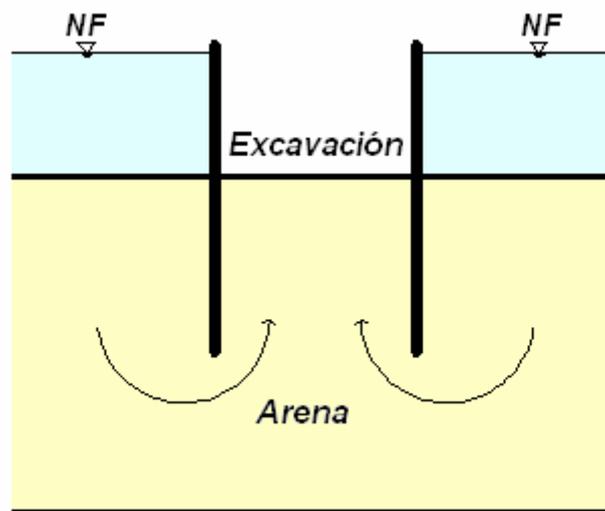


Fig. 1.2

El segundo aspecto es menos evidente, pero de igual importancia y se refiere a la variación del estado tensional del suelo. El agua, al circular, toma un cierto estado de presiones intersticiales que determinan a su vez el estado de tensiones del terreno y, por lo tanto, afectan a sus deformaciones y a su estabilidad. El rebajamiento del nivel de la capa freática, bien sea por una extracción excesiva de agua por medio de pozos, para su aprovechamiento, o bien como artificio constructivo (*Fig. 1.3*) produce asentamientos que pueden llegar a ser desde varios centímetros a algunos metros. Por otra parte en lo que se refiere a la estabilidad, la influencia de la filtración sobre los taludes se manifiesta bien claramente después de cualquier temporal de lluvia, cuando aparecen corrimientos, muchas veces causantes de cortes en las carreteras y ferrocarriles.

Por último, el tercer aspecto es el de las alteraciones que el paso del agua puede producir en el terreno. Estas pueden dividirse en físicas, químicas y biológicas. Como fenómenos típicos, podemos citar la erosión interna (arrastre de partículas del suelo), muchos casos de cementación por precipitación de geles, y también el de aparición de susceptibilidad tixotrópica, al cambiar el agua salina de los poros por agua dulce. Como alteraciones debidas, al menos en parte, a actividades biológicas, se puede citar que el desarrollo de algas microscópicas es capaz de impermeabilizar

en poco tiempo capas que se deseaba fueran filtrantes. En otros casos, el rebajamiento de la capa freática reactiva bacterias aeróbicas que permanecían en vida latente o muy amortiguada, y desencadena procesos de hinchamiento.

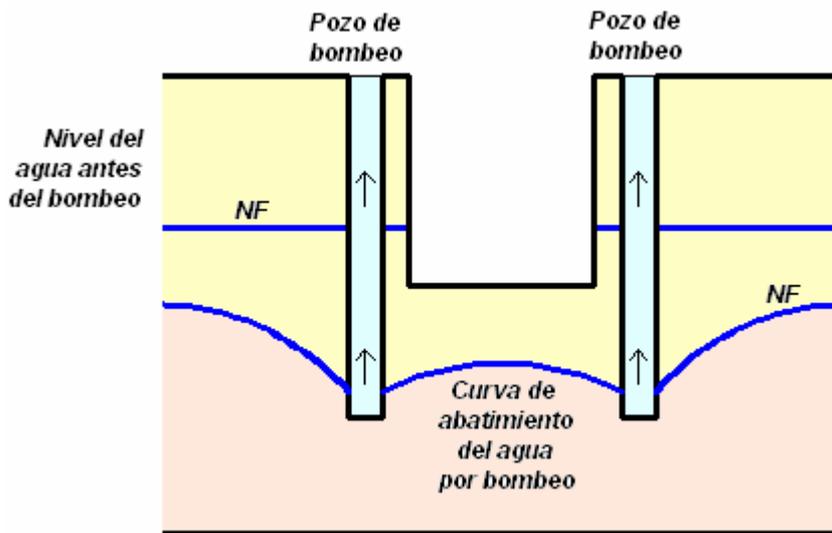


Fig. 1.3

El control del movimiento del agua en los suelos, y la protección contra los daños que causa, son aspectos de vital importancia en la Ingeniería Civil. Estos problemas se presentan siempre y cuando trabajemos en suelos saturados con presencia de agua, al hacer excavaciones, construir caminos y autopistas, proyectar presas de tierra u hormigón, diques y al construir cimentaciones; por lo que al resolver un problema práctico de flujo del agua, el ingeniero obtiene información fundamental respecto a una serie de cuestiones:

- El **gasto o caudal de filtración** a través de la zona en estudio (la cantidad o volumen de agua que filtra por unidad de tiempo hacia una excavación abierta para la construcción de una obra, como así también la cantidad de agua embalsada que se perderá por filtración a través de un dique).
- Las **presiones** dentro de la masa de suelo y sobre las estructuras.
- Las **sobrepresiones de filtración**.
- La influencia del flujo de agua sobre la **estabilidad general** de la masa de suelo a través de la cual filtra.
- Las posibilidades del agua de infiltración de producir arrastres de material sólido, erosiones, tubificación, etc.

La presión intersticial que existe en un punto del suelo con la presencia de agua, con frecuencia no es la que corresponde a las condiciones hidrostáticas, sino aquella creada por el flujo de la misma a través de los poros del suelo. Por ejemplo, considérese el caso de una presa de hormigón cimentada en un depósito de suelo como la que se muestra en la Fig.1.4:

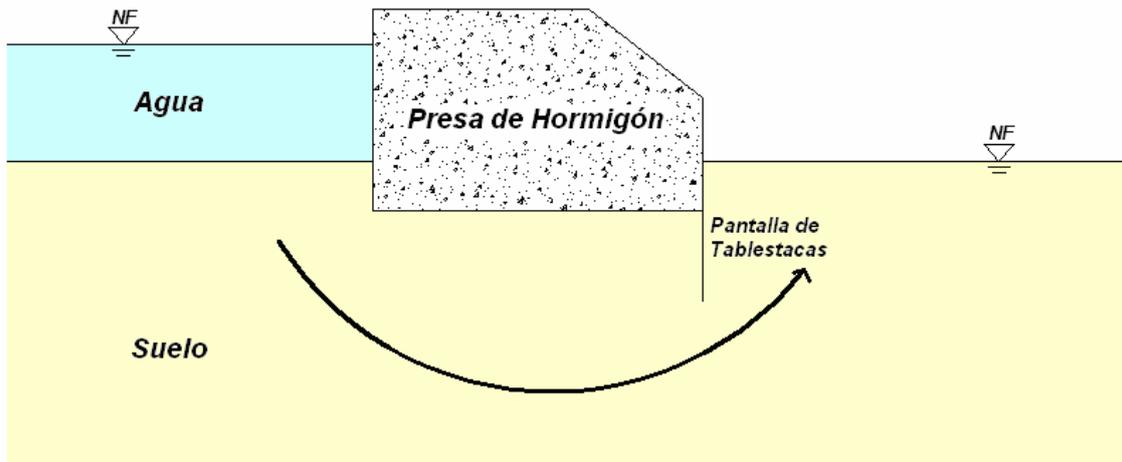


Fig.1.4

El agua se almacena a una altura determinada aguas arriba, la diferencia de nivel del agua entre los lados de la presa crea una filtración a través de la cimentación desde el lado aguas arriba hasta el lado aguas abajo.

Cuando el flujo comienza, la presión intersticial en el suelo pasa de valores iniciales a valores finales que deben ser compatibles con las nuevas condiciones hidráulicas de borde y, además, con los cambios de volumen que se producen en la masa de suelo. Durante este período el flujo varía en función del tiempo y deja de ser permanente, lo cual hace muy difícil su estudio. Cuando la presión intersticial en toda la masa de suelo se equilibra con las nuevas condiciones de borde, el flujo se vuelve independiente del tiempo y en ese caso se tiene un flujo permanente o estacionario.

La velocidad a la cual la presión intersticial se ajusta a los nuevos valores de equilibrio, durante el flujo transitorio, depende del tipo de suelo. Las arenas y las gravas permiten un flujo rápido de agua y la presión intersticial es capaz de equilibrarse rápidamente. Puede suponerse, por lo tanto, que luego de cualquier cambio en las condiciones hidráulicas de borde, el flujo estacionario para estos suelos se establece de manera instantánea. Por el contrario, el flujo estacionario en las arcillas es lento, puede demorar varios años en establecerse y el período de flujo transitorio tiene una particular importancia, principalmente, en el estudio de la consolidación y expansión en estos suelos.

2) REDES DE FILTRACION:

2-3) Conceptos Generales:

El empleo de la representación gráfica para el flujo que traspasa el suelo se lleva a cabo a través de lo que se denomina como **red de flujo o red de corriente**. De la red de flujo se puede obtener información relativa a los problemas planteados.

El camino seguido por una partícula de agua en su recorrido de escurrimiento o filtración a lo largo de una masa de suelo saturado es llamado **línea de flujo o de corriente**. Un ejemplo de las líneas de flujo son las líneas curvas, suaves y sólidas, que pasan por debajo del muro de contención construido con una pantalla de tablestacas como el que se muestra en la Fig.2.1.

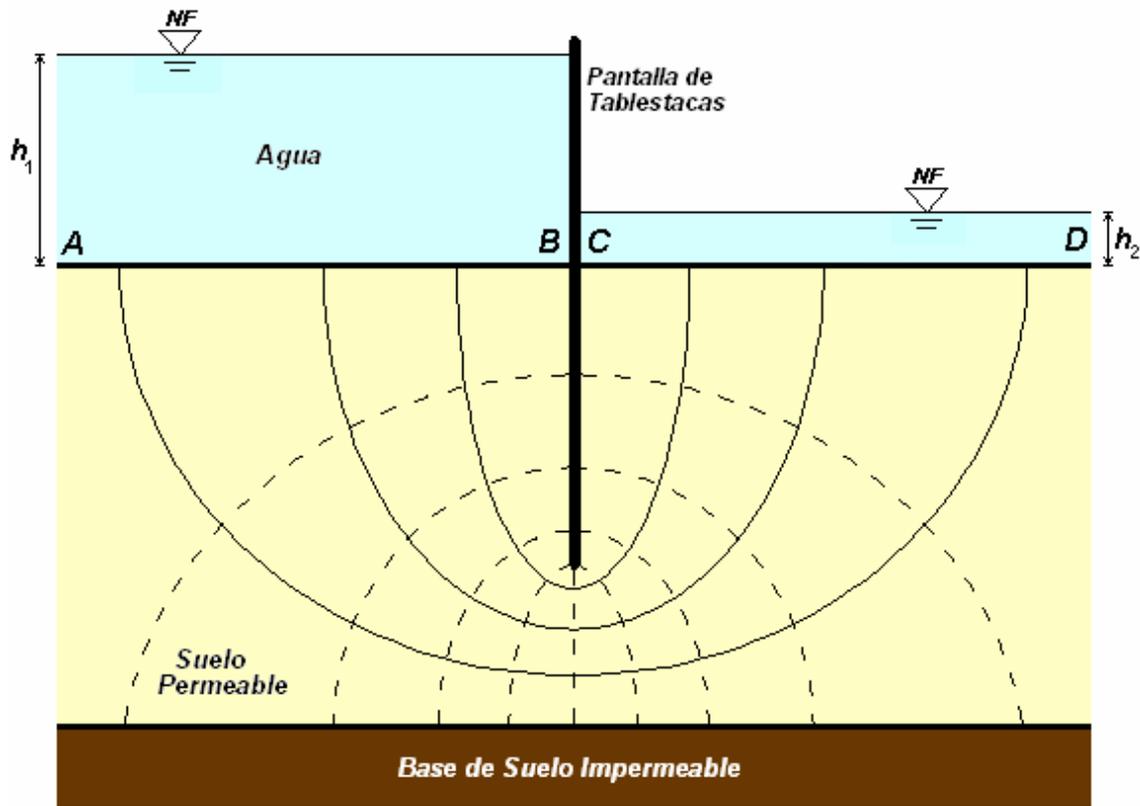


Fig.2.1

Cada línea de flujo comienza en un punto localizado sobre la línea AB , con una carga de presión ($h = h_1 - h_2$) que se disipa por la fricción viscosa, y termina en la línea CD , donde la carga de presión es igual a h_2 . A todo lo largo de la línea existe un punto donde el agua ha disipado una porción específica conocida como su potencial. Una línea que conecte todos esos puntos de igual carga es llamada **línea equipotencial** (líneas punteadas de la Fig. 2.1), o dicho de otra manera: en todos los puntos de una misma línea equipotencial, el agua asciende en un piezómetro hasta un mismo nivel piezométrico. Dichas líneas se asemejan a curvas de nivel de igual energía y las líneas de flujo las cortan en ángulo recto, ya que el agua se mueve desde los niveles de mayor a los de menor energía, siguiendo los caminos de gradiente de máxima energía; de la misma manera que el agua corre hacia abajo en la ladera de una colina, de los niveles superiores a los inferiores siguiendo la misma línea de pendiente máxima.

El esquema de las líneas de flujo y equipotenciales se denomina red de flujo y es un instrumento poderoso para la solución de los problemas de filtración de agua donde es evidente que existe un número ilimitado de líneas de flujo y de equipotenciales, pero se toman sólo aquellas que ofrecen una representación más general y una forma más conveniente de explicar el fenómeno.

2-3) Ecuaciones hidrodinámicas que rigen el flujo de agua a través de los suelos:

La deducción de la expresión matemática de la red de flujo esta basada en una serie de **hipótesis** que implican la aceptación de la ecuación de continuidad:

- Suelo y agua son incompresibles en sí mismos (significa que el volumen de vacíos es constante).
- El flujo no modifica la estructura del suelo de ninguna forma.

- Régimen permanente y flujo estacionario.
- El suelo esta saturado.
- Flujo laminar, con bajas velocidad de filtración.
- Es válida la ley de Darcy.
- El coeficiente de permeabilidad es constante en todos los puntos (k_v es igual a k_h , lo cual supone que no hay anisotropía).

Se considera una región de flujo (un elemento de suelo a través del que fluye agua), de la que forma parte un elemento paralelepípedo de dimensiones diferenciales (dx , dy y dz), tal como se muestra en la Fig.2.2:

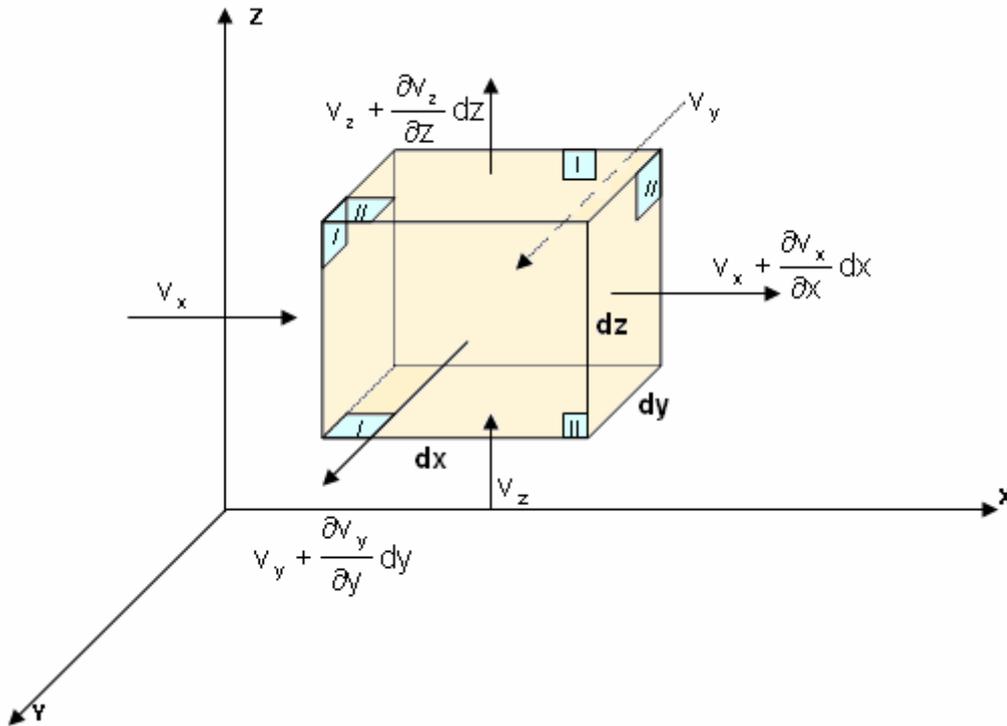


Fig.2.2

Se supone que la velocidad v con que el agua pasa por el elemento posee tres componentes v_x , v_y , v_z , y que éstas son sólo función de x , y , z , pero no del tiempo (puesto que por hipótesis se trata de un régimen estacionario) y dichas componentes son funciones continuas que admiten cualquier orden de derivación necesario al razonamiento expuesto. En estas condiciones, si en las caras I de la Fig. 2.2, las componentes de velocidad del agua son v_x , v_y , v_z ; en las caras II estas mismas componentes son:

$$v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \quad (\text{Ec. 2.2.1})$$

$$v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \quad (\text{Ec. 2.2.2})$$

$$v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \quad (\text{Ec. 2.2.3})$$

Durante el flujo, la cantidad de agua que entra al elemento, en un régimen establecido, tiene que ser igual a la que sale. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el caudal que pasa por una sección puede expresarse como el producto del área de la sección por la velocidad del flujo puede escribirse:

$$\begin{aligned} &v_x \cdot dy \cdot dz + v_y \cdot dx \cdot dz + v_z \cdot dx \cdot dy = \\ &= \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx\right) \cdot dy \cdot dz + \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy\right) \cdot dz \cdot dx + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz\right) \cdot dy \cdot dx \quad (\text{Ec. 2.2.4}) \end{aligned}$$

En la expresión anterior, el primer miembro representa el caudal que entra al elemento y el segundo el que sale. Reduciendo términos semejantes y reordenando:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \cdot dz \cdot dx + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \cdot dy \cdot dx = 0 \quad (\text{Ec. 2.2.5})$$

De donde:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{Ec. 2.2.6})$$

La Ec. 2.2.6 juega un papel importante en la teoría de flujo de agua y se conoce con el nombre de **ECUACIÓN DE CONTINUIDAD**.

Si también se supone válida la Ley de Darcy, la velocidad de descarga a través del elemento es:

$$v = k \times \vec{i} = -k \frac{\partial h}{\partial s} \quad (\text{Ec. 2.2.7})$$

Lo cual, expresando al gradiente hidráulico a través de sus tres componentes, da lugar a:

$$v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{Ec. 2.2.8})$$

$$v_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{Ec. 2.2.9})$$

$$v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (\text{Ec. 2.2.10})$$

En este caso, el suelo se considera anisótropo en lo referente a su permeabilidad, en las direcciones x , y , z . Introduciendo estas ecuaciones en la Ec.2.2.6 se tiene:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{Ec. 2.2.11})$$

Esta ecuación describe matemáticamente al flujo en la región considerada.

Una característica especial de los problemas en suelos donde se encuentra involucrada el agua es la importancia que cobra los más pequeños detalles de la

estructura geológica. Así es como muchas veces se dan como impermeables macizos rocosos o arcillosos que, sin embargo, luego dejan pasar caudales considerables, por fisuras, grietas, canalículos o capas limosas difícilmente discernibles para un observador descuidado. La trascendencia de estas heterogeneidades se denota por la gran variedad de coeficientes k (parámetro que tiene mayor importancia entre todos los que se manejan).

Si además, la masa de suelo en estudio, a través de la cual filtra el agua, es isótropa en lo referente a permeabilidad, entonces:

$$k_x = k_y = k_z = k \quad (\text{Ec. 2.2.12})$$

Considerando esas hipótesis, la *Ec. 2.2.11* puede simplificarse:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \nabla^2 h = 0 \quad (\text{Ec. 2.2.13})$$

La *Ec. 2.2.13* se la conoce como la **ECUACIÓN DE LAPLACE**.

En los problemas prácticos de la Mecánica de Suelos, es muy frecuente que el flujo en una sección de la región considerada, transversal a su eje longitudinal, sea idéntico al que se tiene en cualquier otra sección. Éste es el caso, por ejemplo, en presas de tierra de eje largo, en comparación con la altura. Así, los efectos en los bordes de la región de flujo pueden ignorarse y, de esa manera, el problema de flujo puede estudiarse bidimensionalmente como contenido todo él en el plano XY . En estas condiciones la *Ec. 2.2.11* puede escribirse en forma más simplificada como:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{Ec. 2.2.14})$$

Que es la ecuación fundamental para el análisis de flujo bidimensional en una región dada. La *Ec. 2.2.14* puede simplificarse obteniéndose la *Ec. 2.2.15* para representar matemáticamente el problema suponiendo el suelo isótropo.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \nabla^2 h = 0 \quad (\text{Ec. 2.2.15})$$

2-2-1) Solución de la Ecuación de Laplace:

Atendiéndose al caso del flujo bidimensional, se plantean dos grupos de funciones que son solución de dicha ecuación y que tienen una interpretación geométrica muy útil:

- Función Potencial Φ
- Función de flujo ψ

En primer caso se define una función Φ :

$$\Phi = -k * h + c \quad (\text{Ec. 2.2.16})$$

La *Ec. 2.2.16* satisface la ecuación de Laplace, por lo tanto se cumple:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{Ec. 2.2.17})$$

Así, la función $\Phi(x, y) = cte$, es solución de la ecuación de Laplace. Esta solución representa una infinidad de funciones según sea el valor de la constante c que intervenga. De inmediato, puede darse una interpretación geométrica a esta solución, pues la expresión $\Phi(x, y) = cte$ puede representar a una familia de curvas que se desarrollan en la región plana en la que ocurre el flujo, obteniéndose una curva específica de la familia para cada valor de la constante que se tome.

En cuanto a la interpretación física, se sigue que si una curva une puntos en que Φ es constante, en esos puntos h también es constante. Es decir, en la curva Φ igual a una constante, todos los puntos tienen la misma carga hidráulica h . Por esta razón, estas curvas que unen puntos de igual carga hidráulica reciben el nombre de **líneas equipotenciales**.

Considérese ahora una función $\Psi(x, y) = cte$, llamada función de flujo y definida de modo que:

$$v_x = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad (\text{Ec. 2.2.18})$$

$$v_y = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (\text{Ec. 2.2.19})$$

Puede demostrarse que una función ψ también cumple con la ecuación de Laplace y por lo tanto es solución de la misma. Analizando el sentido físico de las curvas $\psi = cte$ según la Fig.2.3:

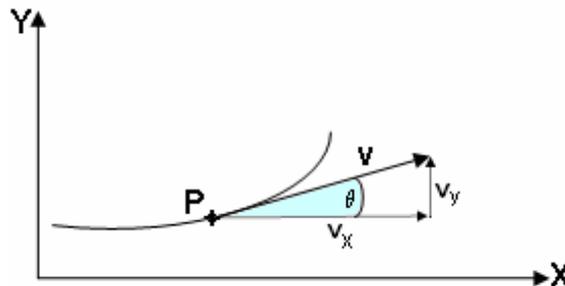


Fig.2.3

Si se tiene en cuenta la trayectoria del agua que pasa por el punto $P(x; y)$; el agua posee una velocidad v , que es, naturalmente, tangente a su trayectoria. Si se trata ahora de encontrar la ecuación de esa trayectoria a lo largo de la curva se tiene:

$$\text{tg}\theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{dy}{dx} \quad (\text{Ec. 2.2.20})$$

De aquí:

$$v_y dx - v_x dy = 0 \quad (\text{Ec. 2.2.21})$$

De la expresión anterior y de las Ec. 2.2.18 y Ec. 2.2.19 se obtiene:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy = 0 \quad (\text{Ec. 2.2.22})$$

Que es precisamente el diferencial total de la función ψ , de manera que se cumple a lo largo de la trayectoria del agua que $d\psi = 0$ y por lo tanto $\psi(x, y) = cte$. Así, la trayectoria del agua tiene como ecuación precisamente $\psi = cte$, o lo que es lo mismo, la familia de curvas $\psi = cte$ está constituida precisamente por las trayectorias físicas y reales del agua a través de la región de flujo. Por esta razón a las curvas $\psi = cte$ se las denomina **líneas de flujo** o líneas de corriente.

Se puede demostrar que la familia de curvas $\Phi(x, y) = cte$ es ortogonal a la familia de curvas $\psi(x, y) = cte$, de manera que la intersección entre dos curvas de distintas familias ocurre a noventa grados.

También se puede señalar que dado un problema específico en el que haya condiciones de frontera fijas (o llamadas de borde), la solución de la ecuación de Laplace constituida por las familias de curvas dadas, con la exigencia que estas familias satisfagan las condiciones de borde existentes, constituyen una SOLUCIÓN ÚNICA del problema considerado.

2-2-2) Propiedades de las líneas de corriente y equipotenciales:

- La cantidad de agua que pasa entre dos líneas de flujo es constante en cualquier sección que se tome entre las líneas, dicho espacio se denomina **canal de flujo**. En efecto:

$$q = \int_{\psi_2}^{\psi_1} v_x dy = \int_{\psi_2}^{\psi_1} d\psi = \psi_1 - \psi_2 = cte \quad (\text{Ec. 2.2.23})$$

Donde q representa el caudal en el canal por unidad de longitud en dirección normal al papel (Fig. 2.4).

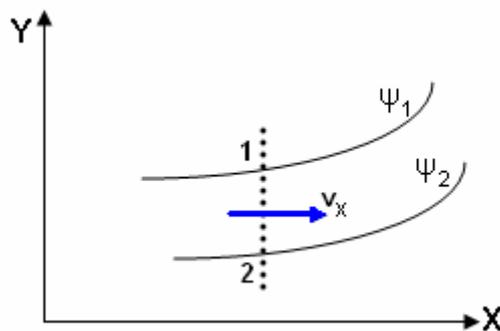


Fig.2.4

- Las líneas de flujo no pueden cortarse dentro de la región de flujo. En efecto, si dos líneas de flujo convergen en el punto de contacto no hay área para el paso del agua y en ese punto no se respeta la continuidad del gasto, lo cual es imposible bajo las hipótesis de la teoría de estudio.
- Las líneas equipotenciales tampoco pueden cortarse entre si, pues, en ese punto, el agua tendría a la vez dos valores de c .

2-3) Trazado de la red de flujo:

El trazado de la red como solución gráfica de la ecuación de Laplace queda resuelto por dos familias de curvas que son las líneas de flujo y las líneas

equipotenciales, dichas familias deben constituir una solución única de la ecuación de Laplace y, por lo tanto, solución del problema de flujo descrito por aquella ecuación.

El método de las redes de flujo utiliza esas afirmaciones para resolver el problema de un modo sencillo y puramente gráfico. Se trata de definir en cada caso particular las condiciones de borde específicas del problema y de trazar, cumpliendo aquellas, las dos familias de curvas ortogonales, obteniendo así una verdadera imagen gráfica del problema y permitiendo visualizar líneas de corriente, calcular caudales, presiones, sobrepresiones y verificar la estabilidad de una estructura.

El trazado de la red comprende en la práctica los siguientes pasos:

- Delimitación de la zona de flujo que se desea estudiar, analizando sus condiciones específicas de frontera.
- Trazado de dos familias de curvas ortogonales entre sí que satisfagan las condiciones de frontera y que constituyen una solución única de la ecuación de Laplace.

2-3-1) Condiciones hidráulicas de borde:

La determinación de las condiciones hidráulicas de borde consiste en establecer las condiciones de carga hidráulica y circulación de flujo en todos los puntos límite del perfil que se estudie. Estas condiciones, para el caso de la pantalla de tablestacas de la Fig. 2.5, son definidas en forma completa por cuatro líneas significativas:

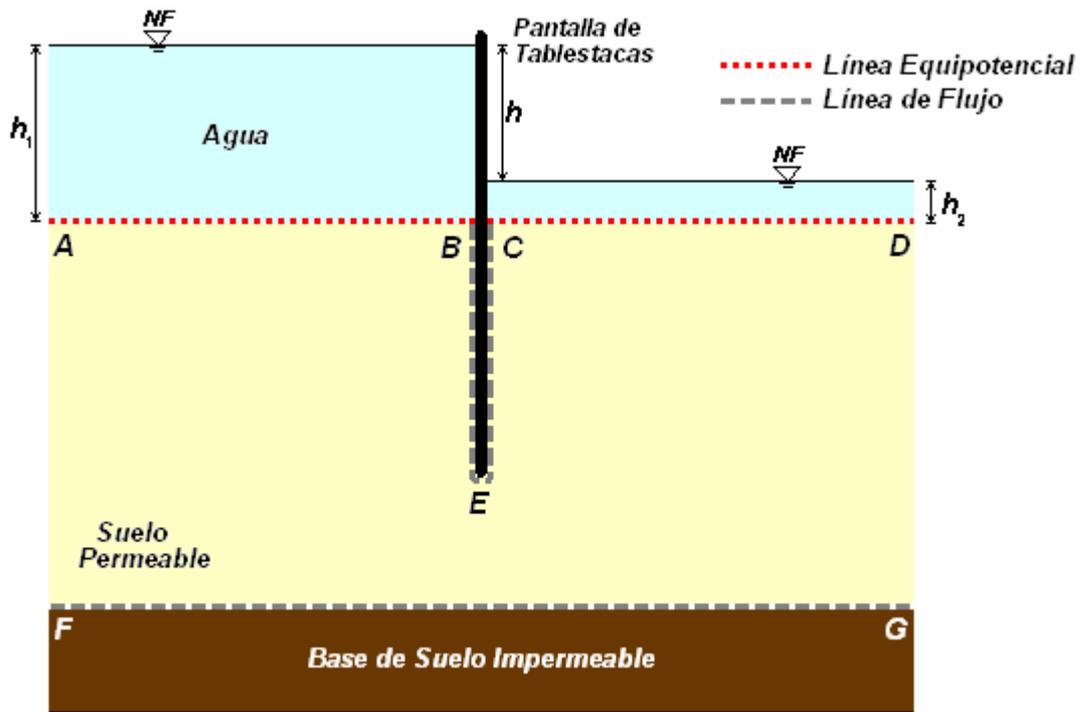


Fig. 2.5

- La línea AB , incluyendo su prolongación hacia la izquierda y hasta donde se extienda la sección, es una línea equipotencial a lo largo de la cual la altura de agua es igual a " h_1 " (**primer línea equipotencial**).
- La línea CD incluyendo su prolongación hacia la derecha, es una línea equipotencial a lo largo de la cual la altura del agua para este problema es igual a " h_2 " (**última línea equipotencial**).

- Desde el punto *B* (el cual toca la tablestaca en la superficie de la interfaz suelo-agua); la línea que sigue la superficie impermeable de la tablestaca hacia abajo hasta el punto *E* y después hacia arriba por el otro lado de la tablestaca hasta el punto *C* (**primer línea de flujo**).
- La línea *FG*, incluyendo sus extensiones hacia ambos lados derecho e izquierdo (**última línea de flujo**).

2-3-2) Recomendaciones para el trazado de la red de flujo:

Los datos que se requieren para dibujar la red de filtración pueden obtenerse resolviendo la ecuación de Laplace, pero la solución no es practicable a menos que las condiciones de borde sean muy simples, requerimiento que no se cumple en la mayoría de las estructuras hidráulicas. Las redes de filtración de dichas estructuras también pueden obtenerse por varios métodos experimentales, pero el procedimiento más conveniente y más económico consiste en construir gráficamente la red de filtración manualmente o utilizando un software que resuelva dicha situación.

Al intentar el trazado de las familias de líneas equipotenciales y de flujo, surge el problema de que por cada punto de la región debe pasar en principio precisamente una línea de flujo y una equipotencial, pues en cada punto de la región de flujo, el agua tiene una velocidad y una carga hidráulica. Esto llevaría, de trazar todas las líneas posibles, a una solución que formaría una mancha uniforme, de modo que, al proceder así no se tendría valor práctico, pues las soluciones encontradas en los diferentes problemas serían uniformemente inútiles. Por lo tanto, es preciso no trazar todas las líneas de flujo y equipotenciales posibles sino sólo algunas seleccionadas. El procedimiento más conveniente es el siguiente:

- Dibujar las líneas de flujo de manera que el caudal que pase por el canal formado entre cada dos de ellas sea el mismo (Δq).
- Dibujar las líneas equipotenciales de manera que la caída de carga hidráulica entre cada dos de ellas sea la misma (Δh).
- Examinar las condiciones hidráulicas de borde del problema y determinar su efecto sobre la forma de las líneas de corriente.
- Trazar todas las líneas de corriente recordando que deben empezar y terminar con una tangente vertical, es decir, ser normales a las superficies del terreno, tanto aguas abajo como aguas arriba. Dibujar líneas equipotenciales y de flujo siempre completas.
- Obtener una primera aproximación dibujando varias curvas suaves que representen líneas de corriente, que determine un número de canales de flujo entre cuatro y cinco.
- Examinar cuidadosamente la red de filtración construida para identificar los efectos más visibles, sin tratar de corregir detalles hasta que toda ella esté aproximadamente bien trazada.
- Corregir los errores dibujando una nueva red.
- Proseguir con el procedimiento de ajuste hasta obtener una red satisfactoria.

Además, Casagrande expresa una serie de consejos que facilitan el trazado de redes, entre los que se encuentran:

- Estudiar apariencia de redes de flujo bien hechas.
- Comenzar a trazar la red en partes en que las líneas de flujo sean rectas y paralelas, en donde los canales son aproximadamente del mismo tamaño.
- Las transiciones entre rectas y curvas deben ser suaves y en forma parabólica o elíptica.

2-4) Cálculo del gasto o caudal en suelos isótropos:

Como se dijo antes el espacio entre cualquier par de líneas de corriente o flujo se lo denomina canal de flujo y se cumple que el caudal que circula a través de cada uno de ellos es el mismo.

Si se considera un tubo de corriente definido por dos líneas de corriente (1-1 y 3-3), situadas en un mismo plano paralelo al movimiento (sin olvidar que el flujo es bidimensional) y las líneas 2-2 y 4-4, correspondientes a aquellas situadas en un plano paralelo al suyo a una distancia b , el agua entre las cuatro líneas se comporta esencialmente como si circulara por una cañería limitada por ellas (Fig. 2.6).

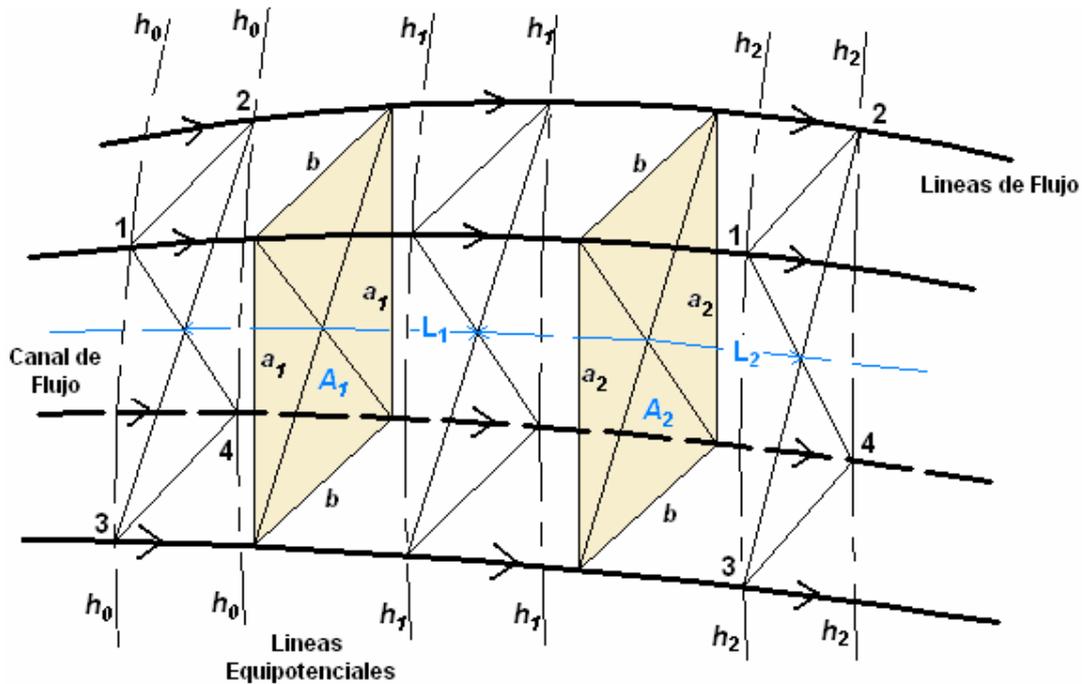


Fig. 2.6

Donde:

h_i : altura piezométrica en cada una de las equipotenciales

L_i : distancia entre las líneas equipotenciales consecutivas

Cuando la sección del suelo limitado por las cuatro líneas disminuye, como el caudal no varía, la velocidad de corriente aumenta. Igualando los caudales en dos secciones, de áreas A_1 y A_2 , y teniendo en cuenta que en un suelo homogéneo el coeficiente de permeabilidad es constante en toda la masa, tenemos:

$$i_1 \times A_1 = i_2 \times A_2 \quad (\text{Ec. 2.4.1})$$

Los gradientes hidráulicos y las áreas de las secciones son:

$$i_1 = \frac{h_0 - h_1}{L_1} \quad (\text{Ec. 2.4.2})$$

$$i_2 = \frac{h_1 - h_2}{L_2} \quad (\text{Ec. 2.4.3})$$

$$A_1 = a_1 \times b \quad (\text{Ec. 2.4.4})$$

$$A_2 = a_2 \times b \quad (\text{Ec. 2.4.5})$$

Si se decide trazar las líneas equipotenciales de tal manera que las pérdidas de carga entre cada par de líneas contiguas sean iguales:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = h_1 - h_2 \quad (\text{Ec. 2.4.6})$$

Donde Δh es la caída de potencial hidráulico entre dos líneas equipotenciales. Sustituyendo los valores de las Ec. 2.4.2 a la Ec.2.4.6 en la Ec. 2.4.1, obtenemos:

$$\frac{\Delta h \times a_1 \times b}{L_1} = \frac{\Delta h \times a_2 \times b}{L_2} \quad (\text{Ec. 2.4.7})$$

$$\frac{a_1}{L_1} = \frac{a_2}{L_2} \quad (\text{Ec. 2.4.8})$$

Esto significa que la relación de los lados de los rectángulos de una red de corriente, formados por la intersección de líneas de flujo y equipotenciales, es constante. Así, si un rectángulo de una red de corriente es aproximadamente cuadrado, $a_1 = L_1$, todos los otros rectángulos de la red son aproximadamente cuadrados.

El caudal Δq que pasa por el canal vale, según la Ley de Darcy:

$$\Delta q = v \times A = v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2 = k \times i \times a \times b \quad (\text{Ec. 2.4.9})$$

Si se supone un ancho unitario ($b=1$) y se calcula el caudal por ancho unitario, la Ec. 2.4.9 se transforma en:

$$\Delta q = k \times i \times a = k \times \frac{\Delta h}{L} a \quad (\text{Ec. 2.4.10})$$

Teniendo en cuenta las dos primeras recomendaciones que se siguen para construir la red de flujo según el punto 2-3-2:

$$\Delta q = \frac{q}{N_f} \quad (\text{Ec. 2.4.11})$$

$$\Delta h = \frac{h}{N_c} \quad (\text{Ec. 2.4.12})$$

Siendo:

N_f : cantidad de canales de flujo en la red

N_c : número de caídas de potencial

q : caudal por ancho unitario

h : pérdida de carga total

Entonces, la Ec. 2.4.10 puede escribirse como:

$$q = k \times h \times \frac{N_f}{N_c} \times \frac{a}{L} \quad (\text{Ec. 2.4.13})$$

En la Ec. 2.4.13 puede notarse que al ser q , k , h , N_f y N_c constantes para una red de flujo dada, la relación a/L debe serlo también. Así, si han de satisfacerse todas las condiciones que se ha decidido cumplir, la relación entre el ancho y el largo de todos los rectángulos curvilíneos de una red de flujo debe ser la misma. En aras de la sencillez, se fija como valor de esa constante a/L la unidad. De esta forma, los rectángulos se transforman en **cuadrados curvilíneos** de manera que la red dibujada cumple con la condición de que por cada canal pase el mismo caudal y de que entre cada dos líneas equipotenciales haya la misma caída de potencial, simplemente si las figuras definidas por esas líneas son cuadradas. Evidentemente el cuadrado es la figura mas sencilla y conveniente, con la ventaja de permitir verificar si esta bien dibujada la red con sólo observarla, lo que no sucedería con los rectángulos, pues al variar el tamaño de ellos no se puede decir sin tomar medidas si conservan sus proporciones o se han dibujado diferentes, con el correspondiente error.

Aceptando lo dicho hasta ahora, el caudal puede escribirse:

$$q = k \times h \times \frac{N_f}{N_c} \quad (\text{Ec. 2.4.14})$$

Dicha ecuación es la fórmula más sencilla que permite calcular el **gasto ó caudal por unidad de longitud** normal a la sección estudiada que ocurre a través de una región de flujo en la que se ha dibujado la red correspondiente.

El término N_f / N_c depende solamente de la forma de la región de flujo y se le llama factor de forma y se lo representa por:

$$F_f = \frac{N_f}{N_c} \quad (\text{Ec. 2.4.15})$$

2-4-1) Cuadrados singulares:

Hay ocasiones en las cuales dentro de las redes de flujo, las circunstancias geométricas de la región fuerzan la situación de manera que se produce una singularidad, dando así lugar a cuadrados en la red que quedan aparentemente fuera de la regla común. La Fig. 2.7 presenta una singularidad típica como ejemplo:

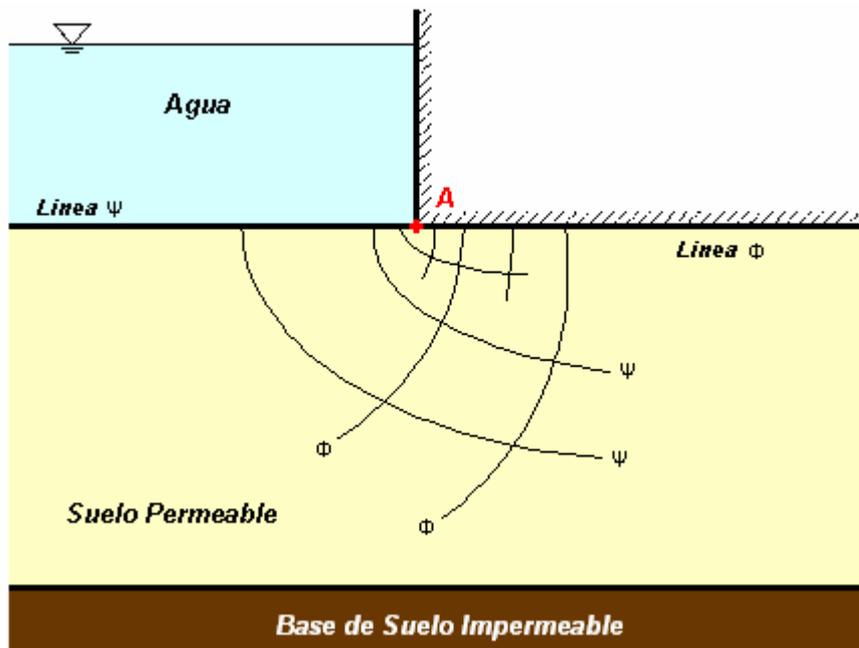


Fig. 2.7

En el punto A concurren una línea de flujo y una equipotencial que son colineales; es decir, forman entre sí un ángulo de ciento ochenta grados, en lugar del usual ángulo de noventa grados.

Aquí, se forma un **cuadrado singular**, que tiene como lados dos líneas de flujo y dos equipotenciales al igual que los otros campos equipotenciales, pero aunque dos de dichas líneas forman entre sí el ángulo normal de noventa grados, se manifiesta la particularidad que la primera línea de flujo y la primera línea equipotencial son colineales en esta situación, dando lugar a que se vean sólo tres de los cuatro lados en el campo equipotencial analizado.

En estos casos se trata de dividir el canal de flujo original, en el cual pasa el caudal Δq , obteniéndose así dos canales por cada uno de los que pasa la mitad de Δq . Si se siguen haciendo subdivisiones posteriores se obtienen canales por los que irá pasando la cuarta parte, la octava parte y así sucesivamente del caudal. Pero, la sección de cada canal es mucho menor que la mitad de la subdivisión anterior, en tanto que por consiguiente la velocidad debe ser mayor al acercarse al punto A (ya que el caudal no varía). De hecho, la velocidad aumenta hacia A, de manera que en ese punto, teóricamente, es infinita. Lo expresado anteriormente es una regla general y puede decirse que si una línea de flujo y una equipotencial se intersecan en un ángulo mayor que 90° (ciento ochenta es un caso particular simplemente), en el punto de unión, el agua tiene una velocidad de infiltración infinita.

Al considerar teóricamente que la velocidad en el punto A es infinita, lo expuesto anteriormente bajo la hipótesis de flujo laminar y de validez de ley de Darcy no es real ya que se consideraban bajas velocidades. Es por esto que se puede aceptar que en las vecindades de A, las velocidades del agua aumentan mucho y el flujo se concentra, razón por la que zonas de este tipo son consideradas críticas en relación a las erosiones y arrastres de suelo, en especial cuando estén en la salida de la red y el material no tenga suficiente confinamiento.

2-5) Cálculo de presiones en el agua dentro de la masa de suelo:

Obsérvese la red de filtración de la Fig. 2.8 dibujada para un tablestacado:

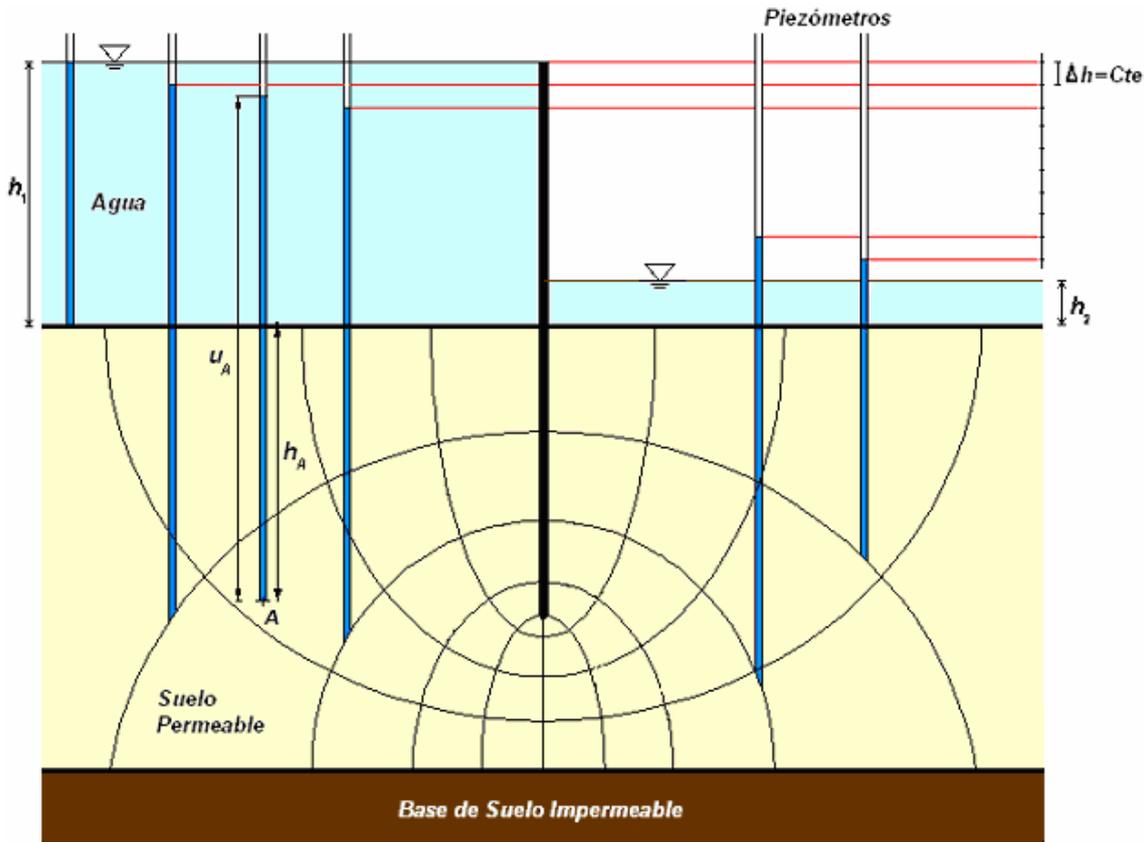


Fig. 2.8

Construida la red de filtración, la presión neutra en cualquier punto situado dentro de la red, como el punto A, puede determinarse fácilmente haciendo el siguiente razonamiento: si no hubiera filtración, es decir si la superficie del terreno aguas abajo fuera absolutamente impermeable, la presión neutra en A sería igual a la suma de h_1 más h_A multiplicada por el peso específico del agua. Sin embargo, como consecuencia de la filtración, hay una pérdida de carga entre la superficie aguas arriba y el punto A, por lo tanto la presión neutra en dicho punto es:

$$u_A = (h_1 + h_A - N_{cA} \times \Delta h) \times \gamma_w = (h_1 + h_A - \frac{N_{cA}}{N_c} h) \times \gamma_w \quad (\text{Ec. 2.5.1})$$

Donde:

h : carga hidráulica ($h_1 - h_2$)

h_A : profundidad del punto A

N_{cA} : Número de caídas de potencial proporcionales hasta el punto A

N_c : Número de caídas de potencial para todo el problema

Δh : caída de potencial constante (h/N_c)

γ_w : peso específico del agua

La parte:

$$sp_A = \left(h - \frac{N_{cA}}{N_c} h\right) \times \gamma_w \quad (\text{Ec. 2.5.2})$$

se denomina sobrepresión hidrostática (s_p), y es la que origina la filtración de agua. Otra forma de calcular presiones y sobrepresiones en una red de filtraciones, se puede llevar a cabo gráficamente. Para ello se considera que la pérdida de carga puede graficarse dividiendo el segmento de longitud h en N_c segmentos de longitud Δh , tal como en la Fig. 2.9 (en éste problema, se observa que el nivel aguas abajo es cero a diferencia del ejemplo anterior en el cual el nivel de aguas abajo es h_2).

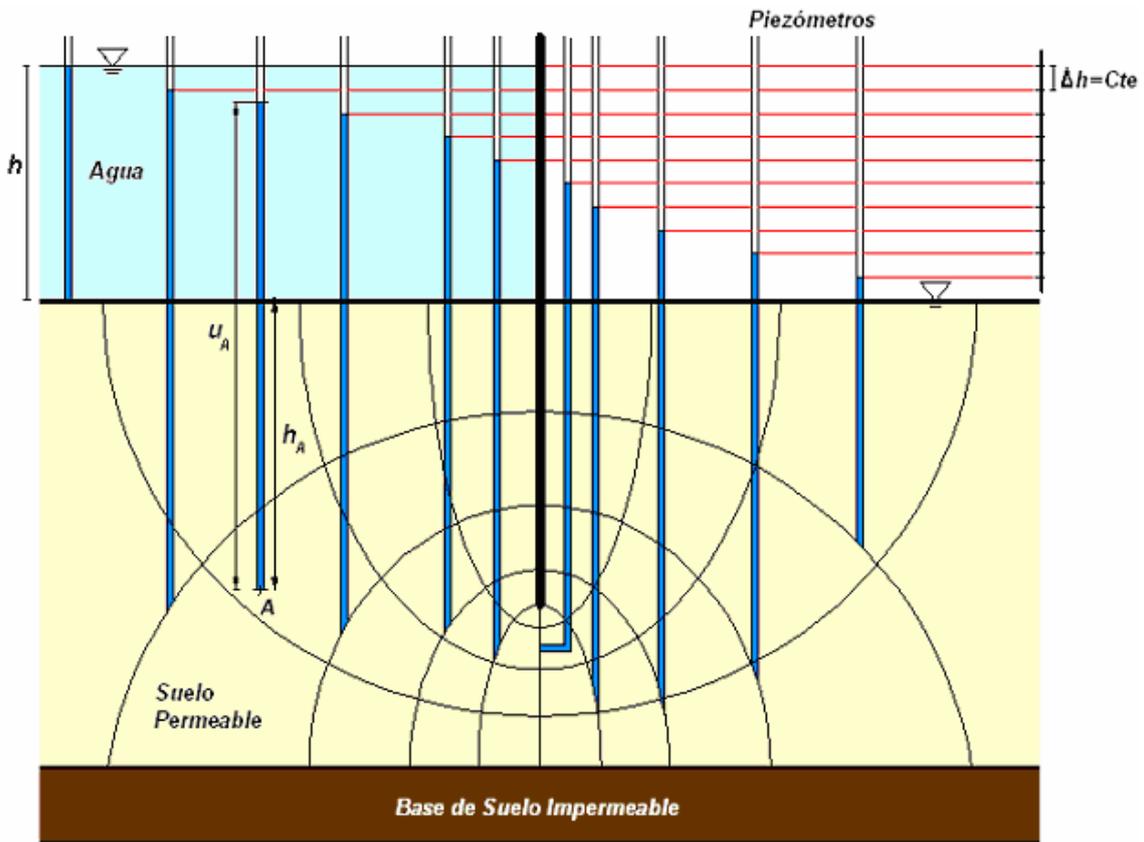


Fig. 2.9

El valor de la presión neutra para un punto cualquiera de la red, como el A, es el de la altura del agua que alcanza dentro de un piezómetro colocado en A, multiplicada por el peso específico del agua. Ese nivel alcanzado es igual a la carga h menos la pérdida de carga en un valor proporcional a Δh . El valor de la sobrepresión, es simplemente la altura h menos la pérdida de carga proporcional a Δh multiplicada por el peso específico del agua.

La sobrepresión hidrostática total sobre un elemento cúbico de lado "a" (ver Fig.2.6), ubicado entre dos líneas equipotenciales consecutivas i y j respectivamente, perteneciente a una red de flujo como la esquematizada anteriormente es:

aguas arriba del elemento:

$$sp_i = a^2 \times \left(h - \frac{N_{ci}}{N_c} h\right) \times \gamma_w \quad (\text{Ec. 2.5.3})$$

aguas abajo del elemento:

$$sp_j = a^2 \times \left(h - \frac{N_{cj}}{N_c} h \right) \times \gamma_w \quad (\text{Ec. 2.5.4})$$

Al ubicar el elemento entre dos líneas equipotenciales consecutivas:

$$N_{cj} - N_{ci} = 1 \quad (\text{Ec. 2.5.5})$$

La diferencia de estas presiones:

$$a^2 \times \left(h - \frac{N_{ci}}{N_c} h - h - \frac{N_{cj}}{N_c} h \right) \times \gamma_w = a^2 \times \frac{h}{N_c} \times \gamma_w = a^3 \times \frac{\Delta h}{a} \times \gamma_w \quad (\text{Ec. 2.5.6})$$

Donde $\Delta h/a$ es igual al gradiente hidráulico i , y a^3 es el volumen del elemento.

Por lo tanto la Ec. 2.5.6 puede interpretarse como la fuerza por unidad de volumen que el agua ejerce sobre el suelo, de valor:

$$\sigma_s = i \times \gamma_w \quad (\text{Ec. 2.5.7})$$

Esta fuerza se conoce como presión de filtración. Tiene la dimensión de un peso específico y, en cualquier punto, su línea de acción es tangente a las líneas de corriente.

Un factor importante en el análisis de estabilidad de presas de hormigón, sujetas a filtraciones dentro de la masa de suelo donde está apoyada, es la presión aplicada por el agua en la base de la estructura conocida como subpresión. Esta presión es el empuje ascendente que resulta de la distribución de presiones intersticiales (neutras) en la base de la presa, y por consiguiente es función de la distribución de dichas presiones (Fig. 2.10), la cual puede obtenerse de la red de flujo calculando las presiones como se explicó anteriormente, aplicando la Ec.2.5.1.

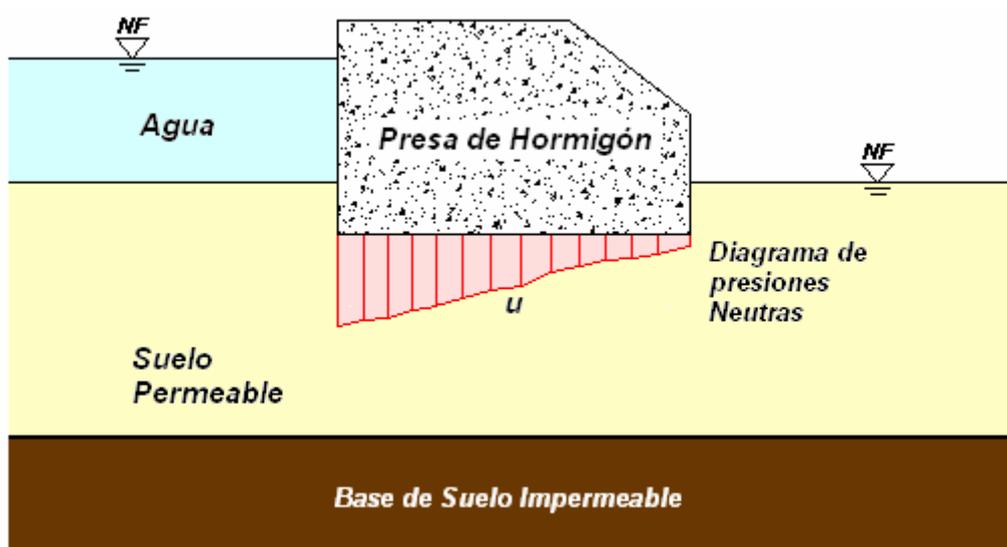


Fig. 2.10

Una vez calculada la presión del agua en todos los puntos bajo la estructura (subpresiones) podrá trazarse con una escala conveniente un diagrama que las represente. El área de esa figura será la subpresión total, que pasará por el centroide de la misma.

Cuando la supresión en la base de una estructura excede el peso de la misma más las cargas que soporta, la estructura se levantará y se producirá el colapso estructural.

2-6) Estabilidad del suelo:

2-6-1) Gradiente hidráulico de salida:

Si se analizan algunos de los ejemplos presentados anteriormente, se verá que las presiones totales dentro de una masa de suelo no varían aunque por sobre dicho estrato se produzca una filtración por diferencia de niveles de agua. Debido a esto las variaciones que aparecen en las presiones neutras implican variaciones en las presiones efectivas que deben ser iguales y de signos opuestos de manera que la presión total no varíe. Es decir, debe ser

$$\Delta\sigma' = -\Delta u \quad (\text{Ec. 2.6.1})$$

Si se le asigna la variable z a la altura de suelo que se tiene punto a punto, medida desde la superficie del terreno, la presión efectiva se define como:

$$\sigma' = \gamma' \times z + \Delta\sigma' = \gamma' \times z - \Delta u \quad (\text{Ec. 2.6.2})$$

Para el caso en que la presión efectiva sea nula, se arriba a un estado crítico donde la resistencia al corte del suelo tiende a cero al igual que en los líquidos.

$$\sigma' = \gamma' \times z - \gamma_w \times i \times z = 0 \quad (\text{Ec. 2.6.3})$$

$$\gamma' = \gamma_w \times i \quad (\text{Ec. 2.6.4})$$

Se llega a determinar un valor de gradiente hidráulico i , denominado **gradiente hidráulico crítico**. A partir de este valor, el suelo pierde toda capacidad de resistencia al corte, y es el caso conocido como "licuefacción de suelos".

$$i_c = \gamma' / \gamma_w \quad (\text{Ec. 2.6.5})$$

Considérese la red de flujo de la *Fig. 2.11*. En esa red, se estudia el equilibrio en la zona de la salida aguas abajo de la pantalla de tablestacas.

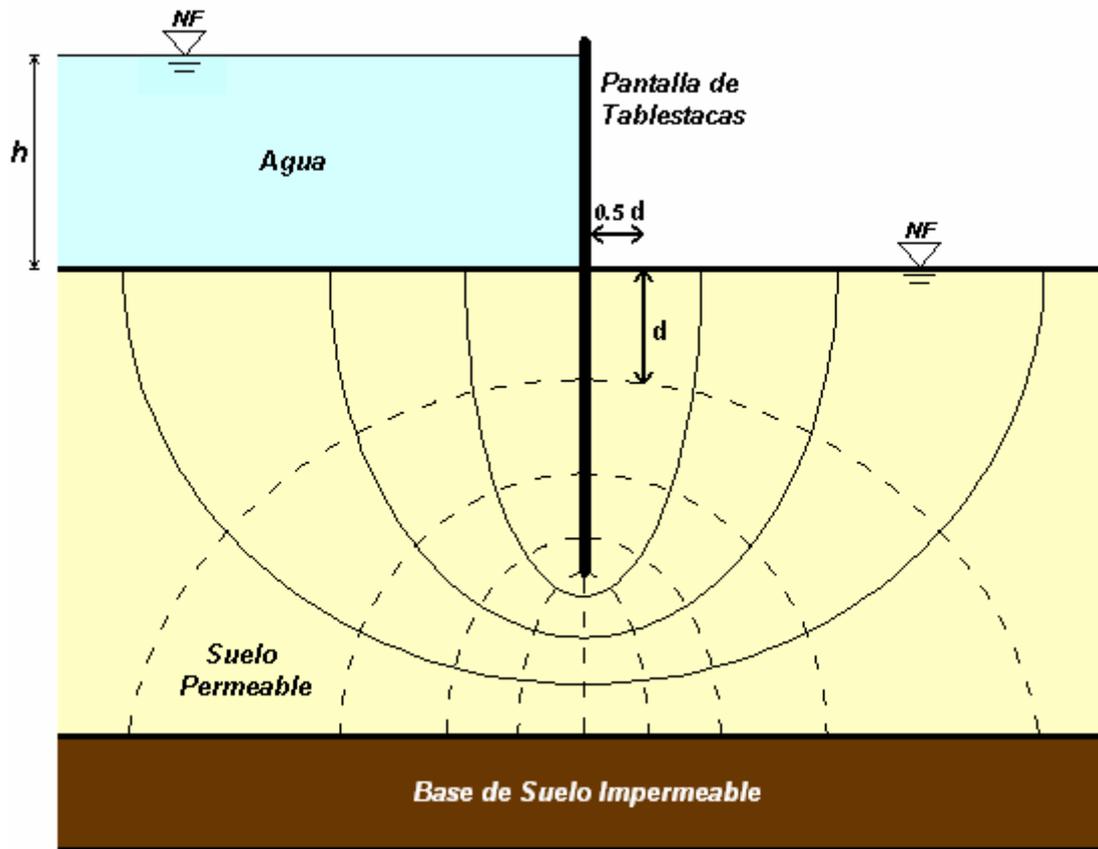


Fig. 2.11

La zona en estudio permanece en equilibrio mientras la carga h permanezca menor que un cierto valor límite. Cuando la presión del agua ascendente vence el peso sumergido del suelo situado en la zona en estudio, comienza a producirse un fenómeno conocido como tubificación (el agua comienza a arrastrar suelo y si esta erosión no se detecta, puede progresar hacia abajo por el borde de la tablestaca, o en el caso de una presa en la base de la misma, creando cavidades amplias o huecos en forma de tubo en el suelo de cimentación). Eventualmente, una oleada de colapsos atraviesa la estructura, socavándola por completo y provocando la falla de la misma.

Muchos diques fundados sobre suelos han roto por la formación, aparentemente instantánea, de un túnel o sifón de descarga debajo de la base del dique y dentro del suelo de fundación. La erosión, causada por el torrente de agua que se produce, aumenta rápidamente el ancho y la profundidad del túnel o sifón hasta que, en un momento dado, la estructura que ha quedado en el aire, rompe en fragmentos y es arrastrada por el torrente. Esta forma de rotura se la denomina sifonaje.

Se ha demostrado que la máxima concentración de flujo de agua ocurre a una distancia $0.5 \times d$ de la tablestaca, como muestra la Fig. 2.11. Por lo tanto, debe compararse el valor del gradiente de salida en ese punto con el gradiente hidráulico crítico, mediante un factor de seguridad v .

$$v \times i_s = i_c \quad (\text{Ec. 2.6.6})$$

Siendo $1.5 \leq v \leq 2$ y el gradiente de salida:

$$i_s = \frac{\Delta h}{d} = \frac{h}{N_c \times d} \quad (\text{Ec. 2.6.7})$$

Donde d es la distancia media que recorre la partícula de agua en el campo en el sentido de circulación.

Cuando la situación sea tal que no se verifique estabilidad, pueden realizarse ciertos ajustes para revertir la situación teniendo en cuenta los factores que definen el i_s (de modo de disminuirlo) o aumentando la carga en la salida. Para ello se puede:

- Bajar la carga h .
- Aumentar el recorrido de las líneas de flujo, y así aumentar el valor de N_c , haciendo cualquiera de las siguientes modificaciones:
 - colocar una pantalla de tablestacas más profunda
 - colocar otra pantalla de tablestacas
 - colocar un blanket o banda impermeable (arcillas, hormigón o geosintéticos)
- Colocar un filtro aguas abajo para aumentar el peso actuante sobre la zona.

2-6-2) Defensas contra la erosión

Como se dijo en el punto 2-6-1, una forma de prevenir los problemas que surgen por la filtración de agua es mediante la colocación de un filtro. Un filtro está compuesto por un material poroso o un dispositivo por el cual se permite el paso del agua u otro fluido sin permitir que se arrastre el material del suelo a proteger. A continuación se describen en forma más detallada dos tipos de filtros:

- Filtros naturales
- Filtros con geosintéticos

2-6-2-1) Filtros naturales:

En el caso de que los vacíos del material utilizado como filtro sean mucho mayores que las partículas más finas del suelo adyacente al mismo, dichas partículas son poco a poco arrastradas a los intersticios del filtro, terminando por obstruir el paso del agua. Si por el contrario, los vacíos del filtro son del mismo tamaño que los del suelo, el filtro puede ser poco a poco lavado por arrastre hacia el conducto subterráneo. Ambas condiciones son igualmente indeseables. Para evitarlas, el filtro debe estar formado por un material cuya granulometría ha de ajustarse a ciertos requerimientos. Se dice que tal tipo de material constituye un filtro del suelo que protege.

Los requerimientos esenciales que deben cumplir los materiales para filtro se han determinado experimentalmente y se basan principalmente en la distribución granulométrica del mismo en relación a los materiales a ser protegidos. Algunas de éstas condiciones se presentan a continuación:

- **Diámetros relativos, Bowles:**

$$\frac{D_{15}(f)}{D_{85}(s)} < 4 \text{ a } 5 \quad \text{S/ Bertrán (1940)} \quad (\text{Ec. 2.6.8})$$

Criterio adicional:

$$R_{15} = \frac{D_{15}(f)}{D_{15}(s)} > 4 \text{ a } 5 \quad (\text{Ec. 2.6.9})$$

$12 \leq R_{15} \leq 40$	Granos sub-angulares
$6 \leq R_{15} \leq 18$	Granos angulares

Donde:

D_i : abertura del tamiz por el que pasa el $i\%$ del material

f : material de filtro

s : material a ser protegido

▪ **Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos:**

$$R_{50} = \frac{D_{50}(f)}{D_{50}(s)} \leq 25 \quad (\text{Ec. 2.6.9})$$

$5 \leq R_{50} \leq 40$	Granulometría Uniforme ($C_u=3$ a 4)
$12 \leq R_{50} \leq 58$	Bien graduado (Granos sub-angulares)
$9 \leq R_{50} \leq 30$	Bien graduado (Granos angulares)

▪ **Otros, Lambe y Whitman**

$$\frac{D_{15}(f)}{D_{85}(s)} < 5 \quad (\text{Ec. 2.6.10})$$

$$\frac{D_{50}(f)}{D_{50}(s)} < 25 \quad (\text{Ec. 2.6.11})$$

Si un filtro separa un suelo grueso de uno fino con tamaños muy diferentes, para cumplir con las exigencias requeridas por cada uno de ellos, se deben usar materiales distintos. En estos casos, como es siempre deseable reducir las pérdidas de carga debidas al escurrimiento a través del mismo al menor valor compatible con los requerimientos granulométricos, el filtro se construye en varias capas. Cada una de esas capas satisface con respecto a la otra las condiciones planteadas anteriormente, formándose un filtro compuesto que se conoce como **filtro graduado**.

La descarga del agua en el límite entre un suelo grueso y uno fino puede producir arrastre o erosión de material fino si la velocidad del agua es elevada. La erosión generalmente comienza con la formación de pequeños manantiales en diferentes puntos del límite entre suelos, donde se inicia la erosión de canales que poco a poco progresan hacia el interior del suelo fino y hacia la zona de entrada del agua. El proceso se conoce como erosión retrógrada, la cual es una de las amenazas más peligrosas que existen para los diques de embalse. Como la erosión no puede producirse sin que una gran cantidad de suelo sea poco a poco lavado y arrastrado, se controla en forma efectiva construyendo filtros en todas las zonas donde exista alguna posibilidad de que se produzcan manantiales.

2-6-2-2) Filtros con geosintéticos:

El geosintético es un material fabricado por el hombre a partir de polímeros (plásticos) para ser usado en obras desarrolladas en suelos, roca u otros materiales.

Existen diferentes tipos de geosintéticos y se dividen principalmente en: geotextiles (ver Fig.2.12), geomallas y geomembranas y pueden utilizarse en forma combinada.



Fig. 2.12

El fabricante del material geotéxico puede proveer ayuda para seleccionar el que mejor se adapte para una situación específica. Las principales funciones son las de filtración, drenaje, separación y refuerzo. Por ejemplo, para controlar la erosión, puede colocarse un geotéxico a lo largo de un talud y sobre éste roca u otro material riprap, como se muestra en la Fig. 2.13:

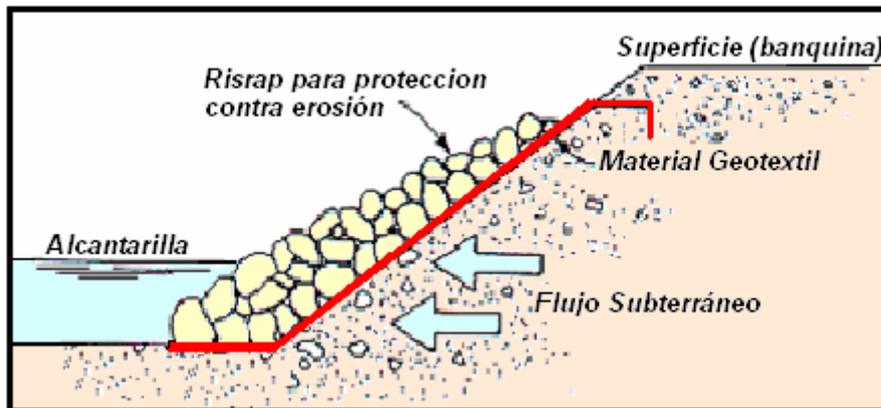


Fig. 2.13

La función del sistema en su totalidad es la de prevenir la erosión de los materiales del suelo a lo largo de la obra. El geotéxico favorece la función específica de filtrar, permitiendo que el agua del suelo atraviese el tejido reteniendo las partículas del suelo. Otro ejemplo de utilización de geotéxico es el que surge al asociar el material a un sistema donde se incorpora un drenaje. En este caso el líquido entra al sistema compuesto a través del geotéxico y es transportado por los canales de un centro permeable hacia el punto de captación. En la Fig. 2.14 se observa como un compuesto geotéxico-dren provee un drenaje adyacente a un lado de un muro de contención.

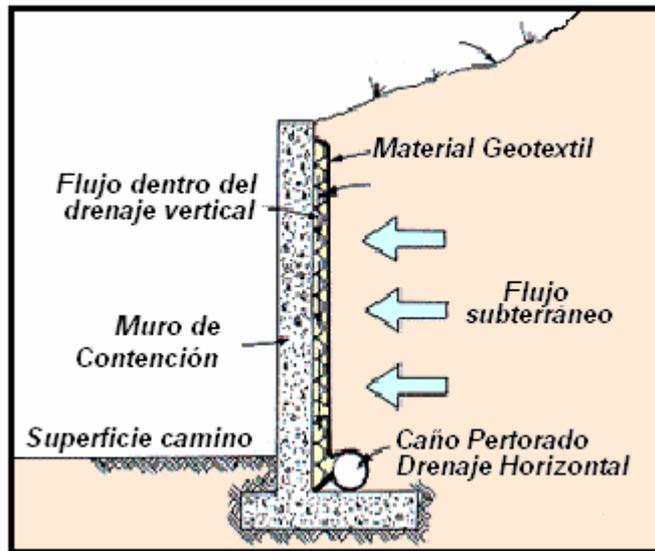


Fig. 2.14

Las siguientes figuras (*Fig. 2.15* y *Fig. 2.16*), ilustran otros ejemplos de utilización de geosintéticos para drenaje y filtración, en donde el geosintético actúa reteniendo las partículas de suelo, permitiendo el paso del agua sin alterar las condiciones de permeabilidad.



Fig. 2.15



Fig. 2.16

2-7) Cálculo del gasto o caudal en suelos anisótropos:

Mediante la teoría de la sección transformada se puede reducir el caso de un suelo anisótropo (caso en que el coeficiente de permeabilidad para el flujo en la dirección horizontal k_x , es distinto al coeficiente para el flujo en la dirección vertical k_y), a la situación de un suelo homogéneo e isótropo. Con esta reducción se logra que la Ecuación de Laplace y sus soluciones sean aplicables para describir el flujo a través del medio anisótropo. La teoría de la sección transformada es un simple artificio de cálculo que se logra por una transformación de coordenadas y que modifica sobre el papel las dimensiones de la zona de flujo en estudio, de manera que la nueva sección obtenida, supuesta isótropa con $k_x = k_y$, tiene todas las condiciones de flujo que interesan, iguales a las prevalecientes en la sección propuesta en la que $k_x \neq k_y$. Para hacer esto posible se reordena la ecuación de Laplace (Ec. 2.2.14) como sigue:

$$\frac{k_x}{k_y} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{Ec. 2.7.1})$$

En el eje vertical, los valores de “y” permanecen iguales y para el eje horizontal se define una nueva variable:

$$x_t = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \times x \quad (\text{Ec. 2.7.2})$$

Obteniendo la expresión:

$$\partial x_t^2 = \frac{k_y}{k_x} \partial x^2 \quad (\text{Ec. 2.7.3})$$

Que al sustituirla en la *Ec. 2.7.1* se tiene:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x_t^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{Ec. 2.7.4})$$

La *Ec. 2.7.4* es la Ecuación de Laplace en dominio bidimensional (x_t, y).

La transformación de coordenadas no ha de hacerse sólo en las ecuaciones, sino también en el bosquejo de la sección bajo estudio en el momento de trazar la red de filtración. Así, la zona de flujo original en la *Fig. 2.17*, se transforma para todos los cálculos subsecuentes en la región transformada de la *Fig. 2.18*:

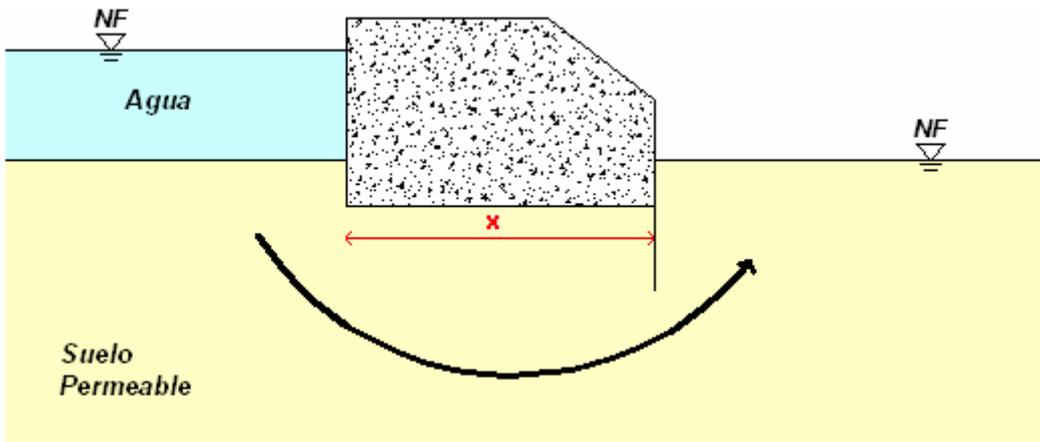


Fig. 2.17: Sección Original

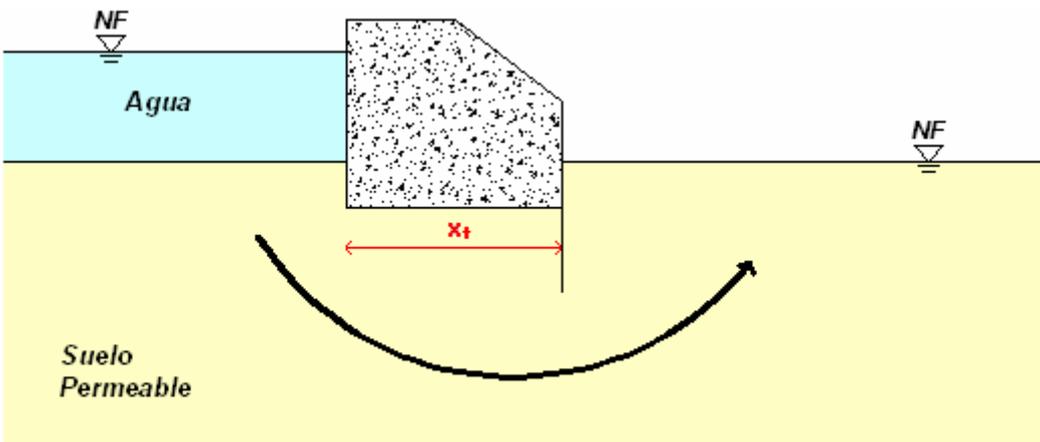


Fig. 2.18: Sección Transformada

Generalmente, por la distribución de los estratos en el suelo, el valor de x_t es menor que el de x , ya que la permeabilidad es mayor en ese sentido por la formación de las diferentes capas de suelos, pero puede darse un caso en el que esto no suceda.

Es decir, para la sección transformada de la *Fig. 2.18* se construye la red de filtración como si el medio fuese isótropo, considerando una permeabilidad equivalente calculada como sigue.

Sea el flujo de filtración dado por la *Ec. 2.7.4*, entonces:

$$q = k_e \times \Delta h \times \frac{N_f}{N_c} \quad (\text{Ec. 2.7.5})$$

Donde k_e corresponde al coeficiente de permeabilidad isotrópico equivalente de la sección transformada.

Con el fin de obtener una expresión para k_e , puede considerarse una figura “cuadrada” en particular bajo la base de la estructura donde el flujo es esencialmente horizontal, como se muestra en las Fig. 2.19 y Fig. 2.20, para las dos escalas:

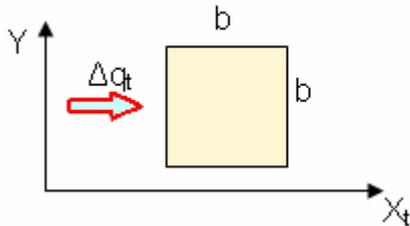


Fig. 2.19: Escala Transformada

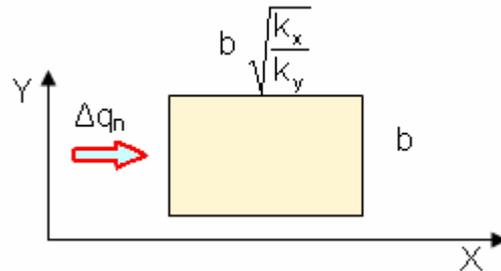


Fig. 2.20: Escala original

Si la disminución de la presión neutra a través de la figura cuadrada es Δh , entonces, para la sección transformada:

$$\Delta q_t = k_e \times i \times A = k_e \times \frac{\Delta h}{b} \times b \times 1 = k_e \times \Delta h \quad (\text{Ec. 2.7.6})$$

Y para la sección original:

$$\Delta q_n = k_x \times i \times A = k_x \times \frac{\Delta h}{b \times \sqrt{\frac{k_x}{k_y}}} \times b \times 1 = \sqrt{k_x \times k_y} \times \Delta h \quad (\text{Ec. 2.7.7})$$

Aplicando el principio de continuidad para la Ec. 2.7.6 y la Ec. 2.7.7:

$$\Delta q_t = \Delta q_n \quad (\text{Ec. 2.7.8})$$

Se obtiene un valor para k_e :

$$k_e = \sqrt{k_x \times k_y} \quad (\text{Ec. 2.7.9})$$

De modo que el caudal de filtración dado en la Ec. 2.7.5 se escribe:

$$q = k_e \times \Delta h \times \frac{N_f}{N_c} = \sqrt{k_x \times k_y} \times \Delta h \times \frac{N_f}{N_c} \quad (\text{Ec. 2.7.10})$$

3) ANALISIS DE FILTRACIONES UTILIZANDO SEEP/W – GeoStudio2007

El GeoStudio 2007 es un software de elementos finitos, utilizado especialmente para el análisis de filtraciones de aguas subterráneas. Su formulación integral le permite considerar los análisis que van desde problemas simples a complejos, con suelos saturados y no saturados, como así también lleva a cabo la solución de problemas dependientes del tiempo. El diseño asistido por computadora (CAD) como la tecnología única en *SEEP / W* le permite generar la malla de elementos finitos de las regiones de dibujo en la pantalla. Se puede aplicar de forma interactiva las condiciones de contorno y especificar las propiedades del material, e incluso se pueden estimar las funciones de parámetros importantes como por ejemplo el tamaño de grano, la conductividad saturada o el contenido de agua. Si se comete un error, se lo puede corregir mediante el comando *Deshacer*.



SEEP/W[®] 2007
Groundwater seepage analysis.

Una vez que haya solucionado su problema de filtración, *SEEP / W* ofrece muchas herramientas para ver los resultados. Genera curvas de nivel o parcelas xy de cualquier parámetro calculado, como la presión, el gradiente, la velocidad y la conductividad. Vectores de velocidad muestran la dirección del flujo y la velocidad misma, las condiciones transitorias pueden ser mostradas cambiando la posición del nivel freático con el tiempo, y se calculan los valores de consulta interactiva haciendo clic en cualquier nodo. También es posible exportar los resultados a otras aplicaciones, como Microsoft Excel o Word, para su posterior análisis o para preparar presentaciones.

Los requisitos del sistema son: Pentium III con Microsoft Windows 2000 Service Pack 3, Windows XP, Vista o Windows 7 (Procesador Intel de doble núcleo con 1 GB de RAM recomendado), 800x600 (1024x768 o superior recomendado). Microsoft Internet Explorer 6 o superior NET 2.0.

Los principales pasos para la resolución de un problema de filtración con este programa son:

1) **Definición de la geometría:**

Es menester aclarar que siempre se debe tener un bosquejo del problema de geometría con las dimensiones exactas antes de comenzar a usar el programa. Se tiene que iniciar GeoStudio 2007, en el modo *SEEP/W*.

En la barra de herramientas, el *SET* menú tiene dos entradas diferentes pero relacionadas: *PAGE* y *UNITS AND SCALES* que pueden ser usadas para definir el área donde se va a trabajar, como así también las unidades a utilizar. Para comenzar, se debe usar 210 mm de ancho (*width*) x 297 mm de altura (*height*) de forma de generar las dimensiones una hoja A4 (*Fig. 3.1*). Aquí, una escala de 1:200 representaría 52m x 40m del problema de geometría aproximadamente. Siempre que se pueda se debe tratar de usar la misma escala en "x" e "y" de modo que la geometría no sea deformada (*Fig. 3.2*). *UNITS AND SCALES* también puede ser usado para definir el problema como bidimensional (donde la tensión es plana).

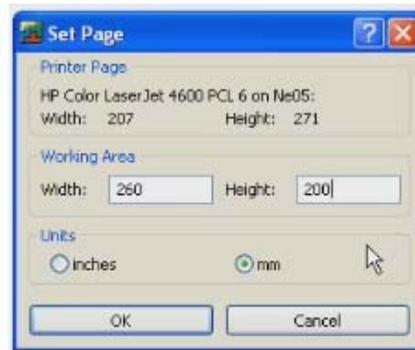


Fig. 3.1

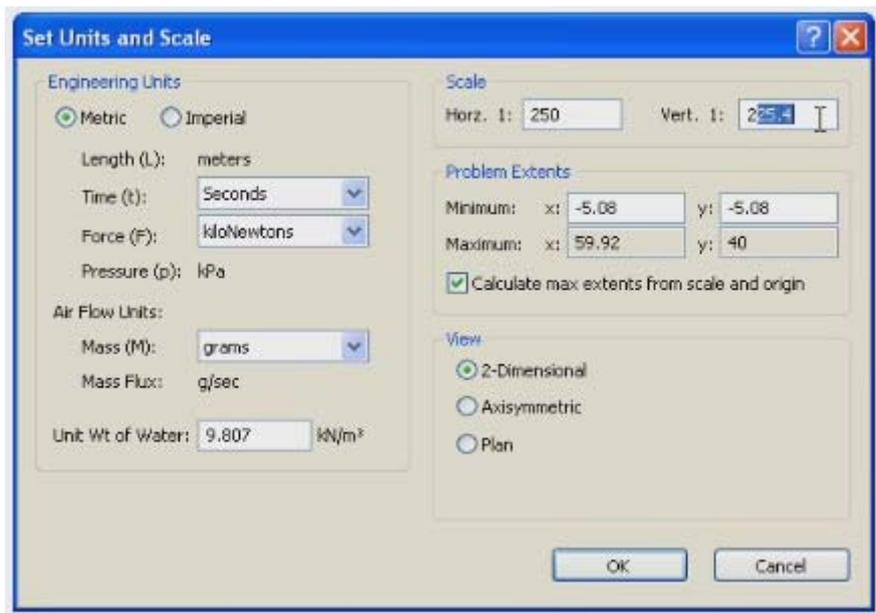


Fig. 3.2

El comando *GRID* permitirá que se seleccione el espaciado de la grilla a utilizar (Fig. 3.3). Es necesario hacer visible los puntos de la grilla para ayudarse con ellos al momento de dibujar. *AXES* permitirá dibujar los ejes y estos serán mostrados (Fig. 3.4), aunque también se puede usar el comando *SKETCH / AXES* para realizar esta misma tarea.

El empleo de *VIEW / PREFERENCES* es usado para cambiar el modo en que la geometría y las fuentes son mostradas.



Fig. 3.3

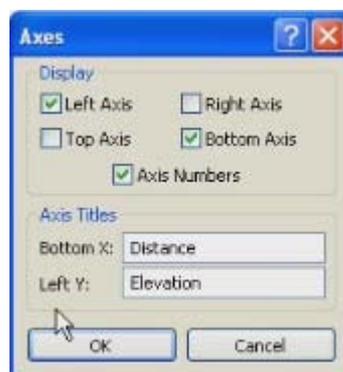


Fig. 3.4

Para bosquejar la geometría se usa el comando *SKETCH / LINES*, que usa líneas libres sin conexión entre ellas. Puede llegar a ser necesario el empleo de *MODIFY / OBJETS* para suprimir o mover estas líneas u objetos. Este comando llamado *SKETCH* es diferente al comando *DRAW* ya que el empleo de *DRAW / REGIONS* sobre los contornos bosquejados crea la verdadera geometría y define las zonas de materiales diferentes (Fig. 3.5). Igualmente, se puede omitir el uso del comando *SKETCH* y comenzar directamente con *DRAW* para definir la geometría del problema.

Bosquejando, Dibujando, o modificando, el click derecho del mouse termina con las acciones a realizar. El menú *SKETCH* es útil también para dibujar líneas de dimensión con puntas de flecha, como así también para señalar dimensiones y objetos en el mismo dibujo.



Fig. 3.5

2) Definición de propiedades del suelo y su asignación a regiones:

El menú *DRAW / MATERIALS* sirve para asignar las permeabilidades del suelo y aplicarlas a las regiones del dibujo (Fig. 3.6). La edición estudiantil puede trabajar hasta con tres materiales diferentes. Lo que usualmente escribimos como $3.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ por ejemplo, en el programa se denomina $3.5\text{e-}5 \text{ m/s}$.

En suelos anisótropos, es necesario especificar el valor de la permeabilidad horizontal k_x como la conductividad saturada y de k_y/k_x como la proporción de conductividad, que es generalmente menor o igual a uno (Fig. 3.7).



Fig. 3.6

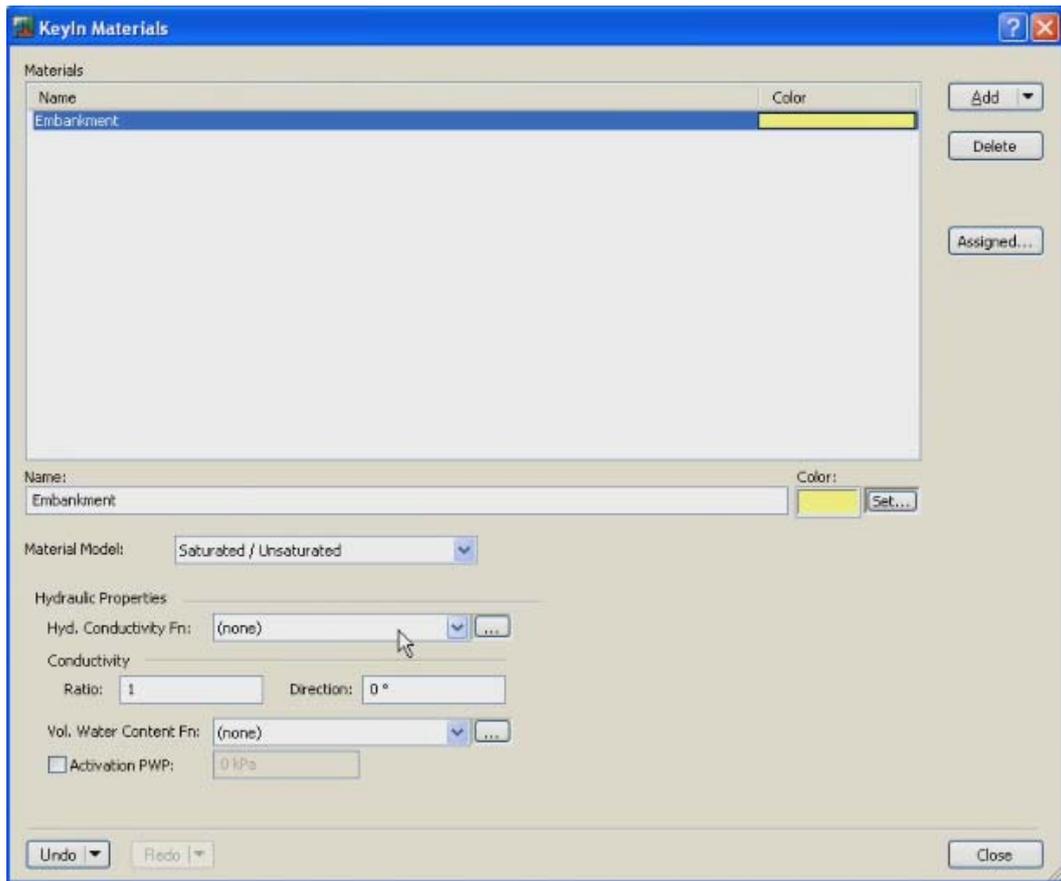


Fig.3.7

3) Definición de las condiciones limites:

Asignar las condiciones de contorno del problema a resolver se logra a través de *DRAW / BOUNDARY CONDITIONS* (Fig.3.8). En estos casos, definir líneas equipotenciales en los límites de aguas arriba y abajo y dar los valores de presiones totales (Fig. 3.9) utilizando el eje horizontal como referencia. Una vez que una condición de frontera se crea, se la puede asignar a un punto, línea o región.

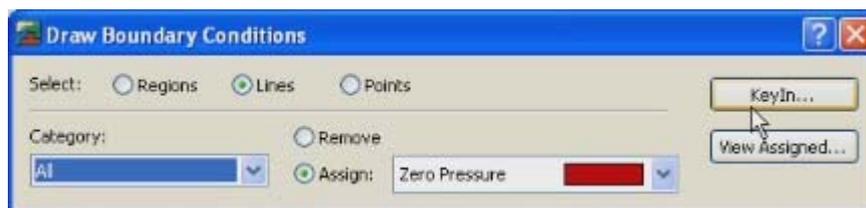


Fig.3.8

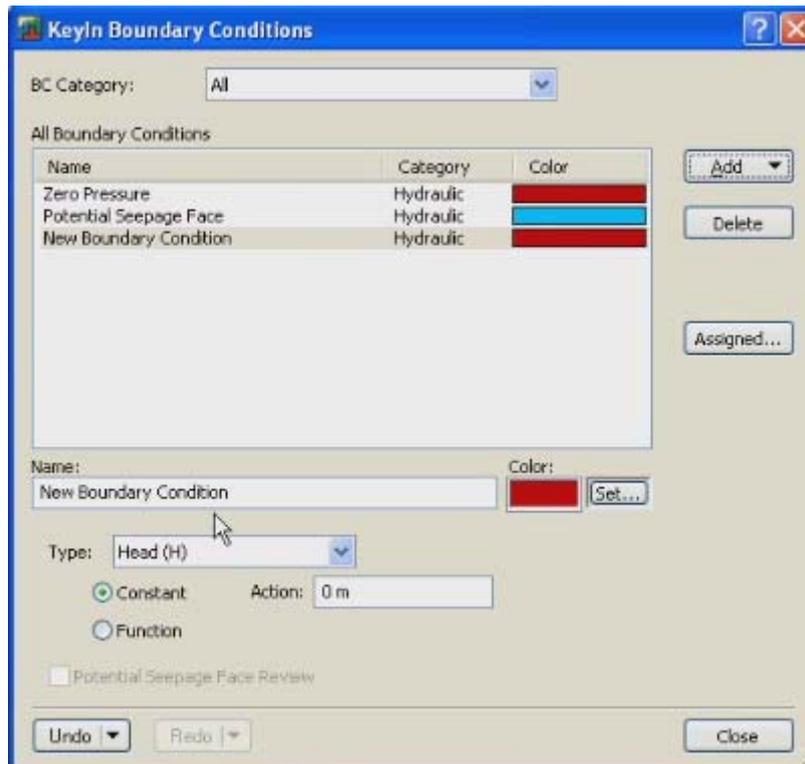


Fig.3.9

4) Definición de los elementos finitos de la malla:

Este paso nos sirve para dar la modelización a través de elementos finitos. La edición para estudiantes con la que se trabaja limita el número de elementos a quinientos y, aunque se presente esta limitación, la malla estándar es adecuada para todo el trabajo. La distribución elegida puede ser vista a través de *DRAW / MESH PROPERTIES*, y dicha malla puede ser variada ajustando el tamaño del elemento global (Fig. 3.10), como así también la forma del mismo (Fig. 3.11).

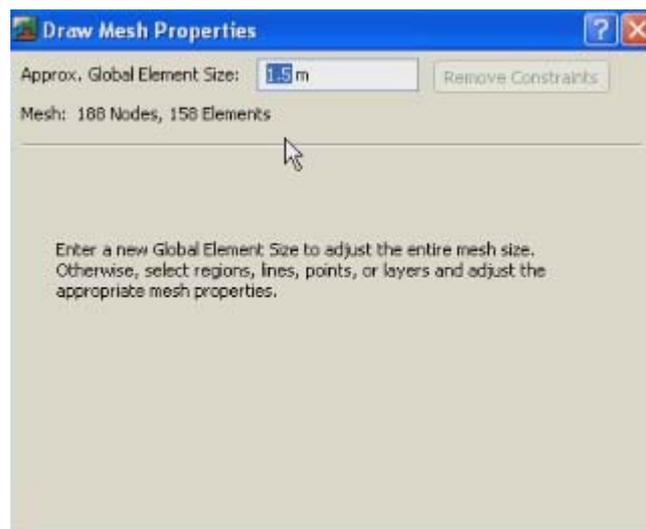


Fig. 3.10

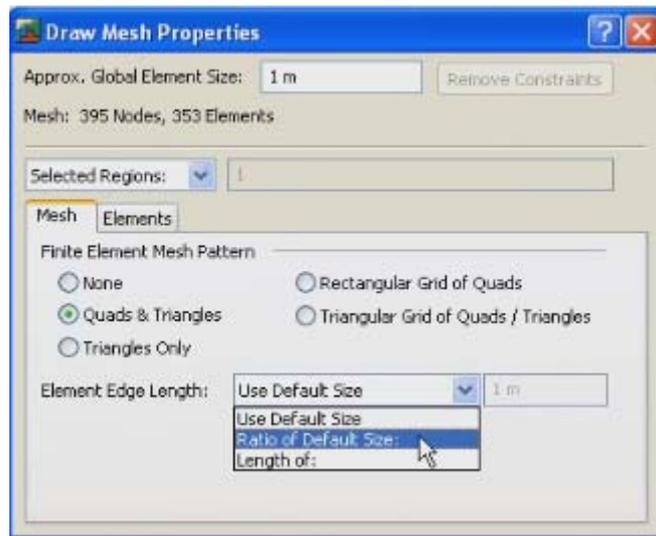


Fig. 3.11

En los problemas de filtraciones, a menudo se debe calcular el caudal y *SEEP/W* puede calcular el caudal en una sección específica. La forma de lograr esto es desactivando *GRID / SNAP* para definir con precisión la sección a analizar y luego seleccionando el comando *DRAW / FLUX SECTIONS* (Fig. 3.12) el cursor se convertirá en una cruz pudiendo con ella dibujar la sección a analizar, que aparece como una línea azul discontinua con una punta de flecha.



Fig. 3.12

5) **La solución del problema:**

Una vez que el problema está totalmente definido a través de los pasos 1 a 4, puede ser resuelto, pudiéndose ver los resultados en una ventana llamada *CONTOUR*. El uso de *TOOLS / VERIFY* se puede utilizar para comprobar la definición del problema antes de una solución.

6) **Visualización de resultados:**

De forma predeterminada, la ventana *CONTOUR* mostrará los contornos de las líneas equipotenciales. Desde *DRAW / CONTOURS* se pueden variar los intervalos y los colores (Fig. 3.13).

Haciendo clic en *DRAW / CONTOUR LABELS*, el cursor se convierte en una cruz y al colocar dicha cruz en una línea de contorno y hacer clic con el mouse, el valor de dicho contorno se muestra.

El comando *DRAW / FLOW PATHS* también permite (de la misma forma que el comando presentado anteriormente) dibujar la línea de flujo en un punto cualquiera (al hacer clic sobre él una segunda vez, la línea de flujo se elimina).

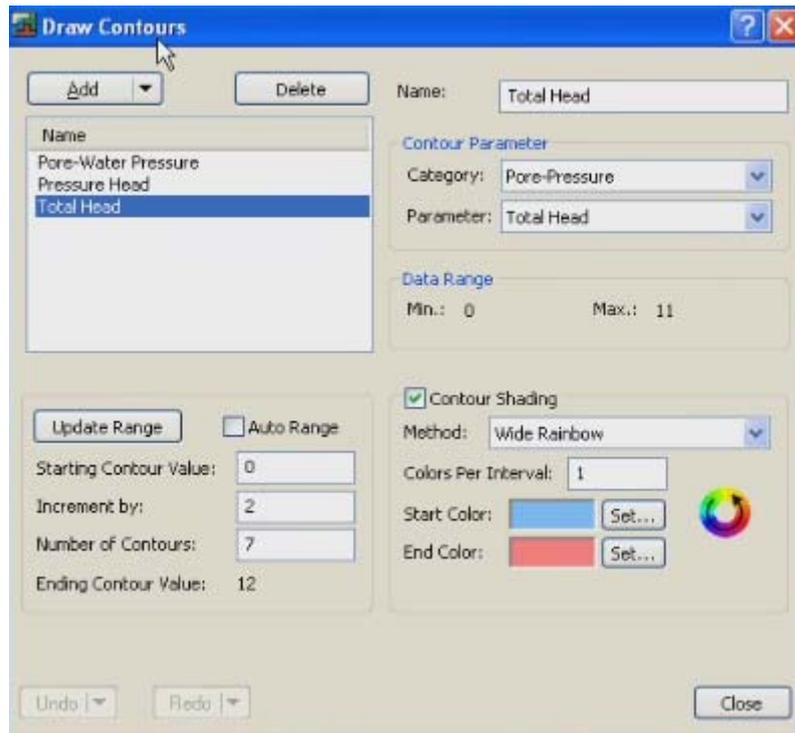


Fig. 3.13

El menú *VIEW / RESULT INFORMATION* da la información completa acerca de cualquier punto de la región de flujo (Fig. 3.14) y, permite imprimir dichos datos o simplemente exportarlos hacia una planilla de cálculo como las que presenta Microsoft Excel para su posterior análisis y estudio.

Parameter	49	56	63
X (m)	11.880577	12.880713	13.65742
Y (m)	2.7579426	3.0369985	3.7148535
Z (m)	0	0	0
Total Head (m)	10.894311	10.862371	10.847105
Pore-Water Pressure (kPa)	79.793361	76.743423	69.945986
Pressure Head (m)	8.136368	7.825372	7.132251
Water Flux (m²/sec)	None	None	None
Cumulative Water Flux (m³)	None	None	None
X-Velocity Magnitude (m/sec)	3.6005083e-008	4.2944801e-008	4.8611175e-008
Y-Velocity Magnitude (m/sec)	1.9738687e-008	2.571997e-008	3.2701617e-008
XY-Velocity Magnitude (m/sec)	4.1060709e-008	5.0057694e-008	5.8587047e-008
X-Gradient	0.035955213	0.043032283	0.048496735
Y-Gradient	-0.019711294	-0.025853229	-0.032592177
XY-Gradient	0.04100381	0.050201263	0.058431014
X-Conductivity (m/sec)	1e-006	1e-006	1e-006
Y-Conductivity (m/sec)	1e-006	1e-006	1e-006
Vol. Water Content (m³/m³)	0	0	0
Slope of Vol. Water Content Fn. (kPa)	0	0	0

Fig. 3.14

4) EJEMPLOS DE APLICACIÓN

4-1) Resolución Manual:

A continuación se presenta un ejemplo práctico de aplicación de los conceptos definidos para el cálculo de filtración. Se considera para estudiar una sección transversal de una pantalla de tablestacas, hincada en un suelo permeable limo-arenoso con un peso específico saturado de 19 KN/m^3 , como el de la Fig. 4.1:

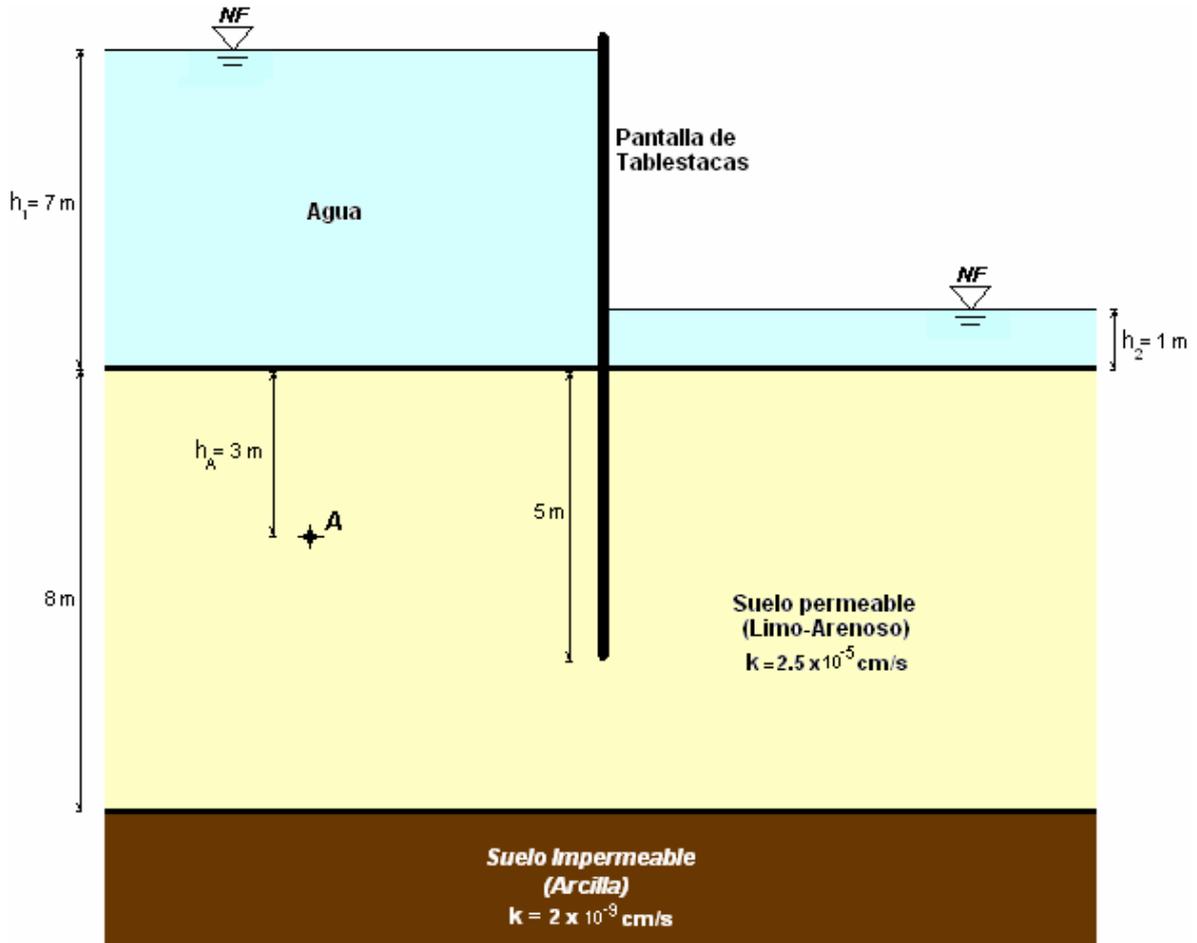


Fig. 4.1

En este problema particular interesa conocer ciertos aspectos y parámetros que caracterizan al movimiento del agua dentro del suelo:

- El caudal circulante por unidad de ancho de sección
- Las presiones dentro de la masa de suelo
- La estabilidad del sistema
- Las presiones verticales actuantes en el tablestacado (a partir de ellas, y en el curso de *Fundaciones* se podrán calcular las presiones horizontales)

Para resolverlo es necesario construir la red de filtración. Para ello primero se dibuja el perfil de terreno y el tablestacado, adoptando una escala adecuada y se traza, como se explicó anteriormente, las condiciones de borde del sistema como así también las líneas equipotenciales y de flujo que definen el problema a resolver.

Luego, con la red trazada se pueden obtener los datos que permiten resolver las ecuaciones planteadas de forma de calcular presiones, caudales y gradientes

hidráulicos críticos. En la Fig. 4.2 se observan las condiciones de borde y las líneas de flujo y equipotenciales para este problema (a escala).

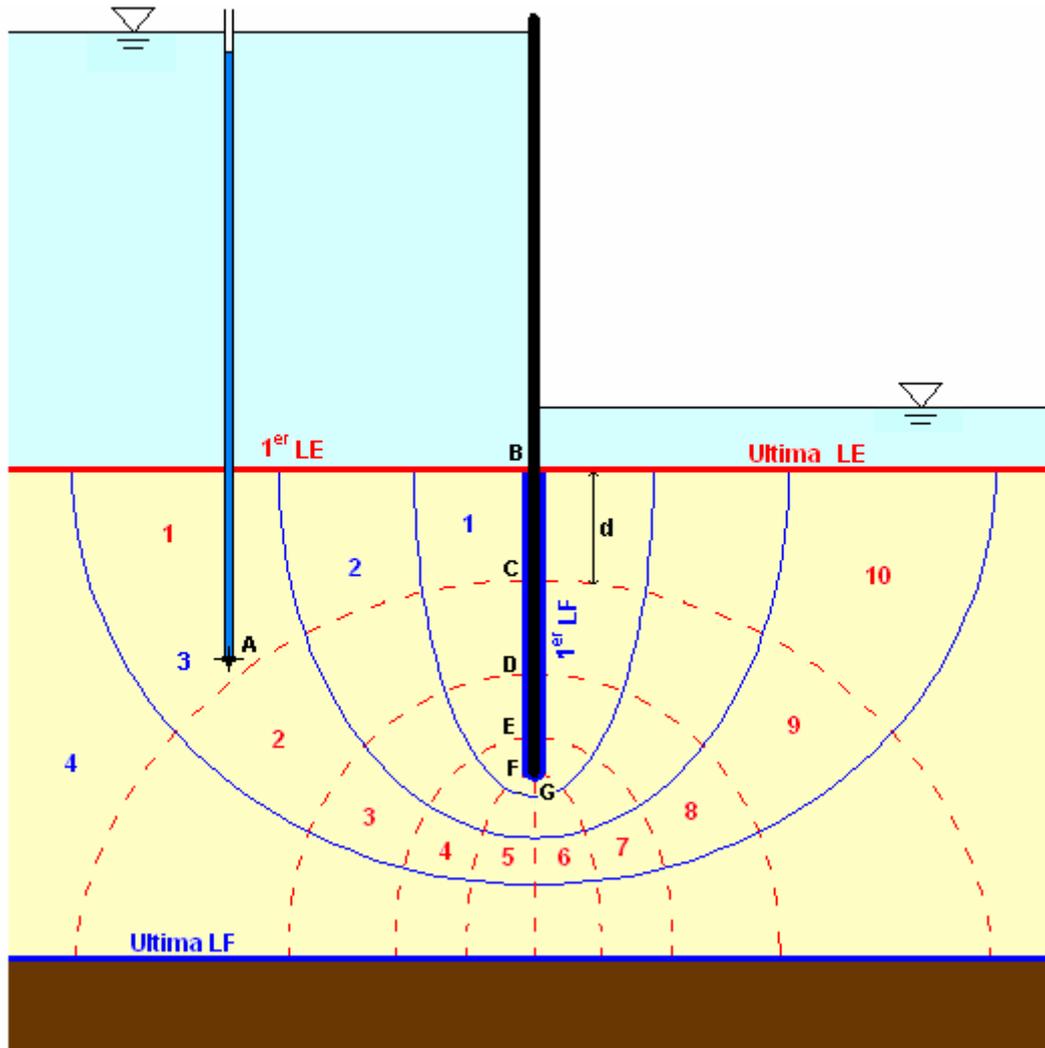


Fig. 4.2

➤ Cálculo del caudal:

De acuerdo a la teoría desarrollada, el caudal puede escribirse como:

$$Q = k \times h \times \frac{N_f}{N_c} \times 1m$$

$$h = h_1 - h_2 = 7m - 1m = 6m = 600cm$$

$$N_f = 4$$

$$N_c = 10$$

Dicha ecuación es la fórmula más sencilla que permite calcular el **caudal por unidad de longitud** normal a la sección estudiada que ocurre a través de una región de flujo en la que se ha dibujado la red correspondiente.

El término N_f / N_c depende solamente de la forma de la región de flujo. En conclusión el caudal para el problema propuesto es:

$$Q = 2.5 \times 10^{-5} \frac{cm}{s} \times 600cm \times \frac{4}{10} \times 100cm = 0.6 \frac{cm^3}{s} = 6 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s}$$

➤ Cálculo de presiones en el agua dentro de la masa de suelo:

Analíticamente de acuerdo a la Ec. 2.5.1, la presión neutra en el punto A es:

$$u_A = (h_1 + h_A - N_{cA} \times \Delta h) \times \gamma_w = (h_1 + h_A - \frac{N_{cA}}{N_c} h) \times \gamma_w$$

Donde:

$$h_A = 3m$$

$$N_{cA} = 0.9$$

$$h_1 = 7m$$

$$\gamma_w = 10 \frac{KN}{m^3}$$

$$N_c = 10$$

Se adopta el peso específico del agua igual a 10 KN/m^3 ya que resulta conveniente a los fines prácticos, siendo el valor del peso específico de 9.81 KN/m^3 para dicho fluido en condiciones normales de presión y temperatura.

En este caso consideramos que el número de caídas al punto A es aproximadamente 0.9 ya que se encuentra entre 0 y 1 dicho número. Finalmente la presión neutra en el punto A queda expresada por:

$$u_A = (7m + 3m - \frac{0.9}{10} 6m) \times 10 \frac{KN}{m^3} = 94.6 \frac{KN}{m^2}$$

La sobrepresión hidrostática (sp), que es la que origina la filtración de agua, de acuerdo a la Ec. 2.5.2 es:

$$sp_A = (h - \frac{N_{cA}}{N_c} h) \times \gamma_w = (6m - \frac{0.9}{10} 6m) \times 10 \frac{KN}{m^3} = 54.6 \frac{KN}{m^3}$$

La presión total en el punto A no varía aunque se produzca la filtración a través del estrato permeable, por lo que su valor es de:

$$\sigma_A = \gamma_w \times h_1 + \gamma_{sat} \times h_A \quad (\text{Ec. 4.1.1})$$

$$\sigma_A = 10 \frac{KN}{m^3} \times 7m + 19 \frac{KN}{m^3} \times 3m = 127 \frac{KN}{m^2}$$

La presión efectiva en el punto A se puede calcular despejándola, ya que se conoce el valor de la presión total y de la presión neutra.

$$\sigma_A = u_A + \sigma_A' \quad (\text{Ec. 4.1.2})$$

$$\sigma_A' = \sigma_A - u_A \quad (\text{Ec. 4.1.3})$$

$$\sigma_A' = 127 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} - 94.6 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = 32.4 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

➤ Estabilidad del sistema:

Para verificar la estabilidad del sistema, como primer paso se calcula el gradiente hidráulico de salida mediante la Ec. 2.6.7:

$$i_s = \frac{\Delta h}{d} = \frac{h}{N_c \times d} = \frac{6\text{m}}{10 \times 1.8\text{m}} = 0.33$$

Donde d está medido del esquema realizado a escala. El gradiente hidráulico crítico según la Ec. 2.6.5 es:

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{19 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} - 10 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}}{10 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}} = \frac{9 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}}{10 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}} = 0.9$$

Por lo tanto, debe compararse el valor del gradiente de salida con el gradiente hidráulico crítico, con la aplicación de un factor de seguridad que tiene que ser mayor a dos aproximadamente para evitar problemas de estabilidad por ausencia de presiones efectivas en el suelo, como se expreso en la Ec. 2.6.6:

$$v \times i_s = i_c$$

$$v = \frac{i_c}{i_s} = \frac{0.9}{0.33} = 2.7$$

Como en esta situación, el coeficiente de seguridad es mayor a dos se puede asegurar que se encuentra en buenas condiciones con respecto a la estabilidad.

➤ Cálculo de presiones verticales en el tablestacado:

Se pueden calcular los valores de presiones totales y de presiones neutras para los puntos B, C, D, E, F, G (puntos ubicados en el contacto de la tablestaca con el suelo). La presión neutra para cada punto genérico i según la Ec. 2.5.1 es:

$$u_i = (h_1 + h_i - N_{ci} \times \Delta h) \times \gamma_w = (h_1 + h_i - \frac{N_{ci}}{N_c} h) \times \gamma_w$$

Siendo i el nombre de los puntos donde se calcula dicha presión y h_i la distancia entre la primer línea equipotencial y el punto i .

$$u_B = (7\text{m} + 0\text{m} - \frac{0}{10} 6\text{m}) \times 10 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} = 70 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$u_C = (7m + 1.7m - \frac{1}{10}6m) \times 10 \frac{KN}{m^3} = 81 \frac{KN}{m^2}$$

$$u_D = (7m + 2.8m - \frac{2}{10}6m) \times 10 \frac{KN}{m^3} = 86 \frac{KN}{m^2}$$

$$u_E = (7m + 3.7m - \frac{3}{10}6m) \times 10 \frac{KN}{m^3} = 89 \frac{KN}{m^2}$$

$$u_F = (7m + 4.35m - \frac{4}{10}6m) \times 10 \frac{KN}{m^3} = 89.5 \frac{KN}{m^2}$$

$$u_G = (7m + 5m - \frac{5}{10}6m) \times 10 \frac{KN}{m^3} = 90 \frac{KN}{m^2}$$

La presión total para cada punto genérico i es:

$$\sigma_i = \gamma_w \times h_1 + \gamma_{sat} \times h_i \quad (\text{Ec. 4.1.4})$$

$$\sigma_B = \gamma_w \times h_1 + \gamma_{sat} \times h_B = 10 \frac{KN}{m^3} \times 7m + 19 \frac{KN}{m^3} \times 0m = 70 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_C = \gamma_w \times h_1 + \gamma_{sat} \times h_C = 10 \frac{KN}{m^3} \times 7m + 19 \frac{KN}{m^3} \times 1.7m = 102.3 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_D = \gamma_w \times h_1 + \gamma_{sat} \times h_D = 10 \frac{KN}{m^3} \times 7m + 19 \frac{KN}{m^3} \times 2.8m = 123.2 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_E = \gamma_w \times h_1 + \gamma_{sat} \times h_E = 10 \frac{KN}{m^3} \times 7m + 19 \frac{KN}{m^3} \times 3.7m = 140.3 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_F = \gamma_w \times h_1 + \gamma_{sat} \times h_F = 10 \frac{KN}{m^3} \times 7m + 19 \frac{KN}{m^3} \times 4.35m = 152.65 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_G = \gamma_w \times h_1 + \gamma_{sat} \times h_G = 10 \frac{KN}{m^3} \times 7m + 19 \frac{KN}{m^3} \times 5m = 165 \frac{KN}{m^2}$$

La presión efectiva para cada punto i , se calcula como la resta de la presión total y la presión neutra, por lo cual dicha presión es:

$$\sigma'_i = \sigma_i - u_i \quad (\text{Ec. 4.1.5})$$

$$\sigma'_B = \sigma_B - u_B = 70 \frac{KN}{m^2} - 70 \frac{KN}{m^2} = 0 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma'_C = \sigma_C - u_C = 102.3 \frac{KN}{m^2} - 81 \frac{KN}{m^2} = 21.3 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_D' = \sigma_D - u_D = 123.2 \frac{KN}{m^2} - 86 \frac{KN}{m^2} = 37.2 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_E' = \sigma_E - u_E = 140.3 \frac{KN}{m^2} - 89 \frac{KN}{m^2} = 51.3 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_F' = \sigma_F - u_F = 152.65 \frac{KN}{m^2} - 89.5 \frac{KN}{m^2} = 63.15 \frac{KN}{m^2}$$

$$\sigma_G' = \sigma_G - u_G = 165 \frac{KN}{m^2} - 90 \frac{KN}{m^2} = 75 \frac{KN}{m^2}$$

Por simplificación se calcularon sólo las presiones sobre el lado izquierdo del tablestacado (Fig. 4.3), pero también se puede calcular de esta forma las presiones sobre el lado derecho del mismo, de manera de conocer las presiones verticales y a partir de ellas los esfuerzos a los que esta sometido, y así poder dimensionarlo adecuadamente.

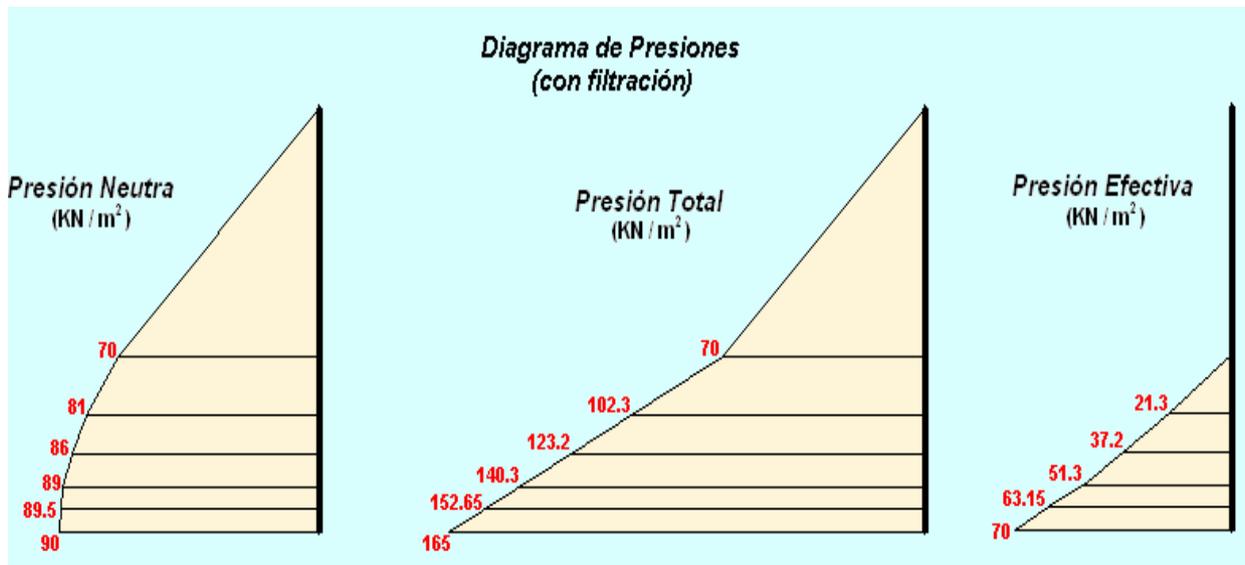


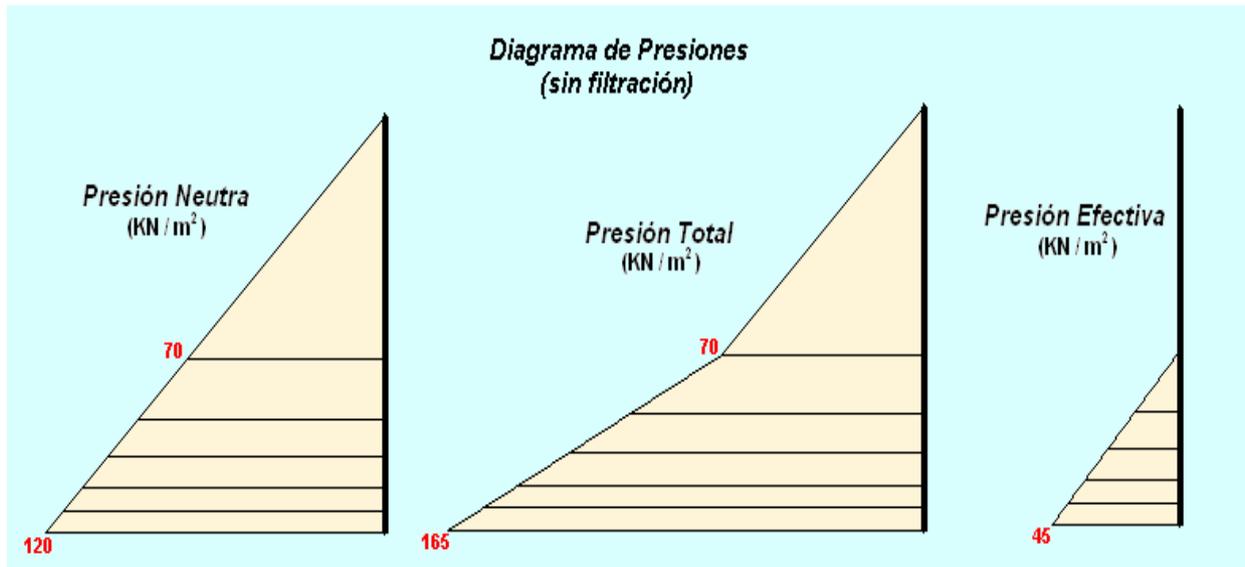
Fig. 4.3

En la Fig. 4.3 se observa que, el diagrama de presiones neutras y efectivas no tiene variación lineal en el sector del tablestacado donde se encuentra el suelo saturado. Esto es así porque el Δu (presiones neutras) no varía linealmente con la profundidad sino que está relacionado con la filtración del agua dentro del suelo. Aquí, la filtración que se produce provoca que dichas presiones Δu varíen en igual proporción que las $\Delta \sigma'$ (presiones efectivas) ya que la presión total permanece constante.

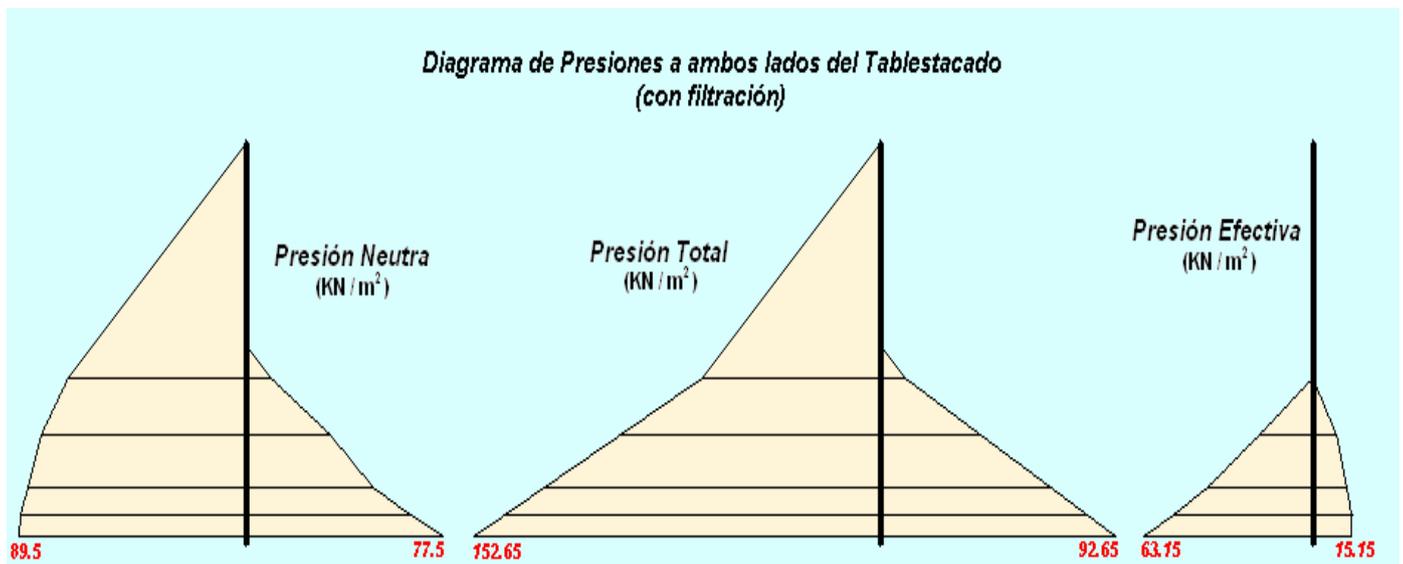
Si estudiamos el tablestacado en la situación en que los niveles aguas abajo y aguas arriba sean iguales, y por lo tanto no se produce el fenómeno de filtración, los diagramas de presiones que se obtienen en el suelo son los que se muestran en la Fig. 4.4.

Comparando los diagramas de presiones del caso sin filtración (Fig. 4.4), con el caso en que se produce filtración (Fig. 4.3), vemos que hay una disminución de la presión neutra y un aumento de la presión efectiva. En cambio, si analizáramos qué sucede del lado derecho del tablestacado, veríamos que la presión neutra aumenta y la presión efectiva disminuye. Esta presión efectiva podría alcanzar valores muy bajos,

y ése es el motivo por el cual se estudia la posibilidad de pérdida de estabilidad aguas abajo del mismo.



En la Fig. 4.5 se muestran las presiones verticales a ambos lados del tablestacado para el caso estudiado. Se observa claramente la disminución de las presiones efectivas del lado derecho del mismo, siendo dichas presiones cercanas a valores críticos en cuanto a la estabilidad, motivo por el cual se analiza este sector.



4-2) Resolución automática: Programa GeoStudio 2007

A continuación se presentan problemas que pueden ser utilizados como ejemplos de aplicación, resueltos con el Programa GeoStudio 2007.

- Ejemplo N°1: Análisis de la filtración por debajo de un tablestacado.

Se analiza en este caso el mismo ejemplo que se resolvió anteriormente en el punto 4-1 (de forma manual) utilizando el programa GeoStudio 2007 (*Modo SEEP/W*).

En dicho programa, el problema queda resuelto con una malla de 363 elementos y 423 nodos (*Fig. 4.6*), con campos equipotenciales de forma cuadrangular en la mayoría de los casos. Se ubica una sección de control en la recta que incluye al tablestacado para calcular posteriormente el caudal circulante (por unidad de ancho).

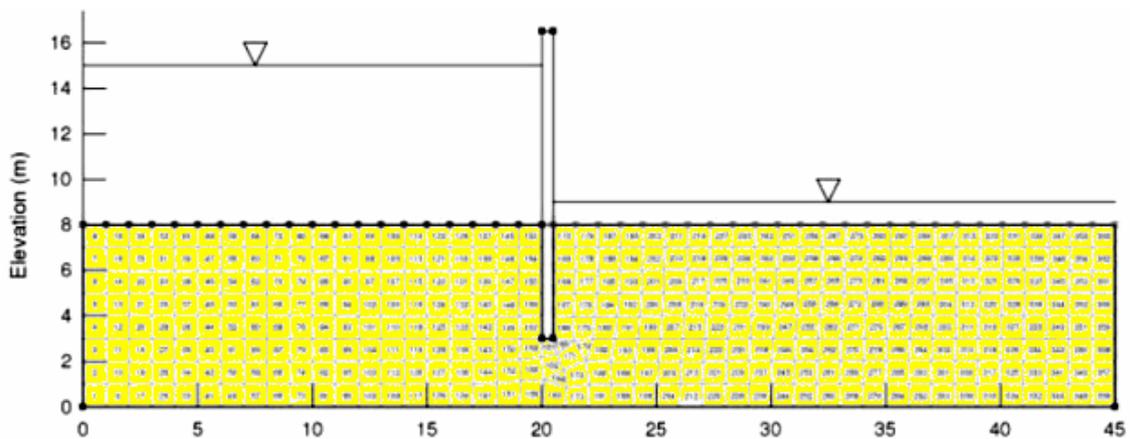


Fig. 4.6

En la *Fig. 4.7* se observan las líneas de flujo y equipotenciales (con el valor del nivel piezométrico correspondiente) para el ejemplo presentado, como así también se muestra el caudal circulante que calcula el programa como promedio de los caudales de cada elemento de la malla en la sección atravesada por la flecha de la figura.

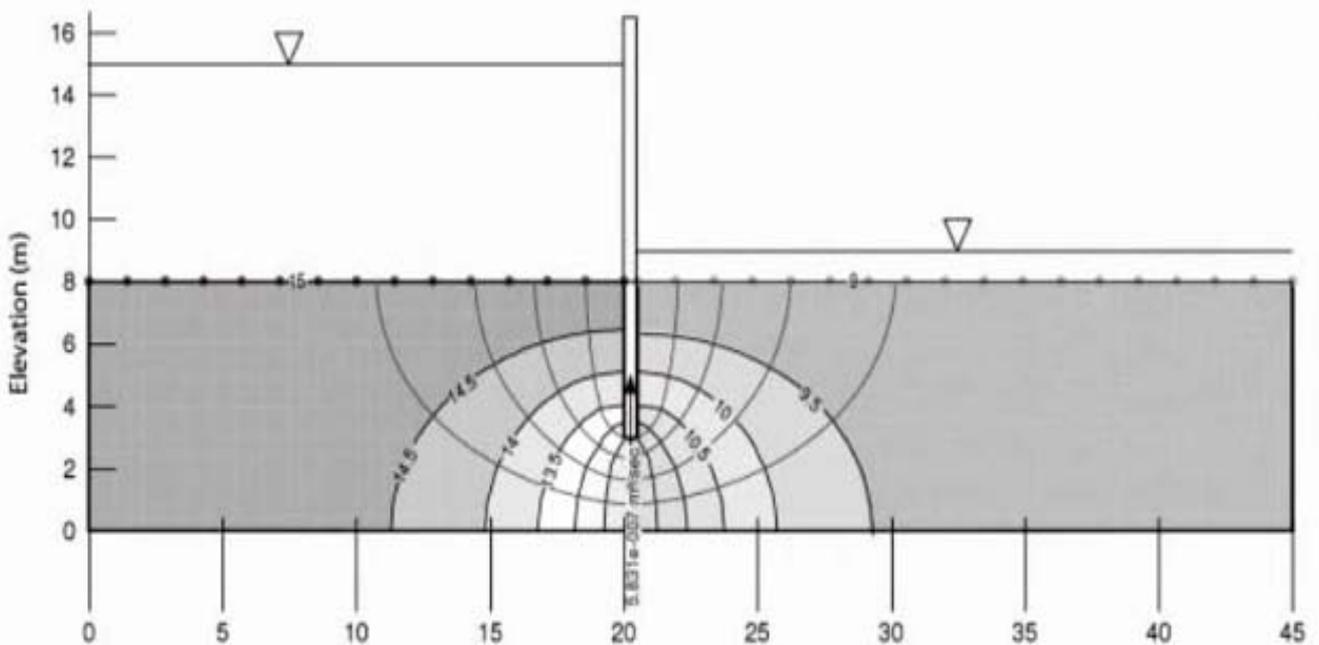


Fig. 4.7

Para este caso el caudal brindado por el programa es de $5.831 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ para dicha sección. El resultado obtenido con el cálculo manual fue de $6.000 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, por lo cual se puede decir que ambos métodos (manual y automático) dan resultados similares (hay una diferencia menor del 16% entre ellos).

También, en este caso N_f/N_c es igual a $5/12$, similar al valor de $4/10$ utilizado al construir la red manualmente. Con estos resultados podemos concluir que los valores obtenidos por el dibujo aproximado a escala son coherentes con las condiciones que se desean representar, por lo cual dichos datos son consistentes y utilizados en la práctica profesional.

- Ejemplo N°2: Filtración por debajo de una presa de hormigón con blanket en la sección aguas arriba y una pared de tablestacas en corte por debajo de dicha presa.

La siguiente figura representa el esquema del problema a analizar:

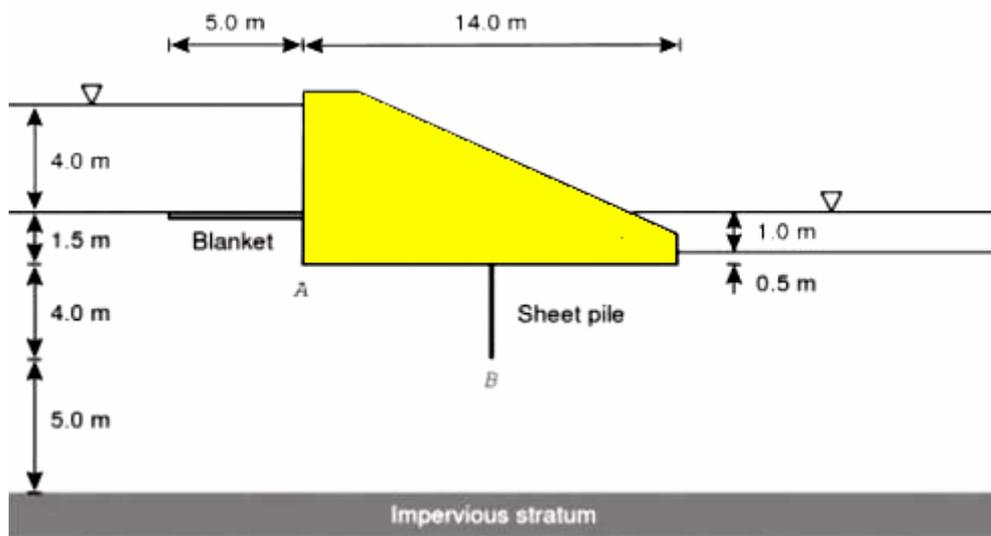


Fig. 4.8

El problema a resolver se estudia considerando, en un primer caso al suelo isótropo y homogéneo (Fig. 4.9) con un coeficiente de permeabilidad de $7.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ igual en ambos sentidos ($k_x=k_y$); y un segundo caso considerando al suelo anisótropo con un k_x igual a la situación de suelo isótropo pero un k_y menor, siendo su valor de $1.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ dando como resultado un suelo menos permeable (Fig. 4.10).

La presencia del blanket y del tablestacado provocan en ambas situaciones un mayor recorrido del agua, de manera que las caídas de presiones no sean tan bruscas y los gradientes sean bajos, evitando así, problemas de estabilidad al pie de la presa por ejemplo.

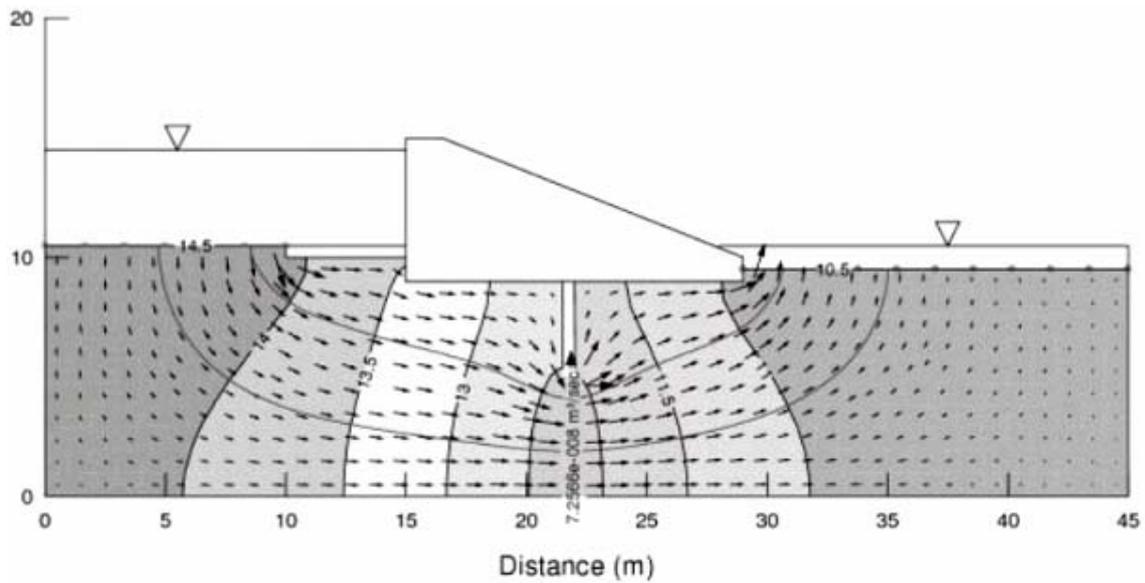


Fig. 4.9

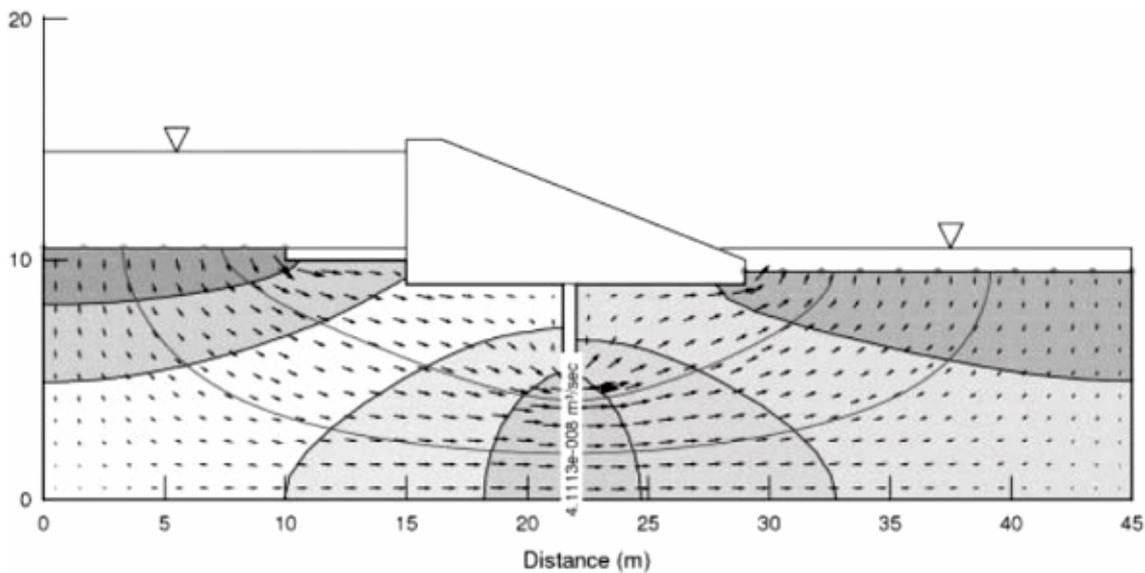


Fig. 4.10

La disparidad entre las dos figuras, en cuanto al caudal en la sección de control analizada, se explica claramente por la diferencia en los coeficientes de permeabilidad. En el primer caso al tratarse de un suelo isótropo, con un coeficiente de permeabilidad en sentido transversal ($k_y = 7.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$) mayor al de la situación de suelo anisótropo ($k_y = 1.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$), el caudal en dicha situación ($Q = 7.2566 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$) es mayor al compararlo con $Q = 4.1113 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ que es el caudal para el segundo caso analizado.

- Ejemplo N°3: Filtración por debajo de una presa de hormigón (suelo isótropo) que presenta un tablestacado en la sección aguas arriba.

En la Fig. 4.11 se presenta el problema a analizar (con dimensiones en m) y los vectores de velocidad de cada campo equipotencial dibujado por el programa (malla). Se trata de un suelo con un coeficiente de permeabilidad constante en todas las direcciones analizadas ($k = 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$).

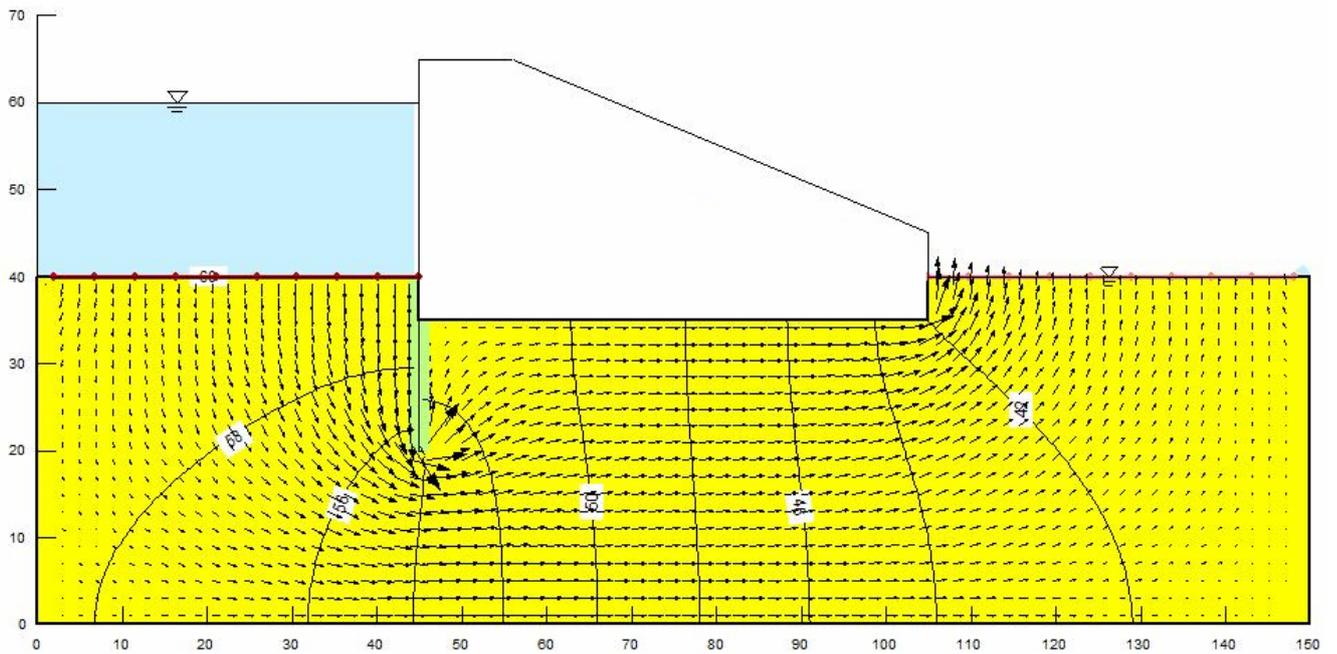


Fig. 4.11

Examinando el problema presentado, la Fig. 4.12 muestra las líneas equipotenciales (con sus respectivas etiquetas de los valores de niveles piezométricos, asociados a los ejes de referencia) y algunas líneas de flujo dibujadas al azar de forma de mostrar el recorrido del agua dentro de la red de filtración.

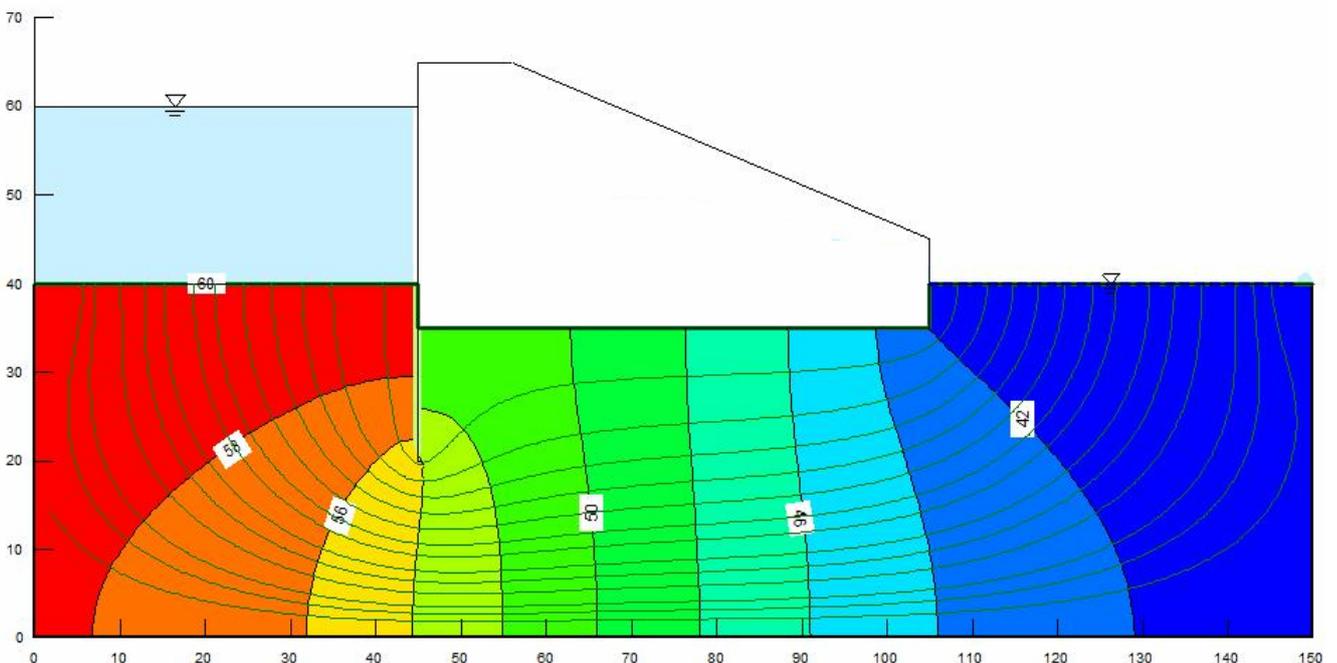


Fig. 4.12

Como se explica en el punto 3, hay un comando muy importante en el programa llamado *VIEW / RESULT INFORMATION* que nos brinda la información completa acerca de cualquier punto de la región de flujo. Si analizamos un punto aguas arriba (Fig. 4.13), otro en una sección bajo el tablestacado (Fig. 4.14) o un punto aguas abajo del mismo (Fig. 4.15) obtenemos diferentes valores de presiones, caudales y velocidades, entre otras variables importantes.

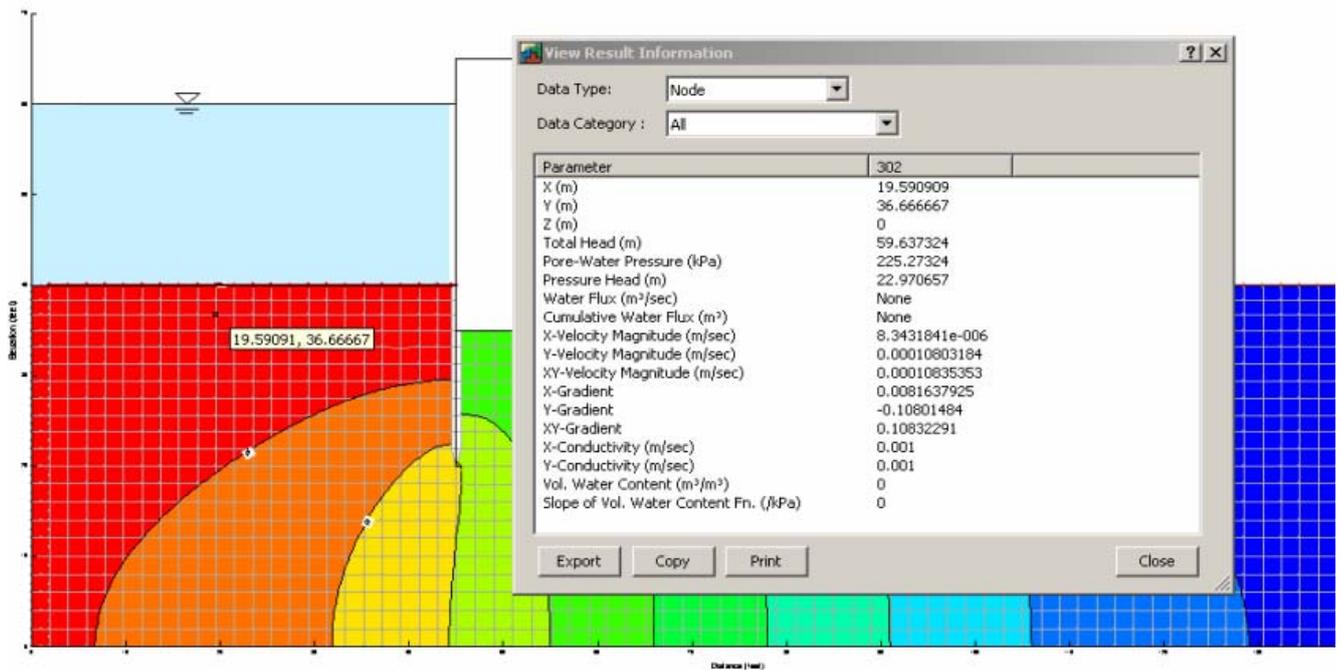


Fig. 4.13

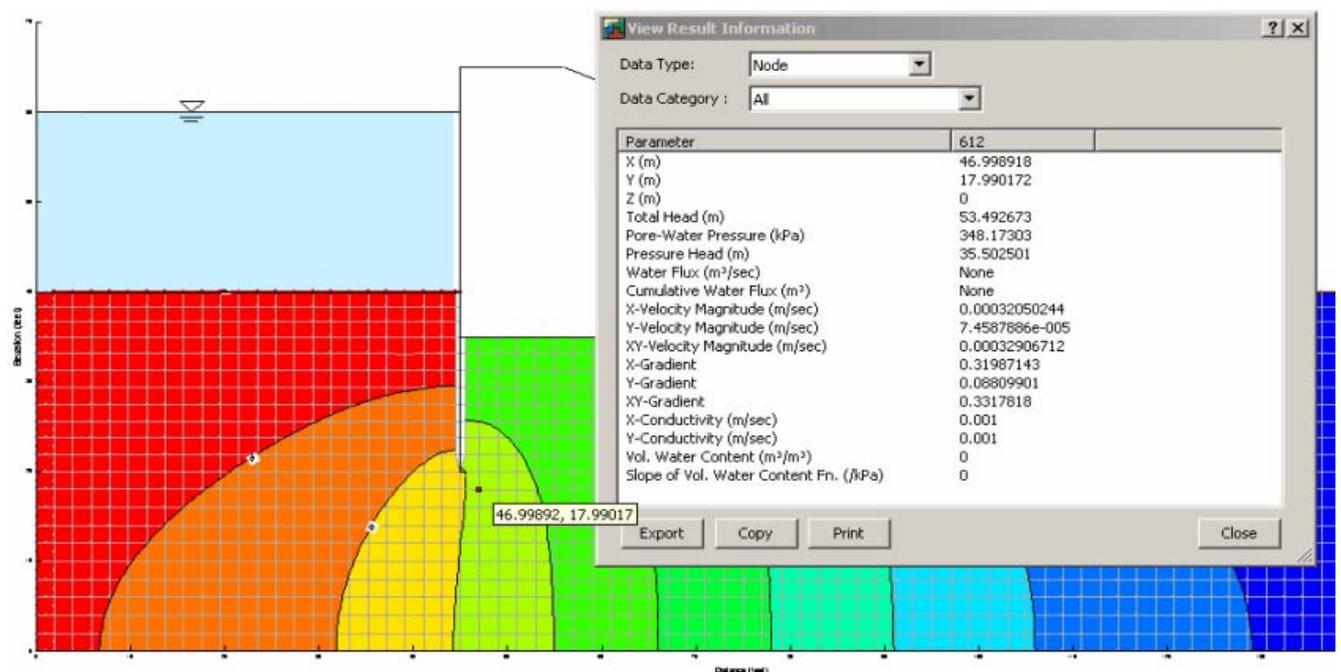


Fig. 4.14

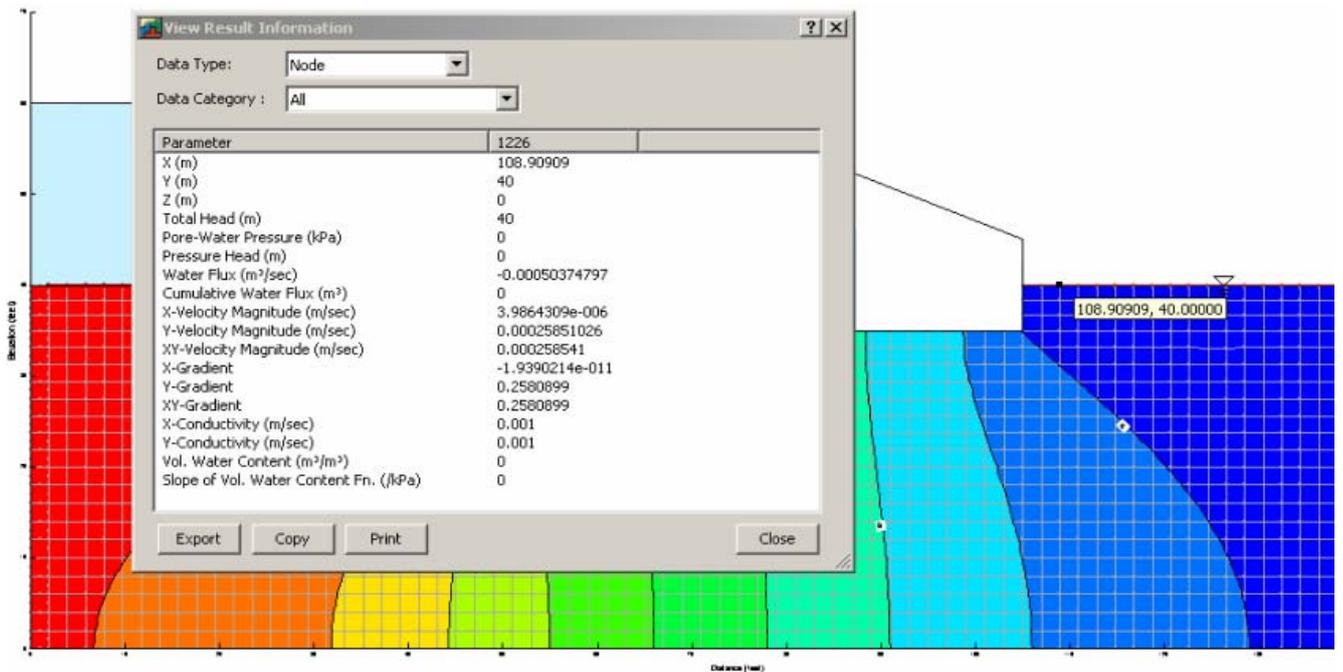


Fig. 4.15

- **Ejemplo N°4:** Filtración por debajo de una presa de hormigón (suelo anisótropo) que presenta un tablestacado en la sección aguas arriba.

En la Fig. 4.16 se muestra el problema a analizar (en escala) con los vectores de velocidad correspondientes a cada elemento de la malla. A diferencia del *Ejemplo N°3*, en este caso nos encontramos con un suelo anisótropo, siendo:

$$k_x = 0.10 \text{ cm/s}$$

$$k_y = 0.01 \text{ cm/s}$$

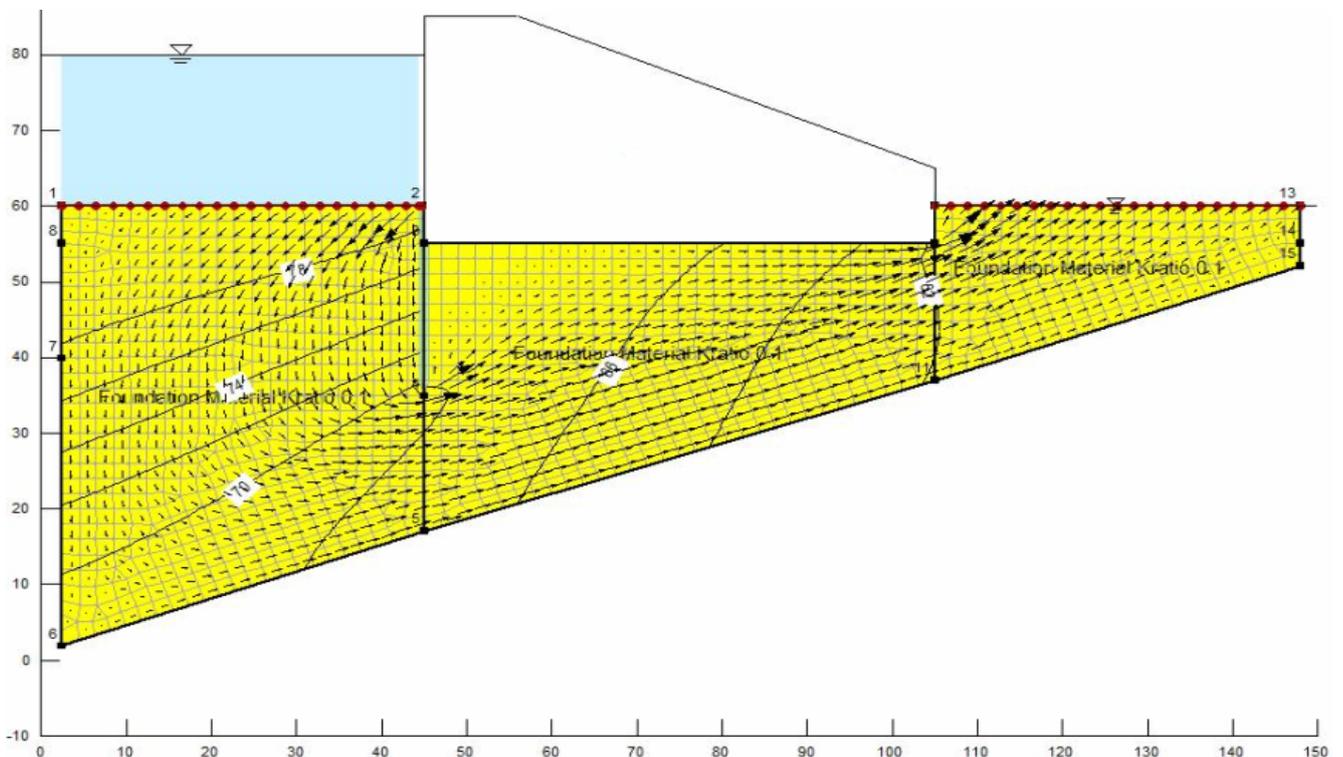


Fig. 4.16

El problema es analizado por el GeoStudio 2007. En la Fig. 4.17 se muestran las líneas equipotenciales y algunas líneas de flujo dibujadas al azar de forma de mostrar el recorrido del agua. Al tratarse de un suelo anisótropo, ciertas propiedades de la red de flujo que corresponden a suelos isótropos no se cumplen, como por ejemplo el hecho de que las líneas equipotenciales y las líneas de flujo no sean perpendiculares.

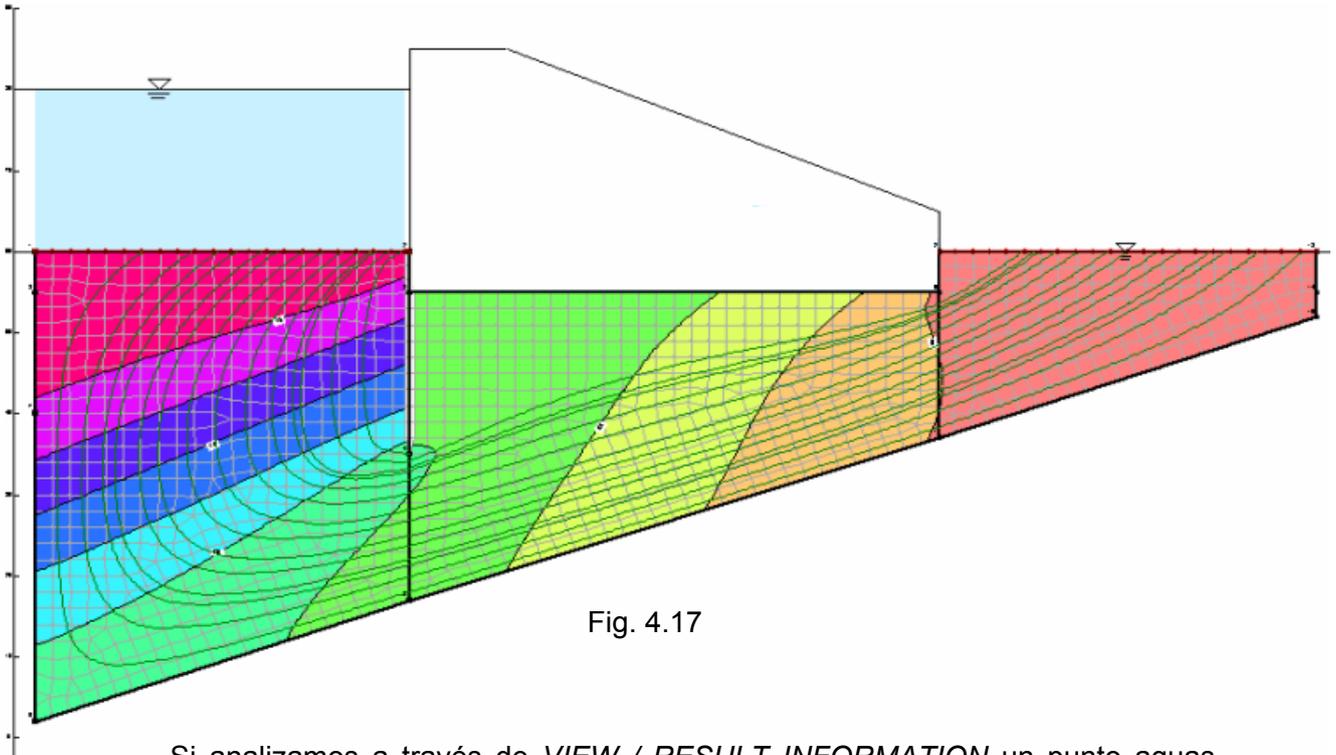


Fig. 4.17

Si analizamos a través de *VIEW / RESULT INFORMATION* un punto aguas arriba (Fig. 4.18), otro en una sección cercana al tablestacado (Fig. 4.19) o un punto aguas debajo de la presa (Fig. 4.20) obtenemos diferentes valores de presiones, caudales y velocidades, entre otras variables.

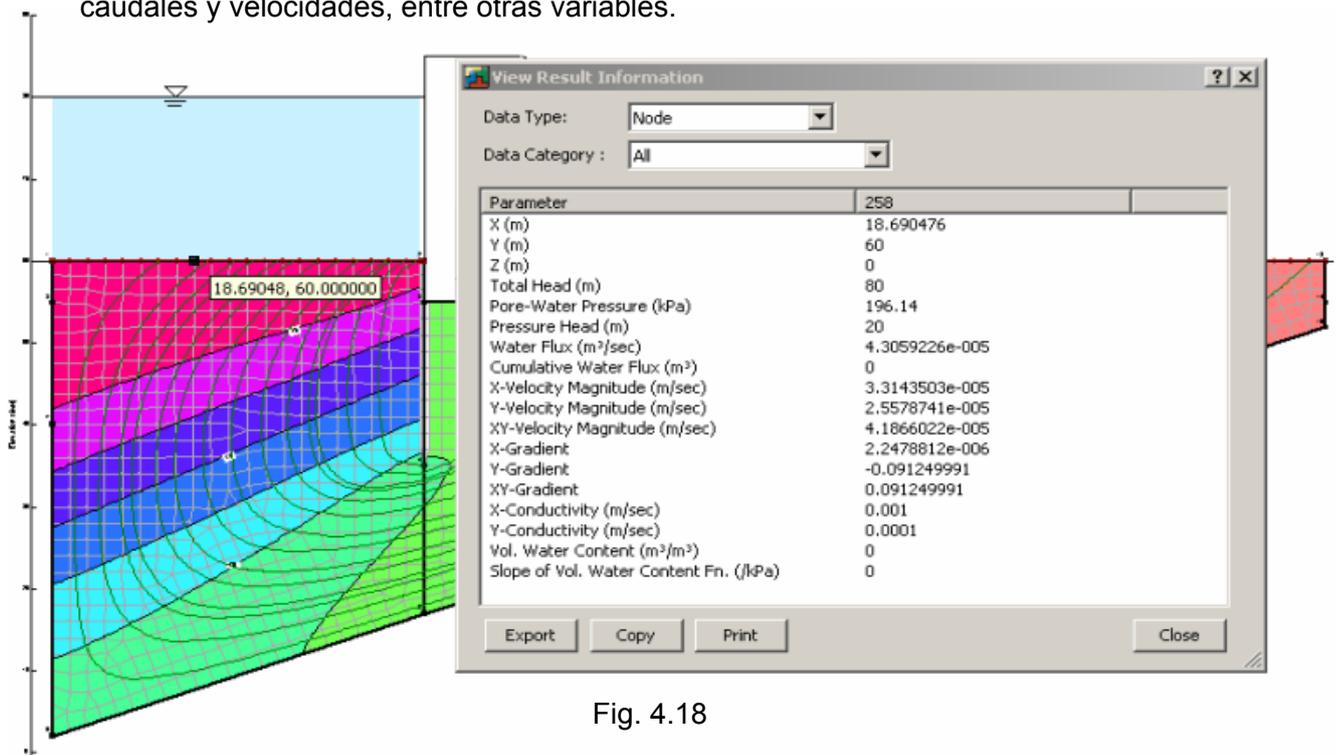


Fig. 4.18

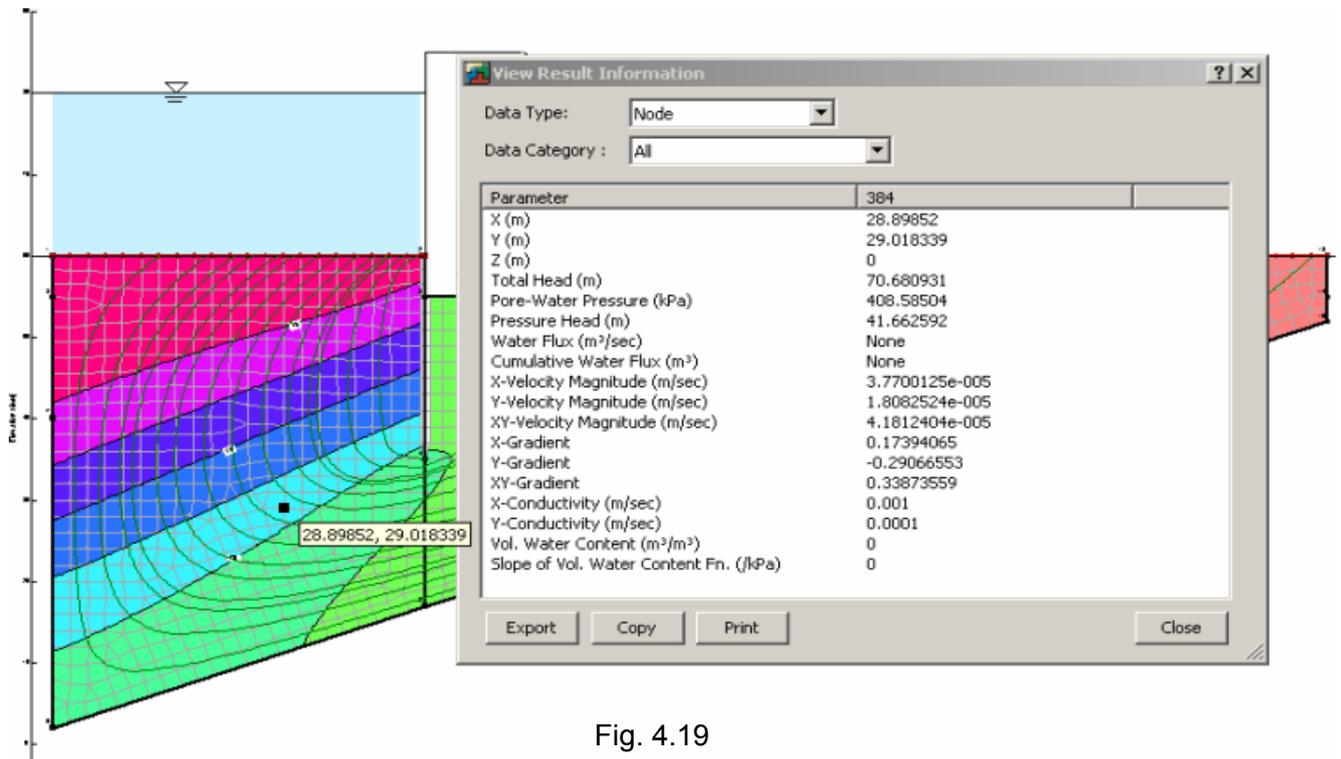


Fig. 4.19

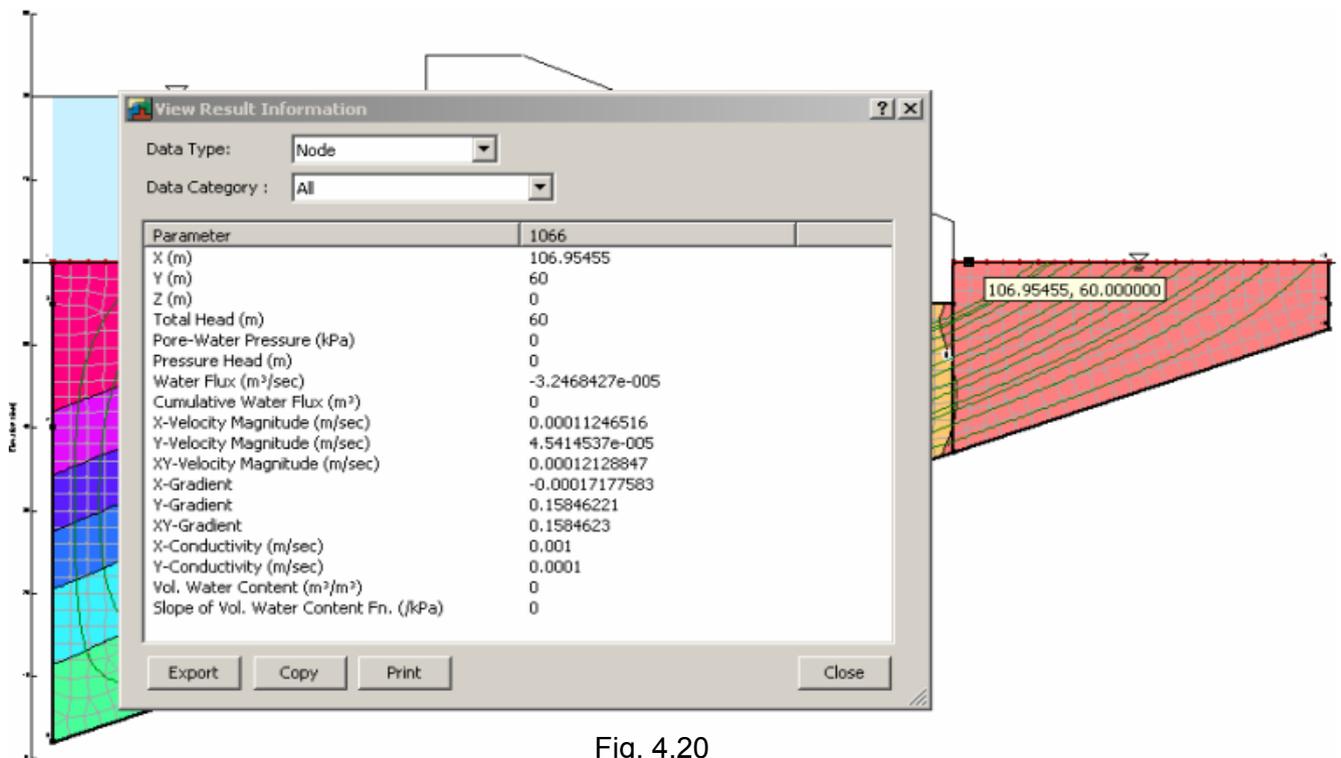


Fig. 4.20

Con los datos proporcionados por el programa, es posible confeccionar tablas y analizar las diferentes variables del problema.

5) BIBLIOGRAFIA CONSULTADA:

- BERRY, Peter L.; REID, David - (1995) - Mecánica de Suelos – Department of Civil Engineering, University of Salford
- JUAREZ BADILLO, Eulalio; RODRIGUEZ, Alfonso R. – (1980) – Editorial LIMUSA, México
- TAYLOR, Donald W. – (1961, 1ª Edición) – Principios Fundamentales de Mecánica de Suelos – Compañía Editorial Continental S.A., México
- TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph – (1973, 2ª Edición) – Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica – Librería El Ateneo Editorial
- DAS, Braja – (2001, 1ª Edición) – Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica – Editorial I. Thomson Learning
- TSCHEBOTARIOFF, Gregory P. – (1960) – Mecánica del Suelo: Cimientos y Estructuras de Tierra – Editorial LIMUSA, México
- SOWERS, George B.; SOWERS, George F. – (1972, 1ª Edición) – Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones – Editorial LIMUSA, México
- DAS, Braja; SIVAKUGAN, Nagaratnam – (2009) – Geotechnical Engineering: A Practical Problem Solving Approach – Editorial J. Ross Publishing
- RODRIGUEZ, Alfonso Rico ; DEL CASTILLO, Hermilo – (2006) – La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas – Editorial LIMUSA, México
- ORSOLINI, Hugo; ZIMMERMANN, Eric; BASILE, Pedro – (2009, 3ª Edición) – Hidrología: Procesos y Métodos – Rosario: UNR Editora
- www.na.fs.fed.us/spfo/pubs/stewardship/accessroad/accessroad.htm
- www.geofabrics.com.au/bidim.htm
- www.fbe.uwe.ac.uk/public/geocal/soilmech/water/WATERMES.htm
- www.geo-slope.com/products/seepw2007.aspx
- www.geofixsl.com
- www.typargeotextiles.com
- www.multigeo.com
- www.geosistemas.net