

## Agua subterránea en túneles

Raúl Morales Escalante

Estudios y Proyectos MORO S. A. de C. V.

*En la construcción de túneles, uno de los problemas graves que se llega a presentar es la presencia de agua subterránea, que dificulta o imposibilita la construcción de los mismos. En este artículo se analiza la forma en que se pueden cuantificar los volúmenes de agua que fluyen del acuífero hacia el túnel; los métodos que se proponen están basados en la definición y construcción de redes de flujo ortogonales que permitan usar y simplificar la ley de Darcy para la cuantificación. Otro aspecto que se trata es la determinación de presiones a las que está o estará sometida la obra.*

Existen obras de ingeniería que requieren de estudios que relacionen a la Geología y la Ingeniería; éste es el caso de la construcción de un túnel, donde es muy importante tomar en cuenta la litología tanto local como regional, la estratigrafía y la influencia de la estructura geológica entre otras variables, no tan sólo para escoger el trazo sino también los métodos de excavación y soporte. Sobre esto han escrito investigadores como Krynine y Judd (1957), Legget (1962) y Wahlstrom (1973); todos abordan la relación e importancia que la ingeniería geológica tiene para la planeación y construcción de un túnel.

La literatura sobre túneles contiene referencias de diferentes ambientes geológicos, donde las características de este tipo varían para cada caso. Uno de los primeros problemas geotécnicos manifestados es la presencia de agua subterránea. Algunas de las más desastrosas experiencias han resultado de interceptar flujos de agua subterránea en sitios muy fracturados, localizados dentro de la zona saturada. Por esto, los constructores de túneles deben saber que para planificar la construcción de un túnel, es esencial poner atención en la identificación y naturaleza de las condiciones hidrogeológicas que se encontrarán.

Por lo anterior, siempre que en la construcción de un túnel se tiene la certeza o se piensa que pueden estar presentes flujos de agua subterránea, se

hace necesario realizar un estudio geohidrológico detallado, a fin de determinar factores importantes como la profundidad a la que se encontrarán los niveles de saturación, las direcciones y trayectorias que sigue el flujo subterráneo, la identificación y localización de las zonas de recarga y descarga, la variación de los caudales con respecto al tiempo y la permeabilidad del medio, entre otros. La definición de estos factores permitirá conocer la cantidad de agua que podrá introducirse al túnel, su variación en el tiempo, así como la probable presencia de cargas hidráulicas que puedan poner en peligro la estabilidad de la obra, para lo cual en ocasiones será necesario vigilar los niveles de agua en pozos previamente seleccionados, o bien, construir pozos piezométricos que permitan conocer los niveles mencionados.

En general, cuando se encuentran zonas saturadas con agua subterránea, se deben establecer sistemas de drenaje; aunque el túnel constituye el dren más importante. A continuación se analizará el papel que un túnel juega en un sistema hidrogeológico regional.

En el más simple de los casos, un túnel actúa como un dren del agua subterránea. Considerando para fines ilustrativos un túnel infinitamente largo, en un medio poroso, homogéneo e isótropo, si la presión a la que está sometido es igual a la atmosférica y el nivel piezométrico mantiene una



elevación constante, se puede construir una red de flujo como la mostrada en la ilustración 1. Si la permeabilidad del medio es conocida, el caudal que llegará al túnel puede ser calculado mediante un análisis cuantitativo de la red de flujo.

Como se mencionó, para conocer la cantidad de agua que fluye de un acuífero hacia un túnel, se pueden utilizar redes de flujo. El método está basado en la definición y construcción en dos planos, de una red compuesta por líneas de flujo y curvas equipotenciales, las cuales deben necesariamente ser perpendiculares y, por tanto, dar lugar a polígonos ortogonales. En el análisis cuantitativo se establecen lados de dimensiones regulares, a fin de que la separación entre las líneas de flujo y el espaciamiento entre las curvas equipotenciales sea igual, y de esta forma simplificar al máximo la ecuación de flujo de Darcy, de la siguiente manera (véase ilustración 2):

$$Q = K A i$$

si:  $A = b \cdot a$

$$b = 1 \text{ (unitario); } i = \frac{dh}{dL} \text{ y}$$

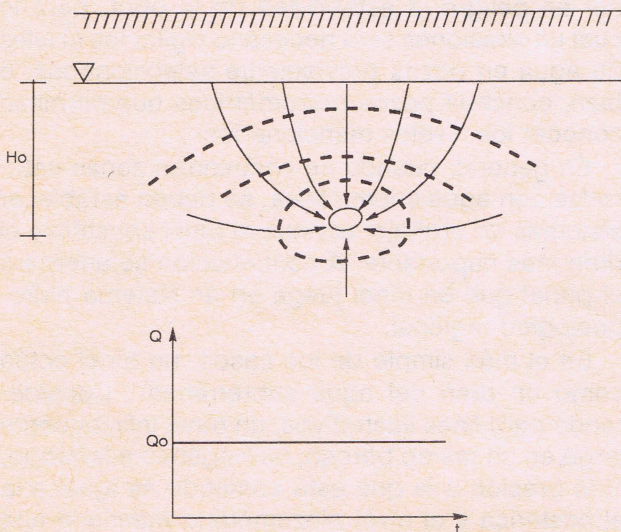
$$dL = a$$

entonces:

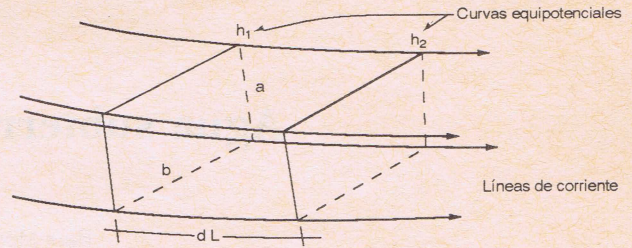
$$Q = K b a \frac{dh}{dL}$$

$Q = K dh$  Gasto en un tubo de flujo considerando el ancho con dimensión igual a 1 ( $b = 1$ )

**1. Red de flujo en sección generada en el entorno de un túnel**



**2. Esquema de un tubo de flujo**



Así se simplifica considerablemente el cálculo del gasto  $Q$  que fluye hacia el túnel, ya que sólo es necesario conocer la permeabilidad del medio y la variación de la presión (representada por  $dh$ ) entre dos curvas equipotenciales, como se muestra en la ilustración 3, que ejemplifica cómo conocer el gasto  $Q$  que fluye por un cuerpo totalmente saturado, de dimensiones conocidas y de permeabilidad igual a 10 m/día. Suponiendo un trazo adecuado de la red de flujo entonces:

$$Q = K dh \quad \text{si } K = 10 \text{ m/día}$$

$$dh = 1 \text{ m}$$

el flujo en el tubo 1 sería  $q_1 = 10 \frac{\text{m}^2}{\text{día}} \cdot 1 \text{ m} = 10 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$  por unidad de ancho (por metro de ancho).

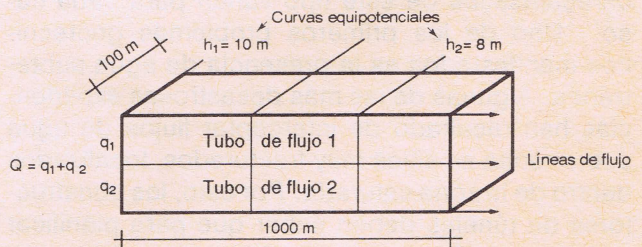
Para conocer el caudal total que fluye por todo el material, será necesario multiplicar por el número de tubos de flujo y por el ancho. De esta forma:

$$Q_T = 10 \frac{\text{m}^2}{\text{día}} \cdot 2 \text{ tubos} \cdot 100 \text{ m}$$

$$Q_T = 2000 \text{ m}^3/\text{día}$$

Nota: Por la ley de la conservación de la masa y para régimen estacionario, se cumple que para un medio homogéneo e isotrópico, el caudal que pasa de una celda del tubo de flujo a otra, es el mismo.

**3. Determinación del caudal que fluye por dos tubos de flujo**

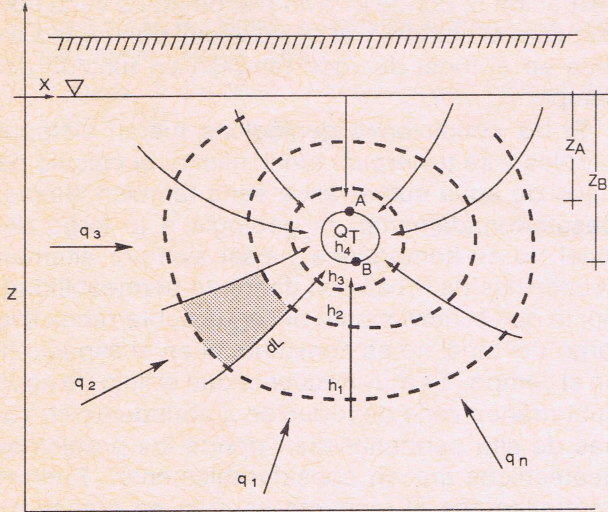


Este mismo desarrollo se sigue para cualquier red de flujo, incluyendo la que se puede construir alrededor de un túnel (véase ilustración 4).

También a partir de estas redes de flujo pueden determinarse las presiones a las que está o estará



4. Red de flujo en sección para evaluar caudales y presiones



$$Q_T = q [N^{\circ} \text{ de tubos de flujo}] \left[ \begin{array}{l} \text{Ancho o profundidad} \\ \text{(longitud de túnel)} \end{array} \right]$$

sometida la obra, ya que se conoce la distribución de la energía potencial relativa en la red de flujo.

El cálculo está basado en la representación de la presión en función de la altura de agua.

$$h = \frac{P}{\gamma} + Z$$

donde

- $Z$  = es el nivel de referencia;
- $h$  = el valor en metros de la energía en un punto, el cual se puede obtener a partir de la red de flujo y
- $\gamma$  = el peso específico del agua.

De esta manera:

$$P = \gamma(h - Z)$$

Si a partir de la ilustración 4 se quisiera conocer el valor de la presión en los puntos A y B, el tratamiento sería el siguiente:

$$P_A = \gamma(h_A - Z)$$

$$h_A = h_4$$

$$Z = -Z_A$$

$$P_A = \gamma(h_4 + Z_A)$$

$$P_B = \gamma(h_4 + Z_B)$$

Todo lo antes expuesto es válido para el caso más simple, el de un acuífero libre, donde no es del todo real que el flujo tridimensional tenga un eje horizontal, por lo que en principio no sería válido dibujar una red de flujo en planta. No obstante, si se admite que son aceptables las aproximaciones de Dupuit-Forchheimer, es decir, que para inclinaciones de la superficie piezométrica muy pequeñas, las líneas de corriente pueden tomarse como horizontales y, por tanto, las líneas equipotenciales como verticales, así es posible llegar a una ecuación bidimensional (Ecuación de Forchheimer):

$$\frac{\partial^2 H^2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 H^2}{\partial Y^2} = 0$$

donde  $H$  es el espesor del acuífero.

Para esta ecuación tampoco puede establecerse una red de flujo válida y rigurosa en las condiciones definidas. Sin embargo, cuando  $H$  varía relativamente poco en el dominio del problema, (variación del espesor saturado no superior a un 5 a 10%) basta con que se cumpla aproximadamente que

$$\frac{\partial^2 H^2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 H^2}{\partial Y^2} = 0$$

y entonces tiene sentido la red de flujo, ya que:

$$\frac{\partial^2 H^2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 H^2}{\partial Y^2} = 2 \left[ \left( \frac{\partial H}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial H}{\partial Y} \right)^2 + H \frac{\partial^2 H}{\partial X^2} + H \frac{\partial^2 H}{\partial Y^2} \right]$$

basta con que  $\left(\frac{\partial H}{\partial X}\right)^2$  y  $\left(\frac{\partial H}{\partial Y}\right)^2$  sean despreciables.

Otro análisis teórico para este problema fue presentado por Goodman y otros investigadores en 1965. Su planteamiento establece que para un túnel de radio  $r$ , que actúa como dren de una red de flujo similar al de la ilustración 1, en un medio homogéneo e isotrópico, con una conductividad hidráulica  $K$ , el valor del flujo del agua subterránea  $Q_0$  por unidad de área en el túnel, está dado por:

$$Q_0 = \frac{2\pi K H_0}{2.3 \log(2H_0/r)}$$

Su análisis para régimen transitorio presenta valores acumulativos del flujo, en donde el gasto



$Q$  por unidad de área está en función del tiempo. En este caso su representación es:

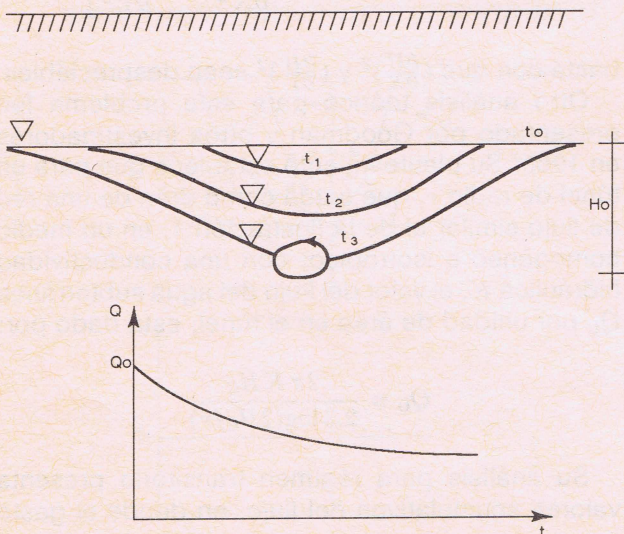
$$Q(t) = \left(\frac{8c}{3} K H_0^3 S_y t\right)^{1/2}$$

donde  $K$  es la conductividad hidráulica del medio,  $S_y$  es el coeficiente de almacenamiento específico y  $C$ , una constante arbitraria. El desarrollo de esta ecuación se basa en varias condiciones: se asume que la superficie piezométrica tiene forma parabólica y que el flujo es horizontal, según las consideraciones de Dupuit–Forchheimer; además, la ecuación sólo es válida cuando el nivel piezométrico está por encima del techo del túnel, esto es, por encima del tiempo  $t_3$  de la ilustración 5.

En la base de la teoría de Dupuit–Forchheimer, la constante  $C$  de la ecuación puede considerarse como 0.5, pero Goodman y otros, a partir de modelos de laboratorio, proponen un valor de 0.75. La ecuación anterior se puede utilizar tomando en cuenta que los valores de  $Q$  representan órdenes de magnitud y no son definitivos ni exactos.

Por otra parte, si las formaciones geológicas son heterogéneas y anisotrópicas, el análisis del flujo es más complicado, desde el dibujo de la red de flujo, hasta el cálculo de la permeabilidad para cada formación. En este caso, la red de flujo es válida a lo largo del túnel, siempre y cuando éste se encuentre por debajo de la superficie piezométrica. En formaciones rocosas con baja permeabilidad y bajo coeficiente de almacenamiento, dicha red no se mantiene por mucho tiempo cuando está presente el túnel; en este caso es más

#### 5. Variación del nivel piezométrico con respecto al tiempo



común el flujo en régimen transitorio, como el de la ilustración 5, donde el nivel piezométrico varía con respecto al tiempo, y el gasto inicial por unidad de área en el túnel decrece también en función del tiempo.

Si las condiciones geológicas fueran siempre simples y se tuviera un túnel infinito, el cálculo de flujos de agua subterránea sería también simple. Desafortunadamente, la geología a lo largo del túnel no es homogénea y casi siempre alternan secuencias de rocas con diferente permeabilidad, por lo que el movimiento del agua subterránea a lo largo del túnel no es constante ni en el espacio ni en el tiempo. Es muy frecuente que el flujo de agua subterránea varíe de reducido a abundante en zonas de alta permeabilidad, donde los problemas geotécnicos crecen considerablemente. Fuertes contratiempos al respecto ocurren en arenas no consolidadas, depósitos de grava y estratos permeables de arenisca o caliza, así como en zonas fracturadas y con cavidades provocadas por disolución.

Estos medios hidrogeológicos complejos, que no pueden ser representados fácilmente por medio de figuras, han sido atacados mediante modelos matemáticos, como el preparado por Goodman en 1965 para el régimen transitorio, o el que Wittke en 1972 utilizó para un túnel construido en zonas fracturadas. El uso de estos modelos debe llevarse a cabo cuando se tiene un completo conocimiento de la geología y del funcionamiento hidrogeológico de la región.

En resumen, en la construcción de túneles se debe tener cuidado cuando están presentes dos tipos de flujos de agua subterránea: 1) flujo regional a lo largo del trazo del túnel y 2) flujo catastrófico en aquellos sitios dentro del túnel donde la roca tenga mayor permeabilidad. Normalmente, el primer tipo se puede analizar mediante redes de flujo; en este caso el gasto que circula es relativamente pequeño y varía poco con respecto al tiempo; en general, es posible restarle problemas construyendo sistemas de drenaje.

Los flujos del segundo tipo son muy difíciles de predecir; pueden ser muy grandes pero decrecen con rapidez con respecto al tiempo. En este caso se dificulta construir sistemas de drenaje económicos, y son especialmente peligrosos si el túnel se construye paralelo a la ladera de la montaña y con estructuras geológicas que permitan o favorezcan deslizamientos. Se han encontrado gastos de hasta 1 000 litros por segundo en varias construcciones de túneles con estas características (Goodman *et al.*, 1965).



**Bibliografía**

- E. Custodio, M. R. Llamas. *Hidrología subterránea*, Editorial Omega, España, 1983.
- S. N. Davis, R. De Wiest. *Hidrogeología*, Editorial Ariel, España, 1971.
- N. Lener, A. S. Issar, I. Simmers. "Groundwater Recharge", *International Contributions to Hydrogeology*, HEISE, 1990.
- N. N. Pashkov, F. M. Dolgachev. *Hidráulica y máquinas hidráulicas*, Editorial MIR, Moscú, 1985.