

# Técnicas hidrogeológicas para el estudio de vertederos de residuos.

## III. Ensayos de permeabilidad

ANTONIO PLATA BEDMAR (\*)

**RESUMEN** La investigación de vertederos de residuos en general exige un conocimiento detallado y exhaustivo de las características hidrogeológicas, tanto de la formación donde se encuentra enclavado el propio vertedero, como de las formaciones que constituyen su entorno más inmediato. Esto sólo puede obtenerse mediante la aplicación de técnicas directas basadas en la medida de los trazadores naturales del agua y en la realización de ensayos diversos en sondeos basadas en el uso de trazadores artificiales, inyección de agua o técnicas de bombeo. Los trazadores naturales (isótopos estables del agua, tritio y componentes químicos) permiten el estudio de las relaciones existentes entre las diferentes familias de agua existentes en la zona del estudio. Los ensayos en sondeos permiten establecer de forma precisa los esquemas de los flujos subterráneos de las formaciones involucradas, así como la determinación de perfiles de permeabilidad. El trabajo incluye también una revisión resumida de las técnicas utilizadas para medir la permeabilidad en capas superficiales.

### HYDROGEOLOGICAL TECHNIQUES FOR SANITARY LANDFILLS INVESTIGATION

**ABSTRACT** *The investigation of sanitary landfills in general requires a detailed and exhaustive knowledge of the hydrogeological characteristics of the formation where the landfill is located, as well as of the surrounded formations. This knowledge only can be gained using direct techniques based on in the measurement of natural tracers of water as well as on the application of diverse borehole tests with artificial tracers, water injection or pumping tests. Natural tracers (stable isotopes, tritium and chemical components) allow the study of relationships between the different water families existing in the study area. Borehole tests allow the determination of groundwater flow patterns in the involved formations as well as the determination of permeability profiles. The paper includes also a summary of the techniques used for the measurement of the permeability of surface clay layers.*

**Palabras clave:** Vertederos, Deuterio, Oxígeno-18, Tritio, Carbono-14, Hidroquímica, Ensayos de Gilg-Gavard, Permeabilidad, Flujos en sondeos.

### 1. INTRODUCCIÓN

El presente artículo es la continuación y punto final de los dos artículos de esta revista publicados en los números 139 y 141 de esta misma revista sobre el mismo tema del presente. En el presente artículo se describen diversas técnicas para la medida directa de la permeabilidad de las formaciones en la zona del vertedero. Como se sabe, los ensayos de permeabilidad son las pruebas hidrogeológicas más habituales en la investigación geotécnica. Muchas de estas técnicas se realizan en sondeos, generalmente, de poca profundidad, bien durante su perforación o bien una vez terminados. Debido a tratarse de técnicas puntuales, a las heterogeneidades frecuentes del terreno ensayado, a los errores inherentes a la propia metodología utilizada y al carácter aproximado de la mayoría de las ecuaciones utilizadas para el cálculo,

los ensayos sólo proporcionan valores aproximados. En estudios de vertederos, se consideran impermeables las formaciones o tapices con una permeabilidad inferior a  $10^{-7}$  m/s. Los ensayos de campo que se describen en este artículo no todos ellos permiten medir con una fiabilidad apropiada permeabilidades por debajo de este valor. Esto hace que, muchas veces, deba recurrirse a técnicas de laboratorio basadas en el empleo de permeámetros o, en el caso de tapices arcillosos, a la conocida célula triaxial. No obstante, el empleo de técnicas diversas repetidas en diversos puntos (o sondeos) de la zona del estudio puede conducir a valores medios de la permeabilidad que puedan considerarse representativos de las formaciones involucradas.

Los ensayos para la medida de flujos en sondeos descritos en la parte II del estudio (Ingeniería Civil 141/2006), que se basan en el empleo de trazadores, proporcionan una indicación cualitativa o semicuantitativa de la permeabilidad de los estratos interceptados. En esta parte, se describen algunas técnicas basadas en la inyección de agua con o sin trazadores, que se aplican generalmente para materiales granulares. Básicamente, se trata de pruebas conocidas como ensayos de Gilg-Gavard o variantes de estos. Los en-

(\*) Licenciado en Ciencias Químicas, funcionario jubilado del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y del Organismo Internacional de Energía Atómica (Viena, Austria).

sayos del tipo Lugeon, que se utilizan en el caso de rocas consolidadas, no se precisan por lo general en estudios de vertederos. Una información más amplia sobre algunas de estas técnicas puede encontrarse en Custodio y Llamas 1976, Castany 1971, Cambefort 1962, Daniel 1989 y Taylor et al. 1990.

## 2. ENSAYO DE GILG-GAVARD DE NIVEL CONSTANTE

### 2.1. MÉTODO TRADICIONAL

En este método, se inyecta en el sondeo un caudal de agua regulado de forma que se mantenga en el interior del mismo un nivel constante (inyección a caudal constante). Preferentemente, este nivel debe ser la propia boca del sondeo, es decir, se mantiene el sondeo lleno de agua y el exceso de caudal se deja discurrir por la superficie del terreno. El sondeo debe encontrarse sin revestimiento alguno o revestido con una tubería con una permeabilidad que sea cinco o diez veces mayor que la del propio terreno. En estas condiciones, si llamamos  $k$  a la permeabilidad de la formación en un tramo del sondeo de longitud  $L$  y de diámetro  $D$  (cámara de infiltración),  $H$  a la carga hidráulica medida desde el nivel piezométrico en el caso de tratarse de la zona saturada o desde la cota media del tramo investigado si se trata de la zona no saturada y  $q$  al caudal de agua que se infiltra a través de dicho tramo, la permeabilidad se calcula a través de una ecuación del tipo siguiente:

$$k = \frac{q}{AH} \quad (1)$$

donde  $A$  es un parámetro que tiene las dimensiones de una longitud y que relaciona entre sí a los valores de  $L$  y  $D$  de forma que el valor obtenido para la permeabilidad medida sobre el terreno coincida con el valor obtenido en el laboratorio utilizando un permeámetro. Esta ecuación deriva de la conocida ecuación de Darcy. El término  $AH$  representa, aproximadamente, el producto de la sección del terreno normal al flujo inducido por la inyección del agua por la carga hidráulica.

Según Vidal 1962, el parámetro  $A$  puede calcularse por medio de la expresión empírica siguiente:

$$A = a(1,032L + 30D) \quad (2)$$

donde:

$$a = 1, \text{ si se cumple } L > 6 \text{ metros y}$$

$$a = 0,481 + 0,178L - 0,014L^2, \text{ si } L < 6 \text{ metros}$$

Daniel (1989) propone el uso de la siguiente ecuación para el caso de que la cámara de infiltración se encuentre definida por dos obturadores de forma que las líneas de flujo del agua que se infiltra en el terreno sean, perpendiculares al eje del mismo y que el ensayo se realice dentro de la zona saturada:

$$A = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{L}{D} + \sqrt{1 + (L/D)^2}\right)} - 2,8D \quad (3)$$

Por lo general, el método se utiliza durante los trabajos de perforación de los sondeos. Para ello, se suspende temporalmente la ejecución de estos trabajos y el agua se inyecta a través del varillaje no permeable hasta la cámara de infiltración situada en el fondo del sondeo. Esta cámara suele tener una longitud pequeña, que suele estar comprendida entre 1 y 5 metros. Las técnicas experimentales se encuentran

descritas con todo detalle en el "Earth Manual" (Manual de Tierras en la edición española) del "Bureau of the Reclamation", Ministerio del Interior de Estados Unidos (U.S. Department, 1980). Estas técnicas son bien conocidas por las firmas que se dedican a la perforación de sondeos para la investigación geotécnica, debido a la cual no se considera necesario profundizar en su estudio. No ocurre así con la técnica que se describe en el apartado siguiente, que ha sido desarrollada por el autor del presente artículo y que tiene la ventaja de poder ser aplicada en sondeos terminados siempre que se encuentren revestidos con tubería convenientemente ranurada.

### 2.2. MÉTODO BASADO EN LA MEDIDA DEL FLUJO VERTICAL DESCENDENTE

Se trata de un método que se basa en la medida de la variación del flujo vertical descendente inducido dentro del sondeo por la inyección del agua. La técnica se ilustra en la figura 3. La inyección del agua se realiza mediante una bomba apropiada que mantiene llena hasta la boca la tubería de revestimiento del sondeo o hasta el nivel que sea posible dependiendo del caudal disponible y de las pérdidas de agua del sondeo. El agua inyectada se distribuye por los diferentes estratos permeables atravesados por el sondeo de forma proporcional a sus transmisibilidades respectivas.

El flujo vertical descendente se ha medido por la técnica que se ilustra en la figura 1 utilizando como trazador una solución saturada de sal común y efectuándose su medida por medio de un conductímetro. En el interior del sondeo, se introduce una línea formada por una manguera de plástico de un diámetro interno de unos 10 a 12 mm, a la cual se fija el cable de la sonda del conductímetro utilizando una cinta autoadhesiva. El extremo inferior de la manguera se sitúa a una distancia conocida de la sonda, por ejemplo a 2

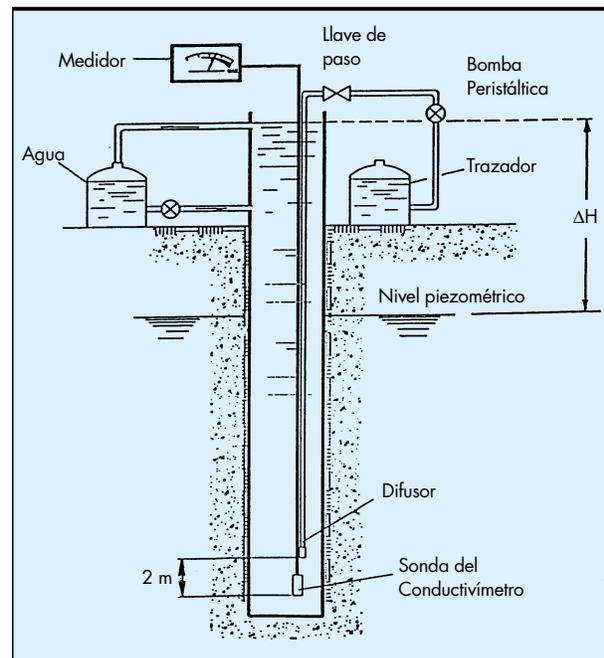


FIGURA 1. Representación esquemática de la variante del método de Gilg-Gavard para la medida de la permeabilidad a partir de la velocidad del flujo vertical descendente inducido por la inyección de agua en un sondeo con nivel constante.

metros. La manguera se llena primero de solución saturada de sal común por medio de una pequeña bomba peristáltica. Para efectuar una medida del flujo vertical, se inyecta un impulso de trazador de una duración muy corta, por ejemplo 5 segundos. Si existe dicho flujo vertical, el trazador llega al cabo de un cierto período de tiempo a la posición ocupada por la sonda, la cual detecta una curva de paso de forma de campana. El tiempo medio de llegada del trazador, junto con la distancia conocida entre los puntos de inyección y de medida, proporcionan la velocidad del flujo vertical. Para evitar o reducir las pérdidas de trazador por el extremo inferior de la manguera durante los períodos de reposo, se coloca en éste extremo un pequeño difusor provisto de varios orificios de salida de un diámetro reducido (por ejemplo, 1 mm) dispuestos en posición lateral para que el flujo del trazador se dirija hacia las paredes del sondeo y el impulso de salida no contribuya a acercarlo a la sonda.

La medida de la velocidad del flujo vertical se repite en diferentes puntos a lo largo de la columna de agua. Con los valores de velocidad así obtenidos y con la sección interior del sondeo, se calculan los caudales de agua que circulan por el interior del mismo en función de la profundidad. Lógicamente, cuando existe un estrato o tramo permeable, una determinada fracción del caudal de agua inyectado escapa a través del mismo. El valor absoluto de este caudal se obtiene por la diferencia entre los caudales que circulan en ambos extremos del tramo considerado, los cuales se obtienen, a su vez, por el producto de la velocidad del flujo por la sección interna del sondeo. El caudal así obtenido corresponde al valor de  $q$  en la ecuación (1). Por tanto, el método no requiere conocer el caudal de agua inyectado por la bomba dentro del sondeo para mantener dentro del mismo un nivel constante. Cuando el ensayo se realiza dentro de la zona saturada, la carga hidráulica  $\Delta H$  se obtiene por la diferencia de cota entre el nivel constante alcanzado por la inyección del agua (o por la boca del sondeo si éste se mantiene lleno de agua) y el nivel piezométrico inicial. Si se trata de la zona no saturada, se toma como referencia la cota media del tramo investigado.

Es importante indicar que el método descrito anteriormente para la medida del flujo vertical no proporciona la velocidad puntual en una cota determinada del sondeo, sino la velocidad media existente en el tramo de 2 metros que separa a los puntos de inyección y de medida. En tramos del sondeo donde la velocidad del flujo sea suficientemente ele-

vada para que sea posible el uso de medidores de flujo del tipo micromolinetes o de inducción magnética, estos equipos sí proporcionan la velocidad puntual y, posiblemente, con mayor precisión que la del método de trazadores.

Lógicamente, la velocidad del flujo vertical disminuye con la profundidad debido a las pérdidas de caudal producidas a lo largo de la columna de agua. En la mayoría de los casos, el flujo vertical desaparece a partir de una cierta profundidad, sobre todo cuando se trata de sondeos que penetran hasta el substrato impermeable. Con el objeto de que las sucesivas inyecciones de trazador no interfieran entre sí, el ensayo debe realizarse comenzando por el fondo del sondeo, es decir, de abajo hacia arriba.

Como se ha mencionado anteriormente, los ensayos de permeabilidad pueden efectuarse también dentro de la zona no saturada, es decir, en el tramo situado por encima del nivel piezométrico. Sin embargo, los valores de permeabilidad obtenidos para este tramo deben considerarse sólo como valores orientativos y, por lo general, tienden a ser erróneos por exceso. Ello se debe, en parte, a la dificultad para alcanzar un régimen de flujo estable y permanente: el agua escapa del sondeo dentro de esta zona con una tasa mayor que la que tendría la misma formación dentro de la zona saturada.

Cuando la velocidad del flujo vertical es muy lenta, como ocurre cuando las medidas se realizan en las proximidades del fondo del sondeo, el método puede requerir largos tiempos de medida para que el trazador pase por completo por la posición ocupada por la sonda del conductivímetro. En estos casos, hay que limitar el tiempo de espera en un valor que sea razonable, basado en el criterio de que la velocidad del flujo vertical máxima posible conduzca a una permeabilidad insignificante en comparación con la obtenida para otros tramos o estratos del sondeo. Hay que tener en cuenta que con velocidades del flujo vertical extremadamente bajas, puede interferir la velocidad de descenso del trazador derivada de la mayor densidad del agua marcada con la sal. Una vez que haya transcurrido un tiempo razonable sin que se produzca la llegada del trazador a la posición ocupada por la sonda, la posición exacta de la nube de trazador en la columna de agua puede determinarse elevando lentamente la sonda en tramos, por ejemplo de 10 cm.

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos en un sondeo de 40 metros de profundidad localizado en la zona del vertedero de Santovenia (Valladolid). Los materiales interceptados eran margas alteradas hasta una profundidad de 10 me-

Tramo	Tiempo (s)	v (m/s)	Tramo	$\Delta q$ (m/s)	H (m)	K (m/s)
2 a 4	22	9,09E-02	3 a 5	1,44E-04	4	7,20E-06
4 a 6	50	4,00E-02	5 a 7	2,47E-05	6	8,25E-07
6 a 8	64	3,13E-02	7 a 9	6,59E-05	7,8	1,69E-06
8 a 10	252	7,94E-03	9 a 11	8,58E-06	7,8	2,20E-07
10 a 12	408	4,90E-03	11 a 13	$\approx 0$	7,8	<1,00E-08
12 a 14	408	4,90E-03	13 a 15	$\approx 0$	7,8	<1,00E-08
14 a 16	408	4,90E-03	15 a 17	6,01E-06	7,8	1,54E-07
16 a 18	720	2,78E-03	17 a 19	7,85E-06	7,8	2,01E-07
18 a 20	>2100	<9,50E-4	>19	$\approx 0$	7,8	<1,00E-08

TABLA 1. Resultados obtenidos en el ensayo de Gilg-Gavard realizado en el sondeo 98-4 de la zona donde se encuentra el vertedero de Santovenia (Valladolid).

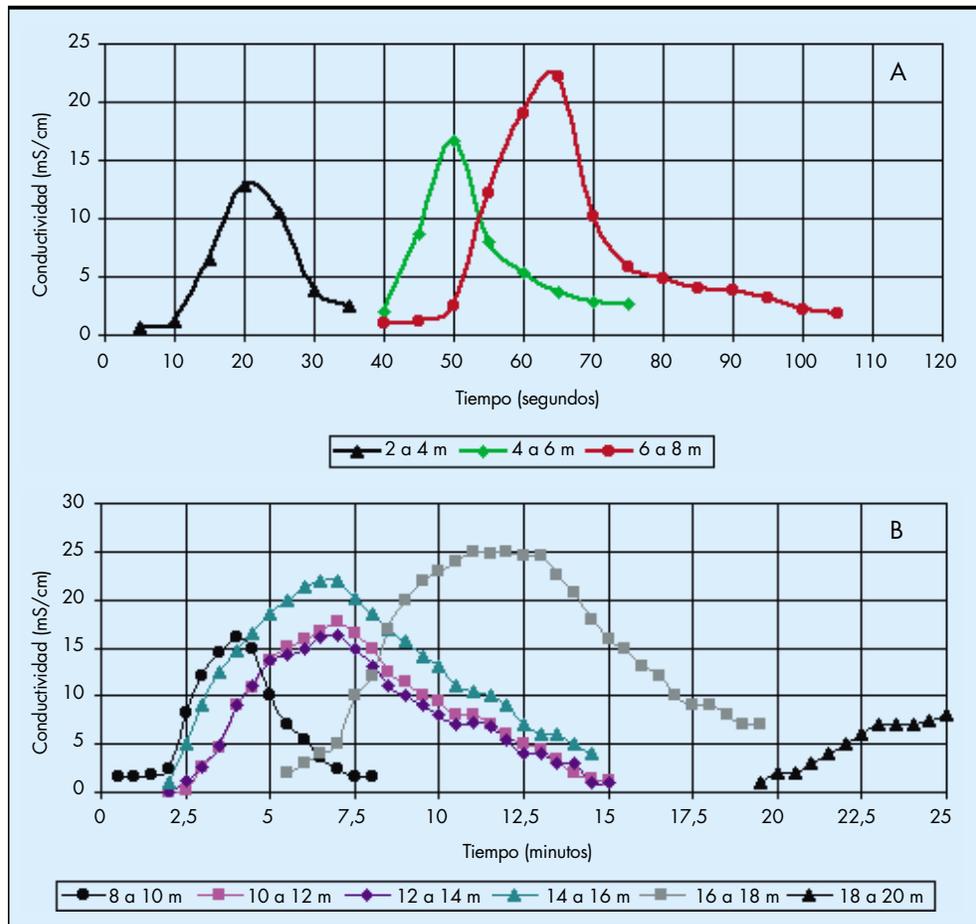
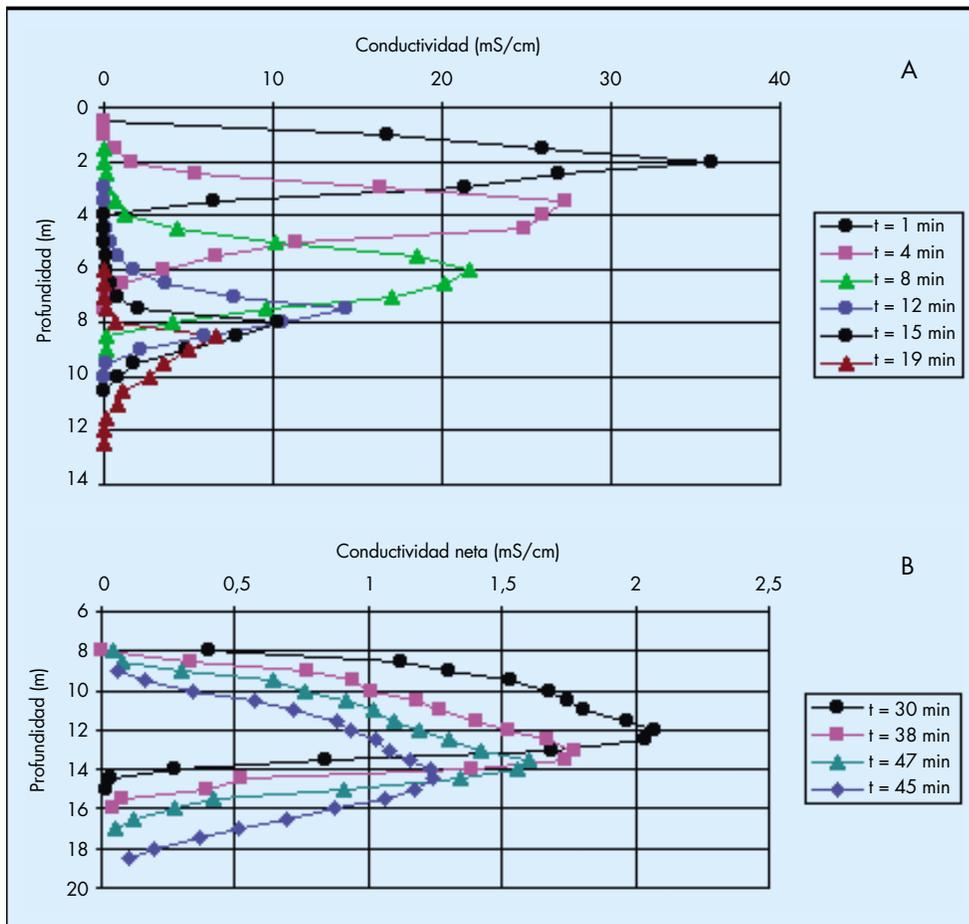


FIGURA 2. Curvas que reflejan el flujo vertical descendente a diferentes profundidades de un sondeo.

tros y margas no alteradas entre esta profundidad y el fondo del sondeo. Este fue perforado con un diámetro hasta 27,5 m y de 86 mm desde esta profundidad hasta el fondo. El revestimiento interno se realizó con tubería ranurada de elevada permeabilidad de 60 mm de diámetro. El ensayo se realizó manteniendo durante el mismo el sondeo lleno de agua hasta la boca. La distancia entre los puntos de inyección y la sonda del conductivímetro (longitud  $L$ ) fue de 2 metros. Para el parámetro  $D$  se ha utilizado el valor de 101 mm en lugar del diámetro de la tubería de revestimiento, debido a la alta permeabilidad de los materiales de relleno colocados entre dicha tubería y el terreno inalterado. Con estos datos, los valores calculados para el parámetro  $A$  de las ecuaciones (2) y (3) fueron, respectivamente, 3,79 y 6,25 metros. Para el cálculo de la permeabilidad, se ha utilizado el valor medio, es decir, 5 metros. La figura 2 muestra las curvas de paso del trazador (solución saturada de sal común) por la posición ocupada por la sonda del conductivímetro. Las velocidades del flujo vertical se han calculado dividiendo la distancia de 2 metros por los tiempos de la curva correspondiente al 50% de paso del trazador, los cuales se muestran en la columna 2 de la tabla 1. Se observa que, como era de esperar, estas velocidades (columna 3 de la tabla) fueron mucho más elevadas en la zona no saturada que en la zona saturada. Por debajo de 18 metros, la velocidad del flujo cae bruscamente hasta un valor próximo a cero, lo cual indica que entre esta profundidad y el fondo del sondeo se tienen materiales, prácticamente, impermeables. La columna 5 muestra las pérdidas de cau-

dal que se producen en los tramos definidos por los puntos medios de los tramos de la columna 1 (columna 4) derivados de las pérdidas de agua a través de las paredes del sondeo. Estos caudales corresponden al caudal  $q$  de la ecuación (1). La columna 6 muestra los gradientes hidráulicos. Para la zona no saturada, se ha tomado la distancia entre la boca del sondeo y la profundidad media del tramo de la columna 4. A partir del tramo comprendido entre 7 y 9 metros, se ha tomado la diferencia de cota entre la boca del sondeo y el nivel piezométrico (7,8 m). Por último, la columna 7 muestra las permeabilidades obtenidas por medio de la ecuación (1). Se observa que, como era de esperar, las permeabilidades son mayores en la zona no saturada que en la saturada. De hecho, la mayor parte del agua sale del sondeo dentro de esta zona no saturada. Por las razones expuestas anteriormente, los valores de permeabilidad obtenidos en esta zona son poco precisos. En el tramo comprendido entre 11 y 15 metros, la velocidad del flujo era nula, lo cual indica que se trata de un tramo con materiales, prácticamente, impermeables. El valor de la permeabilidad para este tramo se ha indicado como menor de  $10^{-8}$  m/s basándose en una estimación de la velocidad mínima medible con la técnica utilizada. Dentro de la zona saturada, se detectan dos tramos de mayor permeabilidad correspondientes a los tramos 9 a 11 m (zona de contacto entre las margas alteradas y no alteradas) y 15 y 19 metros.

Cuando la permeabilidad de los materiales interceptados por el sondeo es pequeña y, por tanto, también lo son los flujos verticales descendentes inducidos por la inyección del



**FIGURA 3.** Ensayo de Gilg-Gavard de nivel constante realizado en el sondeo 9B del emplazamiento de un vertedero de residuos en proyecto situado en Medina del Campo (Valladolid).

agua, el método ilustrado en la figura 1 puede substituirse por el método para la medida de este tipo de flujos descrito en el apartado 4 de la parte segunda del presente estudio (Ingeniería Civil 141/2006). En este método, se realiza una inyección puntual de trazador a una cierta profundidad, por ejemplo, en la misma boca del sondeo, si se quiere investigar la zona no saturada, o en un punto situado inmediatamente por debajo del nivel piezométrico si sólo interesa la zona saturada. A continuación, se sigue el descenso de la nube de trazador a lo largo de la columna de agua haciendo barridos sucesivos con la sonda del conductivímetro. Las posiciones sucesivas de la nube de trazador proporcionan la velocidad del flujo a diferentes profundidades y, con estos valores y con la sección interna del sondeo, se calculan los caudales en circulación y las pérdidas de caudal para cada uno de los tramos. Los cálculos de la permeabilidad se realizan como se ha indicado anteriormente.

Un ejemplo de aplicación del método indicado en el párrafo anterior se muestra en la figura 3. El ensayo fue realizado en un sondeo de unos 25 metros de profundidad situado en el emplazamiento previsto para un vertedero de residuos industriales en fase de proyecto en el término de Medina del Campo (Valladolid). Los materiales interceptados eran arenas y gravas permeables relacionadas con una terraza aluvial hasta una profundidad de unos 6 a 7 metros. Por debajo de esta profundidad, existían materiales detríticos terciarios de baja permeabilidad. El nivel piezométrico se encontraba en la zona a unos 80 metros de profundidad, debido a lo cual el ensayo fue realizado completamente den-

tro de la zona no saturada. El proyecto contemplaba la excavación del vaso del vertedero retirando la capa superior permeable indicada. El sondeo se cementó hasta una profundidad de unos 6 metros con el objeto de aislar esta capa permeable. El sondeo se mantuvo lleno de agua durante todo el ensayo. El trazador (solución saturada de sal común) se inyectó en la boca del sondeo y se determinó el descenso de la nube de trazador. Los resultados de la figura 3A indican que, a pesar de haber cementado la capa superior, la mayor parte del agua escapaba del sondeo por la base del tramo cementado a unos 8 metros de profundidad. Evidentemente, el tramo cementado se quedó demasiado corto. Una pequeña fracción de la sal penetró a una profundidad mayor de 8 metros y la nube residual formada descendió en la columna como muestra la figura 3B. La velocidad del flujo vertical en este tramo proporcionó una permeabilidad de los materiales terciarios comprendida entre  $4 \times 10^{-8}$  y  $7 \times 10^{-9}$  m/s.

Es interesante resaltar que el ensayo descrito anteriormente fue repetido en dos ocasiones distintas. En la primera de ellas, el ensayo de marcado del agua se inició inmediatamente después de que se hubiera llenado de agua el sondeo, esperando sólo algunos minutos para estabilización del flujo. En el segundo caso, que corresponde a los resultados mostrados en la figura 3, el sondeo se mantuvo lleno de agua durante un período previo de unas 7 horas, con el objeto de que el terreno que rodeaba al sondeo se saturara de agua y los flujos que escapaban del mismo alcanzaran valores de equilibrio. Debe indicarse que las velocidades del flujo vertical y, por tanto, los valores de

permeabilidad obtenidos fueron considerablemente más elevados en el primer caso. Ello deriva de los volúmenes invertidos en el llenado de huecos de la roca, así como del efecto del potencial de succión de los materiales de la zona no saturada. Se recomienda, por tanto, que antes de iniciar este tipo de ensayos dentro de la zona no saturada, se proceda a efectuar un proceso de saturación del terreno durante el mayor tiempo que sea posible.

### 3. ENSAYO DE GILG-GAVARD DE NIVEL VARIABLE

En este método, se inyecta agua a través de una tubería de inyección conectada a la cámara de infiltración hasta conseguir llenarlo del todo o hasta que se alcance un determinado nivel si lo anterior no es posible. En un momento determinado (tiempo inicial), se corta la inyección de agua y se hace un seguimiento del descenso de nivel dentro de la tubería. La permeabilidad se obtiene a partir de la ley que relaciona el descenso de nivel en función del tiempo haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\pi(d^2/4) \cdot \Delta H}{A \cdot H_m \cdot \Delta t} \quad (4)$$

siendo:

$k$  = permeabilidad en cm/s.

$d$  = diámetro del sondeo en centímetros o, más exactamente, diámetro de la tubería a través de la cual se inyecta el agua en la cámara de infiltración y dentro del cual se mide el nivel.

$\Delta H$  = descenso de nivel (centímetros) producido en el intervalo de tiempo  $\Delta t$  (segundos).

$A$  = como en la ecuación (2).

$H_m$  = altura media del nivel del agua (cm) existente durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , dado por la diferencia de altura entre el valor medio del tramo  $\Delta H$  y el nivel freático o piezométrico.

Si el ensayo se realiza en la zona no saturada, la altura  $H_m$  se mide hasta el centro de la cámara de infiltración. Sin embargo, hay que decir que la permeabilidad obtenida en estas condiciones es errónea por exceso debido a la influencia de la succión del terreno sobre la capacidad de infiltración del agua. El error cometido es más bajo si antes de la realización del ensayo se inyecta agua en el terreno durante un largo período de tiempo, por ejemplo, durante varias horas.

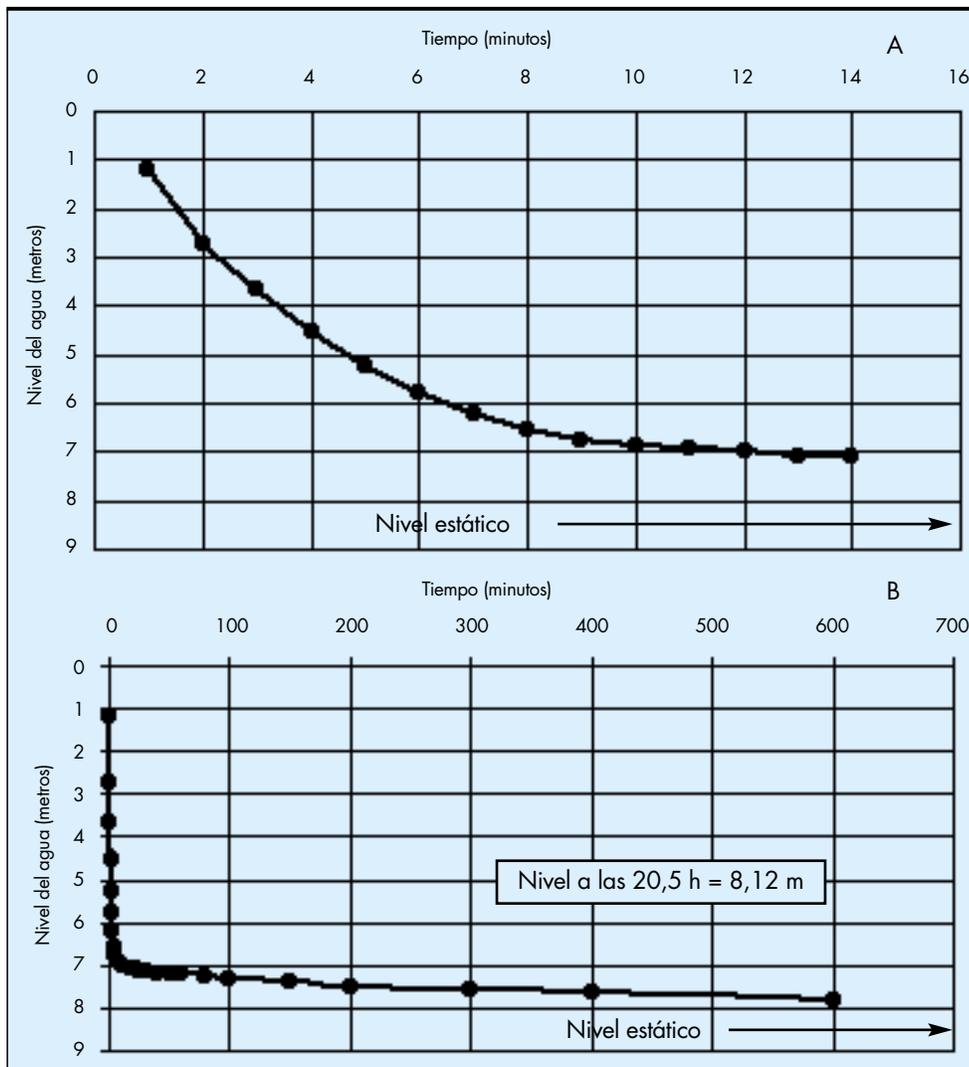


FIGURA 4. Ensayo de Gilg-Gavard de nivel variable realizado en el sondeo P4B de 18 metros de profundidad con columna de agua abierta (ausencia de obturadores).

El método exige, por una parte, que el tramo del sondeo donde se realice el ensayo se encuentre al descubierto o revestido con tubería ranurada que sea, como mínimo, 10 veces más permeable que el propio terreno y, por otra, que este tramo se encuentre aislado del resto del sondeo, por ejemplo, mediante el uso de dos obturadores (en inglés, "packers") que impidan la fuga de agua en ambos sentidos. Asimismo, el ensayo puede proporcionar resultados válidos si se trata de sondeos de escasa profundidad, por ejemplo, menor de 2 metros, en los que el tramo superior próximo a la superficie se encuentre cementado para evitar las pérdidas de agua en dirección ascendente. En ambos casos, si el ensayo se realiza dentro de la zona no saturada, los valores de permeabilidad obtenidos tienen mayor fiabilidad si antes de su realización se inyecta agua en el terreno durante un largo período de tiempo con el objeto de saturar los materiales que rodean al sondeo, tal como se ha mencionado en el apartado anterior.

Los ensayos que se realizan en sondeos profundos (por ejemplo, de más de 10 metros) con su columna completamente libre proporcionan una información cualitativa, que, sin embargo, puede ser de interés a efectos orientativos como ensayo preliminar. Una excepción puede ser cuando el sondeo intercepta sólo materiales de muy baja permeabilidad, de forma que los descensos de nivel sean extraordinariamente lentos. En estos casos, los descensos observados pueden proporcionar valores más o menos fiables de la permeabilidad media de la formación involucrada. La figura 4 muestra un ensayo realizado con columna libre en un sondeo de 18 metros de profundidad con nivel piezométrico situado a 8,3 metros. Se observa que el nivel desciende hasta 7 metros de profundidad en un tiempo de unos 12 minutos, pero se precisan más de 20 horas para alcanzar el nivel es-

tático inicial. Ello refleja la existencia de un nivel de elevada permeabilidad a una profundidad inmediatamente por encima de los 7 metros. Asimismo, el ensayo indica que la permeabilidad de los materiales de la zona saturada es relativamente baja. De no ser así, el nivel piezométrico inicial se habría restablecido en un tiempo mucho más corto, porque el exceso de agua existente por encima del nivel piezométrico inicial habría escapado del sondeo a través de los niveles de elevada permeabilidad de la zona saturada. Cuando esta zona tiene niveles muy permeables, el nivel del agua desciende hasta su valor inicial en tiempos muy cortos, por ejemplo, de pocos minutos o, incluso, segundos.

#### 4. ENSAYO BASADO EN LA INDUCCIÓN DE UN FLUJO VERTICAL ASCENDENTE MEDIANTE BOMBEO

Se trata de un método para la medida de perfiles de permeabilidad en valores absolutos o relativos que se basa en la inducción de un flujo vertical ascendente mediante la extracción de agua de la parte superior del sondeo utilizando una bomba apropiada. La variación de la velocidad de este flujo vertical a lo largo de la columna de agua proporciona información sobre la contribución de los diferentes estratos interceptados por el sondeo y, por tanto, sobre las transmisibilidades respectivas (Molz et al. 1994; Taylor et al. 1990). El flujo vertical se mide, preferentemente, utilizando un medidor de flujo del tipo de micromolinetes o de inducción magnética, si bien pueden utilizarse también las técnicas de trazadores descritas en el apartado 4 de la parte segunda del trabajo presente (Ingeniería Civil 141/2006).

Llamemos  $\Delta H$  al rebajamiento del nivel piezométrico producido por el bombeo,  $Q$  al caudal de este bombeo,  $T$  a la

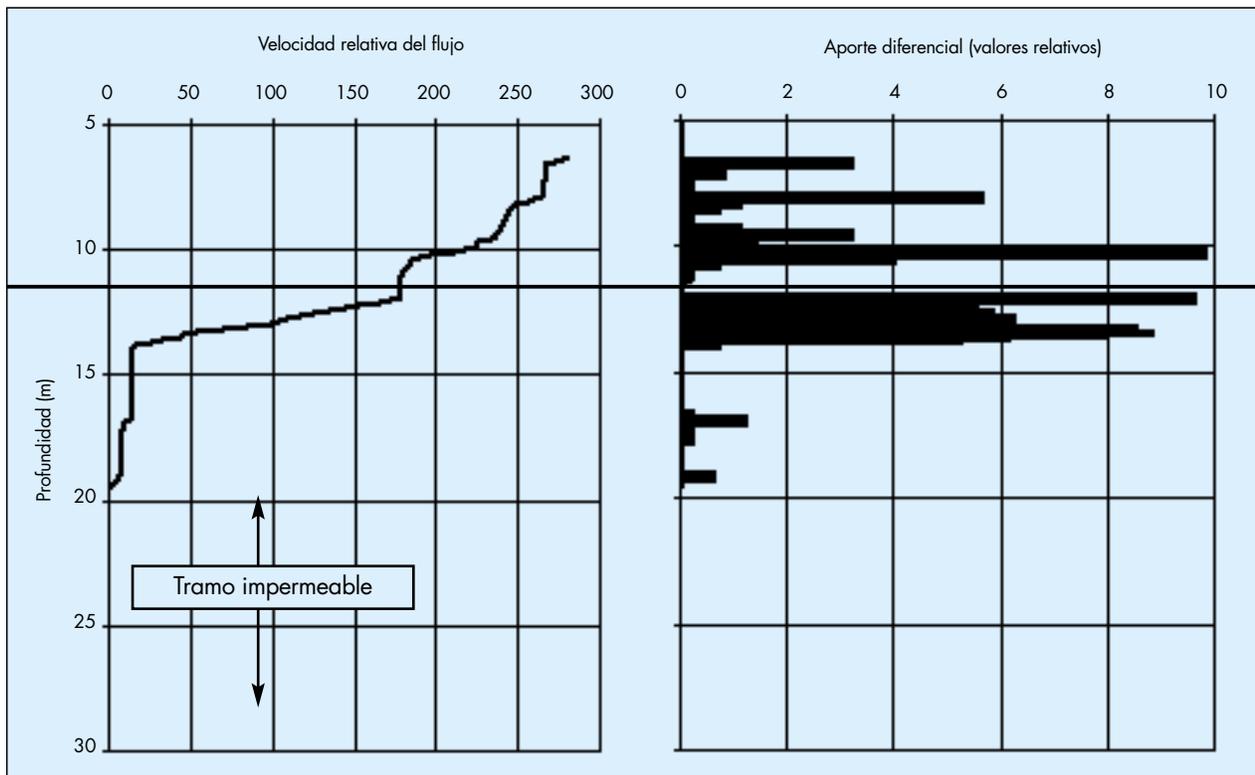


FIGURA 5. Ensayo de permeabilidad basado en la inducción de un flujo vertical ascendente mediante bombeo en un acuífero aluvial multicapa realizado por Rank (1989) en Austria.

transmisibilidad total de la formación interceptada,  $r$  al radio interno del pozo de bombeo y  $R$  al radio de influencia del bombeo. La ecuación de Thiem proporciona la siguiente relación entre estos parámetros:

$$\Delta H = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r}; \quad T = \frac{Q}{\Delta H} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad (5)$$

La relación  $R/r$  varía en la mayoría de los casos entre los valores  $10^2$  y  $10^4$ . Por tanto, la expresión  $(1/2\pi)\ln(R/r)$  varía entre los valores 0,73 y 1,46. De acuerdo con estos valores, la transmisibilidad puede calcularse de forma aproximada por medio de la expresión siguiente:

$$T = (1,1 \pm 0,4)Q / \Delta H \quad (6)$$

Cuando existen varios tramos o estratos permeables que aportan agua al bombeo, se cumple  $T = T_1 + T_2 + T_3 + \dots$  y  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$ , puesto que los caudales aportados por los diferentes estratos son proporcionales a sus transmisibilidades respectivas. Los valores de los caudales parciales aportados por los diferentes estratos se obtienen a partir de los cambios de la velocidad del flujo vertical inducido por el bombeo.

La figura 5 muestra los resultados de un ensayo realizado en Austria por Rank (1989) en un acuífero multicapa de origen aluvial. Se observa la existencia de ocho niveles diferentes que aportaban agua al bombeo. El más importante de ellos estaba localizado entre 12 y 14 metros de profundidad. Este estrato aportaba más del 50% del agua extraída del pozo. Este ensayo es inverso y complementario al descrito en el apartado 4 de la parte II de este trabajo mencionada anteriormente, el cual está basado en la inducción de un flujo vertical descendente por inyección de agua en el sondeo con medida posterior del perfil de velocidad de dicho flujo (figura 7 de la mencionada publicación).

### 5. MEDIDA DE LA PERMEABILIDAD DE TAPICES DE ARCILLA

El cumplimiento de las normas vigentes para el establecimiento de vertederos de residuos exige frecuentemente recubrir el vaso del vertedero (fondo y paredes laterales) de un tapiz arcilloso que tenga una permeabilidad muy baja. Concretamente, el Real Decreto 1481/2001 de 27 de Diciembre establece la necesidad de que exista una barrera geológica natural que tenga un espesor  $\geq 5$  metros y una permeabilidad  $\leq 10^{-9}$  m/s para el caso de residuos peligrosos. Para residuos no

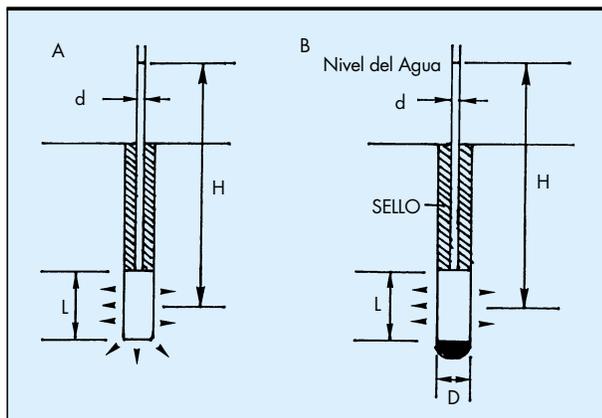


FIGURA 6. Esquema de un permeámetro tubular para capas superficiales incrustado en el terreno.

peligrosos, estas cifras se establecen en los valores  $\geq 1$  metro y  $\leq 10^{-9}$  m/s, respectivamente, mientras que, para los residuos inertes, las cifras son  $\geq 1$  metro y  $\leq 10^{-7}$  m/s. Si la barrera geológica natural no cumple estas condiciones, establece la norma que podrá complementarse con una barrera geológica artificial (tapiz de arcilla) de un espesor no inferior a 5 metros. Resulta obvio que, para cumplir estas condiciones, se precisa disponer de técnicas apropiadas para la medida de estos valores de permeabilidad en capas superficiales del terreno. Estas técnicas se describen a continuación de forma resumida.

La figura 6 muestra un esquema ilustrativo de una técnica relativamente simple basada en la construcción en el terreno de perforaciones de escasa profundidad provistas de un sello en su parte superior para evitar la fuga del agua hacia la superficie del terreno (Daniel, 1989). El agua se inyecta a través de un tubo de pequeño diámetro, bien manteniendo un nivel constante o utilizando la técnica de nivel variable. La permeabilidad se calcula por medio de las ecuaciones (2) y (3) en el primer caso y con la ecuación siguiente en el segundo.

$$k = \frac{\pi(d^2/4)}{A(t_2 - t_1)} \ln \left( \frac{H_1}{H_2} \right) \quad (7)$$

Las alturas  $H_1$  y  $H_2$  correspondiendo a las cotas del nivel del agua medidas, respectivamente, en los tiempos  $t_1$  y  $t_2$ .

La ecuación (3), que da el valor de  $A$ , vale para el caso ilustrado en la figura 6B, es decir, cuando se construye un cierre en la parte inferior del sondeo. Si se prescinde de este cierre (figura 6A), desaparece el término  $-2,8D$  de la ecuación. En ambos casos, se recomienda la inyección previa de agua durante un tiempo largo con el fin de saturar los materiales arcillosos que rodean la perforación y reducir el efecto del potencial de succión del terreno.

Otro método utilizado desde hace mucho tiempo es el método de Haefeli, también llamado método de la artesa. En este caso, se excava una zanja en el terreno de una forma troncopiramidal y de sección cuadrada. Esta artesa se llena de agua durante algún tiempo (algunas horas) para tratar de conseguir la máxima saturación posible del terreno en la zona del ensayo. La prueba en sí consiste en inundar total o parcialmente la artesa y anotar los descensos del nivel del agua en función del tiempo. Estos descensos se miden en una escala vertical que se coloca en el centro de la artesa. La permeabilidad del terreno se determina a partir de la velocidad de descenso de este nivel, una vez que se alcanza un valor sensiblemente constante, por medio de la ecuación siguiente:

$$k = \frac{q}{l^2} \frac{1}{27(H/l) + \Psi} \quad (8)$$

siendo  $q$  el caudal de infiltración,  $b$  la longitud de la base de la artesa (lado del cuadrado inferior),  $h$  la altura de la columna de agua al comienzo del ensayo y  $\Psi$  el potencial de succión, para el cual se toma un valor igual a 3.

Se comprueba que, para una artesa totalmente llena de agua con una sección cuadrada superior de 1,5x1,5 metros, una sección cuadrada inferior de 0,5x0,5 metros y una altura de 0,5 metros, la permeabilidad coincide de forma aproximada con la cuarta parte de la velocidad de descenso del nivel del agua. El método proporciona mejores resultados con suelos semipermeables con una permeabilidad comprendida entre  $10^{-6}$  y  $10^{-7}$  m/s. Para evitar las pérdidas de agua por evaporación, se recomienda recubrir el agua con una capa delgada de aceite de silicona o similar. Asimismo, se recomienda cubrir la artesa con un techo para evitar un eventual aporte de agua de lluvia.

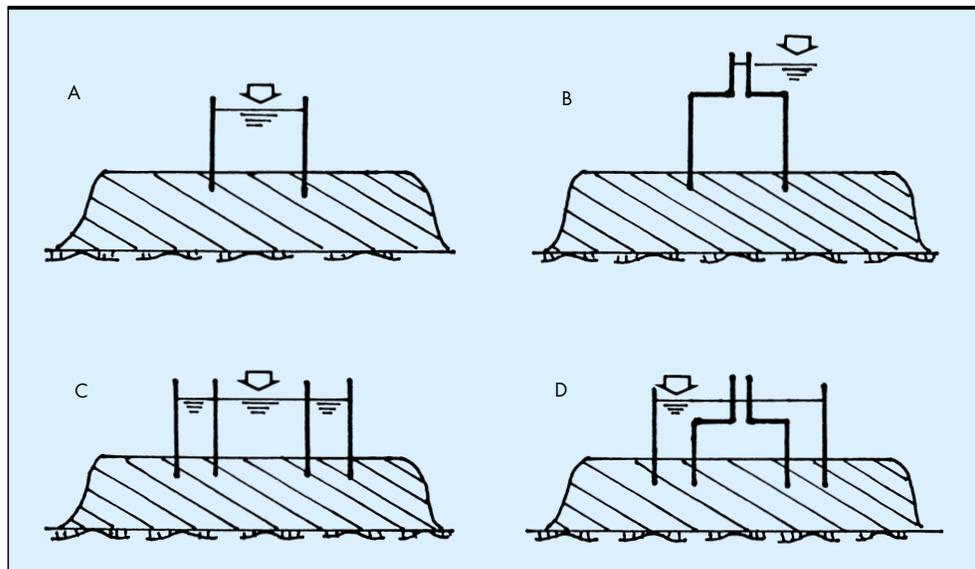


FIGURA 7. Tipos de permeámetros para la medida de la permeabilidad vertical de capas superficiales del terreno.

Teniendo en cuenta que los tapices de arcilla se construyen por compactación de tongadas delgadas de este material, la distribución en profundidad de la permeabilidad horizontal puede experimentar pequeñas variaciones. Por este motivo, tiene un valor mayor a efectos prácticos la determinación de la permeabilidad vertical media de toda la capa. Estas medidas requieren el uso de permeámetros. En líneas generales, los permeámetros conocidos corresponden a alguno de los cuatro esquemas mostrados en la figura 7 (Daniel, 1989). Todos ellos se basan en la medida de la tasa de infiltración del agua a través de la capa de arcilla para una determinada carga hidráulica.

El permeámetro más simple es el denominado como anillo simple abierto, que se ilustra en la figura 7A y que consiste en un simple cilindro incrustado en el terreno y sellado exteriormente con bentonita. La tasa de infiltración se mide determinando el volumen de agua  $V$  infiltrado en el terreno durante un tiempo  $t$ . La carga hidráulica  $H$  suele mantenerse constante utilizando un sistema de flotador o bien un recipiente o botella de Mariotte<sup>1</sup>, si bien se ha reportado que éste no funciona bien para tasas de infiltración inferiores a 100 ml/día. La tasa de infiltración (metros cúbicos por segundo) viene dada por la ecuación  $I = q/A$ , siendo  $q$  el caudal que se

infiltra ( $m^3/s$ ) y  $A$  la sección anular del cilindro ( $m^2$ ). La permeabilidad se calcula por medio de la ecuación siguiente:

$$k = \frac{I}{i} = \frac{I}{(H + L_f + \Psi_f) / L_f} \quad (9)$$

donde  $i$  es el gradiente hidráulico,  $L_f$  la profundidad del frente mojado y  $\Psi_f$  el potencial de succión en el frente mojado. El valor de  $L_f$  se determina, bien por medio de tensiómetros o bien a través de la medida de perfiles de humedad al final del ensayo. El valor de  $\Psi_f$  se estima en base a ensayos similares o se mide con tensiómetros colocados en el terreno. Si se toma un valor  $\Psi_f=0$ , se obtiene un valor de  $k$  erróneo por exceso, si bien este error suele ser, relativamente, pequeño. Obviamente, el flujo del agua inyectada es monodireccional hasta la base del cilindro incrustado en el terreno y se abre lateralmente cuando penetra por debajo de esta base.

Ventajas de este tipo de permeámetros son su bajo coste y la posibilidad de ser construidos con un diámetro grande con el objeto de obtener la permeabilidad media de un área considerable del terreno. La principal desventaja es la dificultad para la determinación de permeabilidades inferiores a  $10^{-8}$  o  $10^{-9}$  m/s, la cual deriva, a su vez, de la dificultad para medir pequeños caudales de infiltración y de la interferencia producida por la evaporación del agua. Esta última puede reducirse drásticamente añadiendo sobre el agua una capa muy delgada de aceite de silicona.

En el caso del permeámetro de anillo simple cerrado (figura 7B), la tasa de infiltración se mide a través del descenso del nivel del agua dentro de un tubo de pequeño diámetro adaptado a la parte superior del cilindro embutido en el terreno. Puede también utilizarse una botella de Mariotte para mantener un nivel constante dentro de este tubo. El efecto de la evaporación se hace despreciable con este permeámetro. Para poder medir permeabilidades muy bajas, se precisa que las fluctuaciones de la temperatura del agua sean pequeñas con el objeto de que no afecten demasiado a la densidad del agua y, por tanto, a la tasa de infiltración. Los cálculos de la permeabilidad se realizan por medio de la ecuación (9), tomando un valor  $\Psi_f=0$ . Obviamente, presenta el mismo inconveniente del permeámetro anterior derivado de la dispersión lateral del flujo de agua por debajo de la base del cilindro.

<sup>1</sup> El esquema de una botella de Mariotte se muestra en la figura 8. Básicamente, consiste en un recipiente cilíndrico provisto de dos válvulas; una situada en la parte superior que se usa para el llenado con agua hasta un cierto nivel y otra situada en la parte inferior que se conecta con el anillo del permeámetro. Dentro de este recipiente, existe un tubo delgado abierto por ambos extremos, cuya misión es mantener a la presión atmosférica el punto correspondiente a su extremo inferior que está sumergido en el agua. Otro tubo exterior graduado sirve para controlar el nivel del agua dentro del recipiente. El recipiente se acopla junto al cilindro del permeámetro de forma que el extremo inferior del tubo abierto coincida con el nivel del agua que se quiere mantener dentro de dicho cilindro. El recipiente se llena de agua dejando un volumen superior vacío, que sea, por ejemplo, una tercera parte del volumen total. Después de ello, se cierra la llave superior y la salida inferior se conecta al cilindro. Cuando se abre la llave inferior se comunica el recipiente con el cilindro y, dentro de éste se conserva el nivel correspondiente al extremo inferior del recipiente de Mariotte. A medida que se produce la infiltración del agua, los niveles de ambos bajan de forma paralela. El volumen del agua infiltrada se determina por medio del nivel que indica el tubo exterior graduado. Para aumentar la precisión de esta determinación, el recipiente se construye con diámetro pequeño a altura elevada, por ejemplo, entre 10 y 15 cm de diámetro y 50 a 100 cm de altura.

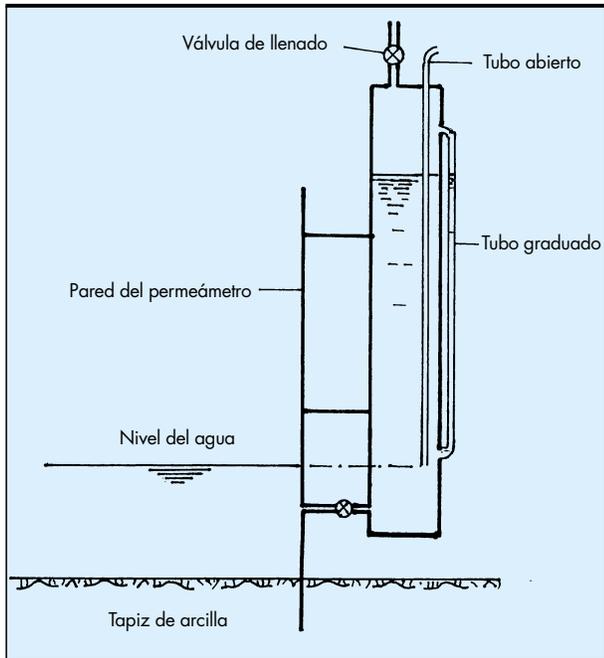


FIGURA 8. Esquema de un recipiente de Mariotte para mantener un nivel constante en el permeámetro.

Los permeámetros de doble anillo proporcionan mayor precisión debido a eliminar en su mayor parte los flujos laterales dentro del terreno por debajo del tramo incrustado en el mismo. En el caso del permeámetro de doble anillo abierto (figura 7C), se tienen las mismas limitaciones indicadas para el permeámetro de anillo simple abierto derivadas de la dificultad para la medida de pequeños caudales de infiltración. Esta dificultad no existe en el caso del permeámetro de doble anillo cerrado (figura 7D), el cual permite la medida de permeabilidades tan bajas como  $10^{-10}$  m/s. En ambos casos, es el anillo interior el que se utiliza para la determinación de la permeabilidad, mientras que el anillo exterior evita los flujos laterales. Para poder medir estos valores tan bajos de la permeabilidad, los ensayos tienen que prolongarse durante varios días o, incluso, semanas.

La figura 9 muestra el esquema de un permeámetro de doble anillo cerrado desarrollado por Daniel y Trautwein (1986). Los dos anillos se llenan de agua. El anillo interior se cierra

con una cubierta conectada a una especie de bolsa flexible, que se extrae periódicamente y se pesa para determinar el volumen de agua infiltrado durante un cierto período de tiempo. Esta bolsa se llena de nuevo con agua en caso de ser necesario. Los tensiómetros acoplados al sistema permiten determinar el frente mojado. Los cálculos se realizan por medio de la ecuación (9), tomando un valor  $\Psi_f=0$  o determinado a partir de las medidas proporcionadas por los tensiómetros.

## 6. REFERENCIAS

- CAMBEFORT, H. (1962). *Perforaciones y sondeos*. Ediciones Omega S.A., Barcelona.
- CASTANY, G. (1971). *Tratado práctico de las aguas subterráneas*. Ediciones Omega S.A., Barcelona.
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, R. (Eds.) (1983). *Hidrología Subterránea*, 2ª edición. Ediciones Omega, S.A, Barcelona. 2350 páginas.
- DANIEL, D.A. (1984). *Predicting the hydraulic conductivity of compacted clay liners*. J. Geotech. Engrg., ASCE, 110 (2), 285-300.
- DANIEL, D.E. (1989). *In situ hydraulic conductivity tests for compacted clay*. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 9.
- DANIEL, D.E.; TRAUTWEIN, S.J. (1986). *Field permeability tests for earthen liners*. Proc., In Situ 86. Blacksburg, Va. 146-160.
- HVORSJEV, M.J. (1949). *Time lag in the observation of groundwater levels and pressures*. U.S. Army Engineers Waterways Experiments Station, Vicksburg, Miss.
- MOLZ, F.J.; BOMAN, G.K.; YOUNG, S.C.; WALDROP, W.R. (1994). *Borehole flowmeters: field application and data analysis*. Journal of Hydrology, 163, pp. 347-371.
- RANK, D. (1991). *Flowmetermessung in Stallingerfeld*. Bundesversuchs- und Forschungs Anstalt Arsenal. Geotechnisches Institut, Vienna, personal communication.
- TAYLOR, K.; WHEATCRAFTS, S.W.; HESS, J.; HAYWORTH, J.S.; MOLZ, F.J. (1990). *Evaluation of methods for determining the vertical distribution of hydraulic conductivity*. Ground Water, 27, pp. 88-98.
- U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. BUREAU OF RECLAMATION. (1980). *Manual de Tierras*. Editorial Técnica Bellisco, 800 pág.
- VIDAL PARDAL, M. (1962). *Estudio acerca de la permeabilidad del terreno*. Boletín N° 15 de Informaciones y Estudios, anterior Servicio Geológico de Obras Públicas, Ministerio del Ambiente, 66 páginas.

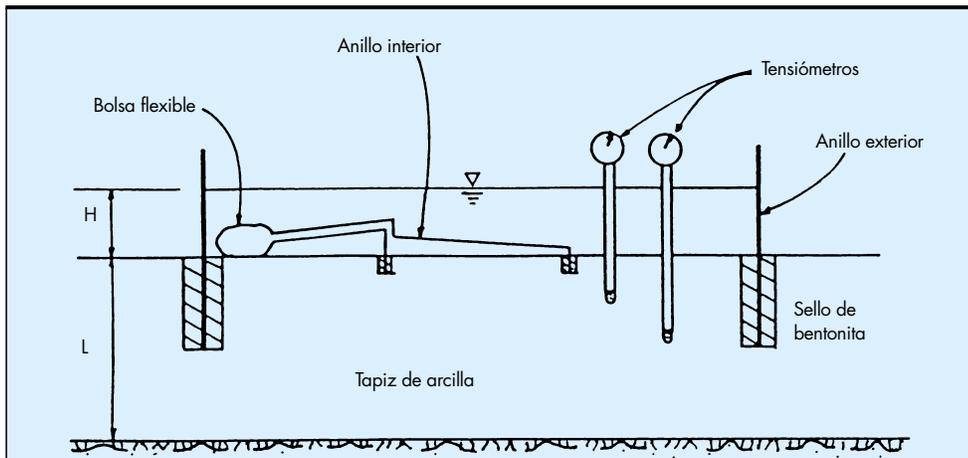


FIGURA 9. Esquema de un permeámetro de doble anillo cerrado descrito por Daniel y Trautwein (1986).