

Sifones de aspiración: un sistema para el paso transversal del freático en falsos túneles entre pantallas

Suction siphons: a system for transversal drainage of groundwater in diaphragm-wall tunnels

Eduardo Salvador Martínez. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
TYPESA Delegación de Andalucía Oriental. (España). esalvador@typsa.es
Manuel Barrios Martínez de Salinas. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
TYPSPA Delegación de Andalucía Oriental. (España). mbarrios@typsa.es

Resumen: En este artículo se describen las posibilidades que ofrece el sistema de sifón inverso para dar continuidad a los flujos de agua freática interceptados por un falso túnel entre pantallas. Este procedimiento se ha probado con éxito en uno de los túneles ya construidos del Metro de Málaga. El sistema consiste en el empleo de un sifón de aspiración para trasvasar el agua entre dos pozos de captación, situados uno a cada lado del túnel. El sistema funciona sin necesidad de bombeo, ya que la diferencia de nivel de agua entre los dos pozos proporciona la energía potencial necesaria para el movimiento del agua, según el principio de los vasos comunicantes. La utilización de este sistema es interesante, en tanto que no requiere los complicados procedimientos constructivos de otros sistemas, además de que se puede mantener, e incluso sustituir por completo, desde el exterior del túnel sin afectar por lo tanto a la explotación del túnel.

Palabras Clave: Sifones de aspiración; Drenaje transversal; Falsos túneles; Pantallas

Abstract: This paper describes the possibilities of the suction siphon system as a means of providing continuity to groundwater flow intercepted by a false tunnel between diaphragm-walls. This system has been successfully tested in one of the tunnels built in the Malaga Metro. The system uses a suction siphon to transfer water between two drainage wells, located on either side of the tunnel. The system works without pumping, as the difference in water level between the two wells provides the necessary drive for the movement of the water, according to the principle of communicating vessels. This system can be useful, as it does not require the complicated construction procedures of other systems and may be maintained or even completely replaced from outside the tunnel without affecting tunnel operation.

Keywords: Suction siphons; Transversal drainage; Cut&Cover tunnels; diaphragm-walls

1. El efecto barrera en los falsos túneles entre pantallas

1.1. Efecto barrera. Concepto y consecuencias indeseables

En ciertas ocasiones cuando se construye un falso túnel de carretera o de ferrocarril entre pantallas, con la obra puede interrumpirse el flujo natural de agua que circula por el terreno. Esto no sucede siempre necesariamente: puede ocurrir que no haya ninguna corriente apreciable de agua, puede ocurrir que toda la obra se encuentre por encima del nivel freático, o puede ser que los flujos naturales sean paralelos a la infraestructura.

1. The barrier effect in false tunnels between diaphragm walls

1.1. Barrier effect. Concept and undesirable consequences

When a false tunnel for road or railway is built between diaphragm walls, the work may, on occasions, interrupt the natural flow of groundwater. This does not always occur as it may be the case that there is no appreciable flow of water or that the entire work is above the water table, or that the natural flows run parallel and not transversal to the infrastructure and are not interrupted by the same.

Tabla 1. Efectos geotécnicos indeseables de la interrupción del freático/
Table 1: Undesirable geotechnical effects of blocked groundwater

Efecto/Effect	Problemas derivados/Resultant problems
(1) Elevación del nivel freático aguas arriba del túnel (1) Rise of groundwater level upstream of the tunnel	• Aumento de la presión intersticial —> disminución de la presión efectiva —> hinchamiento del terreno • Increase in pore pressure —> decrease in effective pressure —> swelling of soil • Hinchamiento de suelos expansivos, sensibles al agua • Swelling of expansive, water-sensitive soils • Asiento de colapso por saturación de suelos inestables • Collapse settlement due to saturation of unstable soils. • Inestabilidad en taludes cercanos • Instability of nearby banks. • Inundaciones o humedades en sótanos de edificios próximos • Flooding or damp in basements of nearby buildings.
(2) Descenso del nivel freático aguas abajo del túnel (2) Drop of groundwater level downstream of the tunnel	• Disminución de la presión intersticial —> aumento de la presión efectiva —> asiento del terreno. • Decrease in pore pressure —> increase in effective pressure —> soil settlement • Disminución del volumen de suelos expansivos sensibles al agua —> asientos del terreno —> afección a edificios, estructuras, conducciones u otros servicios próximos • Decrease in volume of expansive, water sensitive soils —> soil settlement —> affecting buildings, structures, pipelines and other nearby services
(3) Modificación de los flujos subálveos a gran escala (3) Large-scale modification of subsurface water flows	• Aparición de flujos de agua en zonas donde antes no existían —> arrastres de finos —> formación de socavones, colapsos. • Appearance of water flows in areas where these did not previously exist —> scouring of fines —> subsidence, collapse. • Hinchamiento de suelos expansivos sensibles al agua —> asientos del terreno —> afección a edificios, estructuras, conducciones u otros servicios próximos • Swelling of expansive, water-sensitive soils —> soil settlement —> affecting buildings, structures, pipelines and other nearby services

ra y no transversales, por lo que el túnel no los interrumpiría.

También puede suceder que el flujo de agua que se infiltra entre las juntas de las pantallas bajo el nivel de contrabóveda, o el que circula por los extremos del túnel, sea suficiente para no producir alteraciones significativas en el nivel freático.

En cualquiera de los casos referidos no sería necesario dotar al falso túnel de un sistema para paso del agua freática de un lado al otro de la estructura. Por el contrario, si existe previamente una corriente de agua subálvea natural que se cruza con el túnel, y éste la interrumpe, se produce lo que se conoce como **efecto barrera**. En tal caso resulta necesario adoptar un sistema para el paso de freático de un lado al otro, ya que de lo contrario se pueden producir varios efectos indeseables. Las consecuencias geotécnicas indeseables más habituales del efecto barrera son las indicadas en la Tabla 1.

Suele ser preceptivo en todos los proyectos en los que se da esta circunstancia que se estudie y se dimen-

It may also be the case that the flow of water infiltrating between the joints of the diaphragm walls below the level of floor or circulating at the ends of the tunnel, is sufficient to prevent significant changes in the phreatic level.

*In these cases it will not be necessary to install a system to allow the passage of groundwater from one side of the false tunnel to the other. However, in those cases where an existing natural current of groundwater is interrupted by a tunnel, this will give rise to a **barrier effect** and, in this case, it shall be necessary to install a system to allow the passage of groundwater from one side to the other, as this would otherwise lead to various undesirable effects. The most common negative geotechnical consequences of the barrier effect are indicated in table 1.*

*In all projects where these circumstances arise, it is usually necessary to study and design a system or procedure for the transverse passage of groundwater, which in design tend to be referred to as **groundwater passages** or **deep transverse drainage**.*

sione un sistema o procedimiento para el paso transversal del agua freática, que en los proyectos se llama habitualmente pasos de agua freática o drenaje transversal profundo.

1.2. Sistemas de paso de agua para evitar el efecto barrera

En la bibliografía técnica se hace referencia a diversos sistemas para el paso de agua freática en falsos túneles entre pantallas (Ref. 7). Los distintos sistemas empleados más comúnmente pueden agruparse en tres tipos o categorías, dependiendo de si el agua se pasa por encima del túnel, por debajo del túnel, o realizando un movimiento descendente/ascendente:

Almenados

El paso de agua de tipo "almenado" consiste en rebajar la losa de cubierta del falso túnel hasta que quede por lo menos a 1 m por debajo del nivel freático. De este modo el agua puede pasar por encima de la losa de un lado al otro del túnel.

El paso puede tener una longitud corta medida a lo largo del túnel, del orden de la anchura del túnel (típicamente 10 m), o hacerse más largo, e incluso continuo a lo largo de centenares de metros. Es habitual dejar pasos de unos 10-20 m de amplitud o anchura cada 100-200 m de túnel.

La construcción del almenado requiere en principio de algún sistema de exclusión (pantallas, tablestacas) para trabajar por debajo del freático. No obstante, dado que la losa solamente se rebaja a lo sumo 1 m bajo el nivel del agua, puede trabajarse al amparo de las propias pantallas del túnel, que posteriormente se demuehlen o se perforan por encima de la losa superior del túnel (Figura 1).

Portillos

El paso de agua de tipo "portillo" consiste en dejar unos bataches de pantalla cortos, sin alcanzar el sustrato impermeable, de forma que dejen una puerta o portillo por la que pasa el agua de un lado al otro del túnel por debajo de la contrabóveda.

Los portillos pueden tener una longitud del orden de la anchura del túnel (típicamente 10 m: 4 bataches cortos de 2.50 m), aunque pueden ser más largos. Si se requiere por razones de estabilidad de las pantallas, pue-

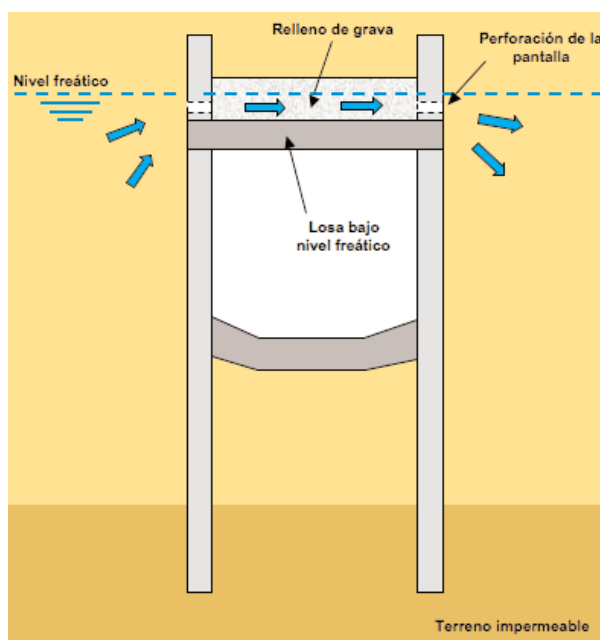


Fig. 1. Sección esquemática de un paso de agua de tipo "almenado" / Cross-section of a "notch" type water passage.

1.2. Water passage systems to avoid the barrier effect

The technical bibliography makes reference to diverse systems that may be employed for the passage of groundwater through false tunnels set between diaphragm walls (Ref. 7). The most widely employed systems may be grouped into three types or categories, depending on whether the water passes over or under the tunnel, or by making a rising/falling movement.

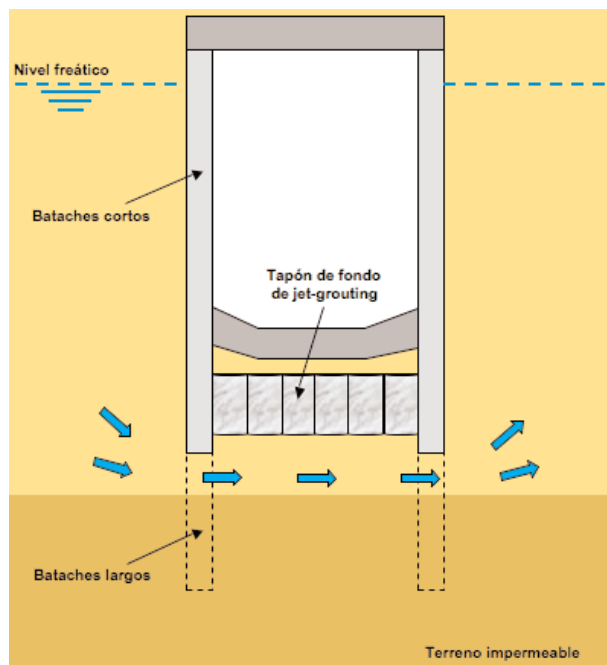
Notch

The "notch" water passage consists of the lowering of the cover slab of the false tunnel until this is at least 1 m below the water table. In this way water may pass over the slab from one side of the tunnel to the other.

The passage may have a short length measured throughout the tunnel and of about the width of the same (normally 10 m) or may be long or even continuous for hundred of metres. It is standard practice to leave 10 - 20 m wide passages for every 100-200 m of tunnel.

The construction of the notch normally requires some type of exclusion system (walls, sheet-piling) to work below the water table. However, as the slab is only lowered around 1 metre below the water level, this may work by using the diaphragm walls of the tunnel

Fig. 2. Sección esquemática de un paso de agua de tipo "portillo" / Cross-section of a "gated" type water passage.



de limitarse la anchura a un valor que, en todo caso, no debe ser inferior a unos 4.0 m.

Para lograr la impermeabilidad del recinto durante la excavación hasta el nivel de contrabóveda debe ejecutarse un tapón de fondo, normalmente con jet-grouting, que reduzca la permeabilidad del terreno para hacer posible la excavación temporal hasta el cierre estructural de la sección (mediante la losa o contrabóveda de fondo). Esta medida se complementa con pantallas transversales de impermeabilización, de cemento-bentonita, que aíslan el tramo donde están los bataches cortos. Estas pantallas transversales también se pueden hacer de jet-grouting (Figura 2).

Sifones

El paso de agua de tipo "sifón de presión" recibe este nombre porque el agua realiza un movimiento primero vertical descendente, luego horizontal por debajo del túnel, y luego vertical ascendente, como en el caso de un sifón de un canal al atravesar una vaguada o bajo un desmonte de carretera.

En este artículo se describe el sistema del "sifón de aspiración". En este caso el agua primero asciende en vertical hasta cerca de la superficie del terreno, pasa en horizontal por encima del túnel, y por último descende en vertical.

En ambos casos es la diferencia de nivel entre uno y otro lado del túnel la que impulsa el agua, por el prin-

itself, by subsequently removing or perforating the same above the upper slab of the tunnel (Figure 1).

Gate

The "gate" type water passage is made by leaving shorter sections of diaphragm wall which do not reach the impermeable substrate, and which subsequently leave a gate or scuttle through which water can pass below the base slab from one side of the tunnel to the other.

The gates or scuttles may be as long as the width of the tunnel (normally 10m: 4 short retaining sections of 2.50 m), or may be longer. This width may be restricted, to ensure the stability of the diaphragm walls, but in no case should be smaller than 4.0 m.

In order to ensure the impermeability of the area during excavation down to the level of the tunnel base, it is necessary to form a bottom cover, normally made by jet-grouting, which reduces the permeability of the soil and makes it possible to make a temporary excavation until the section is structurally closed (by the base slab or floor). This may be supplemented by cement-bentonite transverse cut-off diaphragm walls that isolate the sections where the trenches are made. These transverse cut-off walls may also be made by jet grouting (Figure 2).

Siphons

The "pressure siphon" type water passage gets its name from the fact that the water first makes a vertical descending movement, then a horizontal movement below the tunnels and, finally, a vertical upward movement, as in the case of a canal siphon on crossing a trough or below a road cutting.

This article describes the "suction siphon" system and, in this case, the water first ascends vertically almost to the surface of the soil, then crosses horizontally before finally descending in a vertical movement.

In both cases water is driven by the difference in level between one side of the tunnel and the other, in accordance with the principle of communicating vessels (Figure 3). In the case of the lower siphon, the water circulates at a greater pressure to atmospheric pressure, while in the upper siphon the water circulates at a pressure below atmospheric pressure.

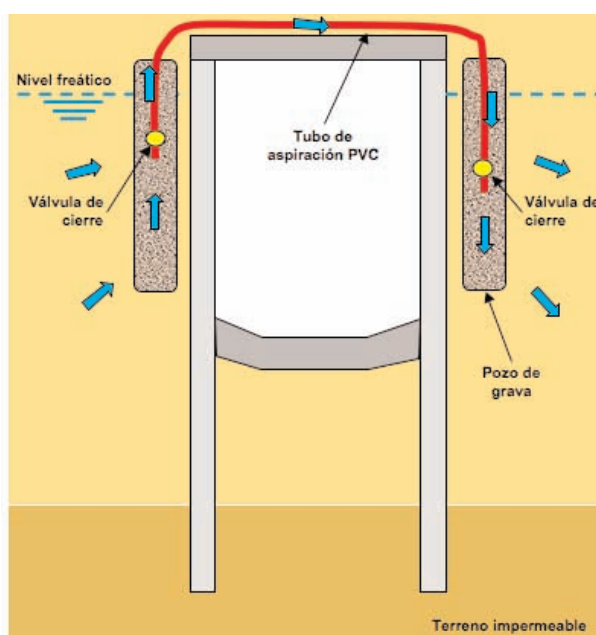
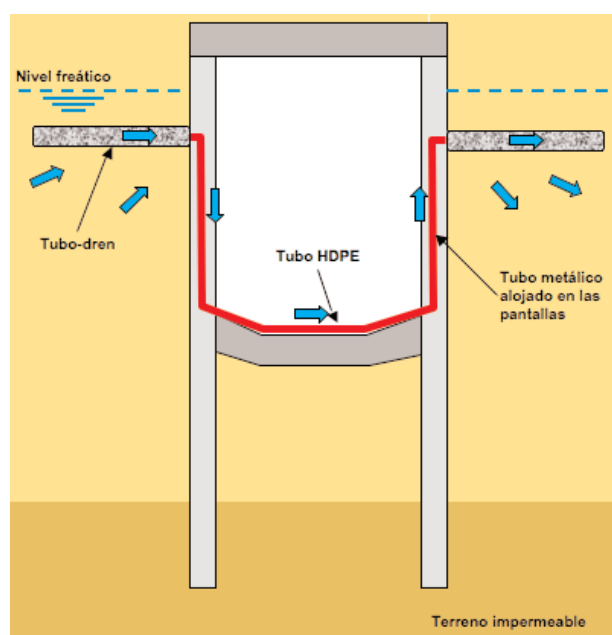


Fig. 3. Sección esquemática de un paso de agua mediante sifón de presión (izquierda) y de aspiración (derecha).
Cross-section of a water passage by pressure siphon (left) and suction siphon (right).

pio de los vasos comunicantes (Figura 3). En el caso del sifón inferior el agua circula a una presión superior a la atmosférica, mientras que en el sifón superior el agua circula a una presión inferior a la atmosférica.

Todo paso de agua freática de tipo sifón tiene los siguientes tres elementos:

1. El elemento de captación de agua situado aguas arriba del túnel, que puede ser un pozo de grava o también un tubo dren.
2. El elemento de emisión de agua al acuífero, situado aguas abajo del túnel, que normalmente es similar al de aguas arriba: o bien un pozo de grava o bien un tubo dren.
3. El elemento de transmisión del agua de un lado al otro, que puede ser un tubo metálico o de plástico (PVC, HDPE), o incluso un tubo de hormigón armado o parte del recinto entre pantallas, según el diseño que se adopte.

1.3. El sistema de sifón de aspiración

El sifón de aspiración o sifón superior accionado de forma natural, sin empleo de bombas, es un sistema que no había sido utilizado para el paso de agua freática en un falso túnel hasta que se ha probado en el Metro de Málaga, aunque sí es un sistema que se ha utilizado con cierta asiduidad para otras aplicaciones:

All siphon type groundwater passages have the following three elements:

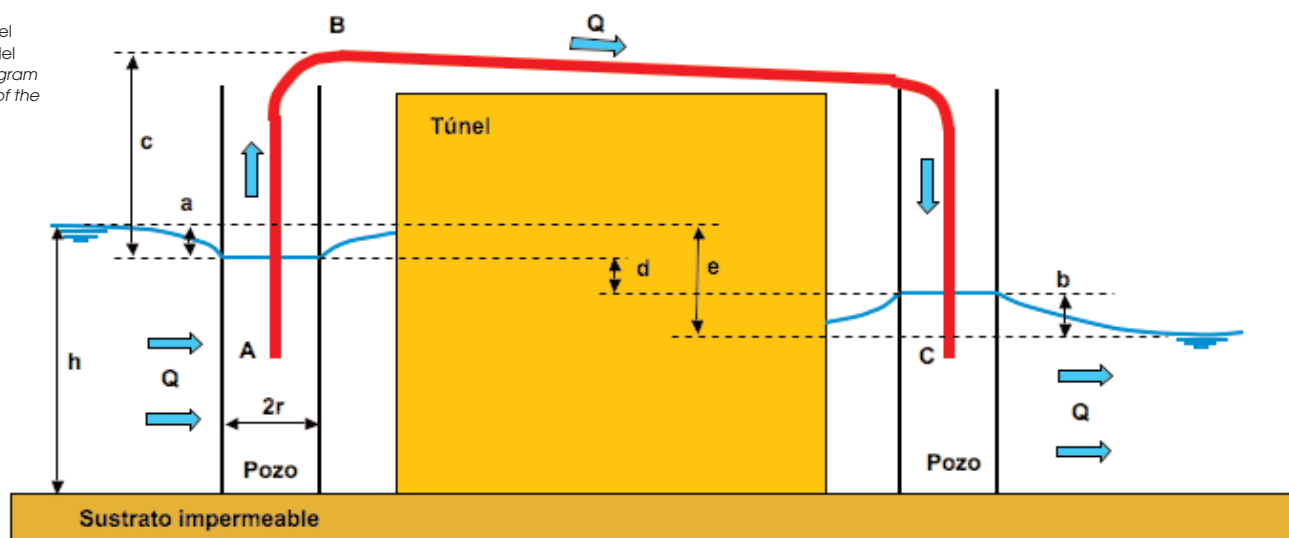
1. A water capture element set upstream of the tunnel, in the form of a gravel wall well or drain pipe.
2. A water emission element to the aquifer, set downstream of the tunnel, and normally similar to that upstream: in the form of gravel wall well or drainage pipe.
3. A water transfer element from one side to the other, in the form of steel or plastic piping (PVC, HDPE), or even a reinforced concrete pipe or part of the area within the diaphragm walls, according to the selected design.

1.3. The suction siphon system

The suction or upper siphon system, currently being tested at the Malaga Metro, is a system that works naturally without the aid of pumps and one that has not been previously employed for the passage of groundwater in false tunnels, though it is a system that is widely used for other applications:

- Transfer of liquids between tanks.
- Emptying of basins, tanks or reservoirs without bottom drainage.

Fig. 4. Esquema del funcionamiento del sifón superior/*Diagram of the operation of the suction siphon.*



- Trasvase de líquidos entre depósitos.
- Vaciado de balsas, depósitos o embalses sin desagüe de fondo.
- Pozos drenantes para drenaje profundo en estabilización de taludes (Ref. 1, 2, 3 y 4)
- Drenaje de zonas encharcadas o endorreicas (Ref. 5)

Conocidas estas otras aplicaciones del sifón de aspiración, se decidió realizar una prueba en uno de los túneles ya construidos del Metro de Málaga, con objeto de estudiar la aplicabilidad de este sistema para la solución del efecto barrera. Concretamente, la prueba se ha realizado en la Línea 2 del Metro de Málaga en la zona de la estación de Puerta Blanca. Hasta la fecha, la prueba ha dado un resultado que se puede considerar satisfactorio.

2. Funcionamiento teórico.

Cálculo del caudal trasvasado

2.1. Esquema general de funcionamiento

En la Figura 4 puede observarse el funcionamiento general del sifón superior aplicado al paso transversal de agua freática en un falso túnel. Junto al túnel deben perforarse dos pozos drenantes, uno a cada lado de la estructura. Estos pozos serán los elementos de captación y emisión del agua freática, mientras que el elemento de transmisión será simplemente un tubo de material plástico.

Si entre los dos lados del falso túnel existe un desnivel del freático "e" y existe una lámina de agua libre den-

- Drainage wells for deep drainage in slope stabilization (Ref. 1, 2, 3 and 4)
- Drainage of waterlogged or endorreic areas (Ref. 5)

In the awareness of these other applications of the suction siphon, it was decided to conduct a test in one of the tunnels that had already been constructed for the Malaga Metro, with the object of studying the application of this system to overcome the barrier effect. Tests have been made on Line 2 of the Malaga Metro in the area of the Puerta Blanca station and the results to date may be considered to be satisfactory.

2. Theoretical operation. Calculation of the transfer flow

2.1. General operation arrangement

Figure 4 shows the general operation of a suction siphon applied to the transverse passage of groundwater in a false tunnel. Two drainage wells have to be bored close to the tunnel on each side of the structure. These wells will serve as elements for the capture and emission of the groundwater, while the transfer component will simply be some sort of plastic tubing.

If there is a difference "e" in the phreatic level between both sides of the false tunnel and there is a free water surface within each of the two wells, the siphon will naturally begin to transfer a flow Q from one side to the other. This only requires that the pipe be completely full of water: the difference between

tro de cada uno de los dos pozos, entonces el sifón empieza a trasvasar un caudal Q entre un lado y otro de forma natural. Para ello solamente es necesario que el tubo esté completamente lleno de agua: la diferencia de carga entre un lado y otro impulsará el agua. No se requiere bombeo.

El pozo drenante de aguas arriba captará ese mismo caudal Q desde el acuífero, lo que produce un rebaje del freático dentro del pozo "a". Del mismo modo, en el pozo de aguas abajo se produce una sobreelevación "b" debido a la emisión del caudal Q . Si los dos pozos son iguales y la permeabilidad del terreno es igual en ambos lados se puede suponer con bastante aproximación que $a = b$.

Debido al rebaje y sobreelevación del nivel en los dos pozos, el sifón realmente trabaja con un desnivel "d" entre sus dos extremos, de forma que:

$$d = e - a - b = e - 2a$$

2.2. Caudal conducido por la tubería

El caudal que circula por la tubería puede calcularse aplicando la expresión de Bernoulli entre A, B y C:

$$H_A = H_B + \Delta H_{AB} = H_C + \Delta H_{AC}$$

Donde la carga total H , como es sabido, vale:

$$H = h + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$$

siendo h la altura geométrica del punto en consideración con respecto a un origen dado, p es la presión del agua, V su velocidad y $\gamma = 9.8 \text{ kN/m}^3$ es el peso específico del agua.

Las pérdidas de carga en la tubería ΔH son proporcionales al cuadrado de la velocidad del agua, y pueden estimarse mediante:

$$\Delta H = K \cdot \frac{V^2}{2g}$$

siendo V la velocidad de agua en el tubo, g la aceleración de la gravedad y K una constante que vale aproximadamente:

- $K=0.5$ para la embocadura del tubo
- $K=1.0$ para la salida del tubo
- A lo largo del tubo: $K = \frac{f \cdot L}{D}$

the head on one side and the other will drive the water and will not require pumping.

The upstream drainage well will capture this same flow Q from the aquifer which then lowers the phreatic level within the well. In the same way, there will be a rise "b" in the downstream well due to the emission of flow Q . If the two wells are equal and the permeability of the soil is the same on both sides, it may then be presumed, with some degree of certainty, that $a=b$.

As a result of the lowering and rising of the levels in the two wells, the siphon actually works with a height variation "d" between its two ends, and subsequently:

$$d = e - a - b = e - 2a$$

2.2. Flow carried by the pipe

The flow carried by the pipe may be calculated by applying the Bernoulli equation between A, B and C:

$$H_A = H_B + \Delta H_{AB} = H_C + \Delta H_{AC}$$

Where the total head H , as is known, equals:

$$H = h + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$$

where h is the geometric height of the point in question with respect to a given origin, p is the water pressure, V its velocity and $\gamma = 9.8 \text{ kN/m}^3$ is the specific weight of water.

The losses in head in the pipe ΔH are proportional to the square of the velocity of the water, and may be estimated by:

$$\Delta H = K \cdot \frac{V^2}{2g}$$

where V is the velocity of water in the pipe, g the acceleration of gravity and K a constant that it is approximately equal to:

- $K=0.5$ at the entrance to the pipe
- $K=1.0$ at the outlet of the pipe.
- Throughout the pipe: $K = \frac{f \cdot L}{D}$

(Darcy-Weisbach formula), where L is the length of the pipe, D its diameter and f a coefficient that depends on the roughness of the pipe and the turbulence of the water flow. The coefficient f varies with the

(fórmula de Darcy-Weisbach), siendo L la longitud de la tubería, D su diámetro y f un coeficiente que depende de la rugosidad de la tubería y de la turbulencia del flujo de agua. El coeficiente f varía con la velocidad y puede calcularse mediante el ábaco de Moody, pero simplificado puede tomarse como $f=0.04$ para el caso de estos sifones, ya que funcionan a escasa velocidad y la pérdida de carga es muy pequeña.

Aplicando la expresión de Bernoulli entre A y C se tiene por lo tanto que:

$$d = \frac{V^2}{2g} \cdot \left(1.5 + \frac{0.04 \cdot L}{D} \right)$$

de donde:
$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot d}{1.5 + \frac{0.04 \cdot L}{D}}}$$

que es la velocidad a la que circula el agua por el tubo, función del desnivel d existente entre ambos pozos y de las características de la tubería. Lógicamente, si el desnivel entre ambos lados del túnel se anula deja de pasar caudal entre un lado y otro. Por otra parte, cuanto mayor es el desnivel existente, mayor es la velocidad y mayor el caudal trasvasado. Es decir, el sistema se regula naturalmente en función del desnivel existente entre ambos lados del túnel.

El caudal trasvasado se calcula como:

$$Q = V \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

o lo que es lo mismo:
$$Q = T \cdot \sqrt{d}$$

Siendo T una constante que depende del diámetro y longitud de la tubería, y siendo d el desnivel de agua entre los dos pozos.

Por otro lado, aplicando la expresión de Bernoulli entre A y B podemos calcular la presión del agua en el punto alto de la tubería B:

$$p_B = p_{atm} - C \cdot \gamma - \frac{\gamma \cdot V^2}{2g} \cdot \left(1 + \frac{0.04 \cdot (c+2)}{D} \right)$$

siendo $\gamma=9.8 \text{ kN/m}^3$ el peso específico del agua.

La longitud vertical del tubo $c+2$ supone que hay 2 m de tubo introducidos por debajo del nivel de agua en el pozo. En cualquier caso, como las pérdidas en el

velocity and may be calculated by the Moody chart, but in simple form may be taken as $f=0.04$ for the case of these siphons, as they operate at low velocity and the loss of head is very small.

When applying the Bernoulli equation between A and C, it is subsequently found that:

$$d = \frac{V^2}{2g} \cdot \left(1.5 + \frac{0.04 \cdot L}{D} \right)$$

where:
$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot d}{1.5 + \frac{0.04 \cdot L}{D}}}$$

which is the velocity at which the water is circulating in the pipe and which is a function of the difference d between both wells and the characteristics of the pipe. If the difference in level between both sides of the tunnel is eliminated there will logically be no passage of flow from one side to the other. To the other extent, the greater the existing difference, the greater the velocity and the greater the flow transferred. This means that the system regulates itself naturally in accordance with the difference in the levels existing both sides of the tunnel.

The transferred flow is calculated as:

$$Q = V \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

or, what is the same:
$$Q = T \cdot \sqrt{d}$$

Where T is a constant that depends on the diameter and length of the pipe, and where d is the difference in the water level between both wells.

Similarly, when applying the Bernoulli equation between A and B we may calculate the water pressure at the high point of pipe B:

$$p_B = p_{atm} - C \cdot \gamma - \frac{\gamma \cdot V^2}{2g} \cdot \left(1 + \frac{0.04 \cdot (c+2)}{D} \right)$$

where $\gamma=9.8 \text{ kN/m}^3$ the specific weight of water.

The vertical length of pipe $c+2$ implies that there are 2 m of pipe set below the water level in the well. In all events, as the losses in the pipe are relatively small, it may then be taken as an approximation that:

$$p_B \approx p_{atm} - C \cdot \gamma$$

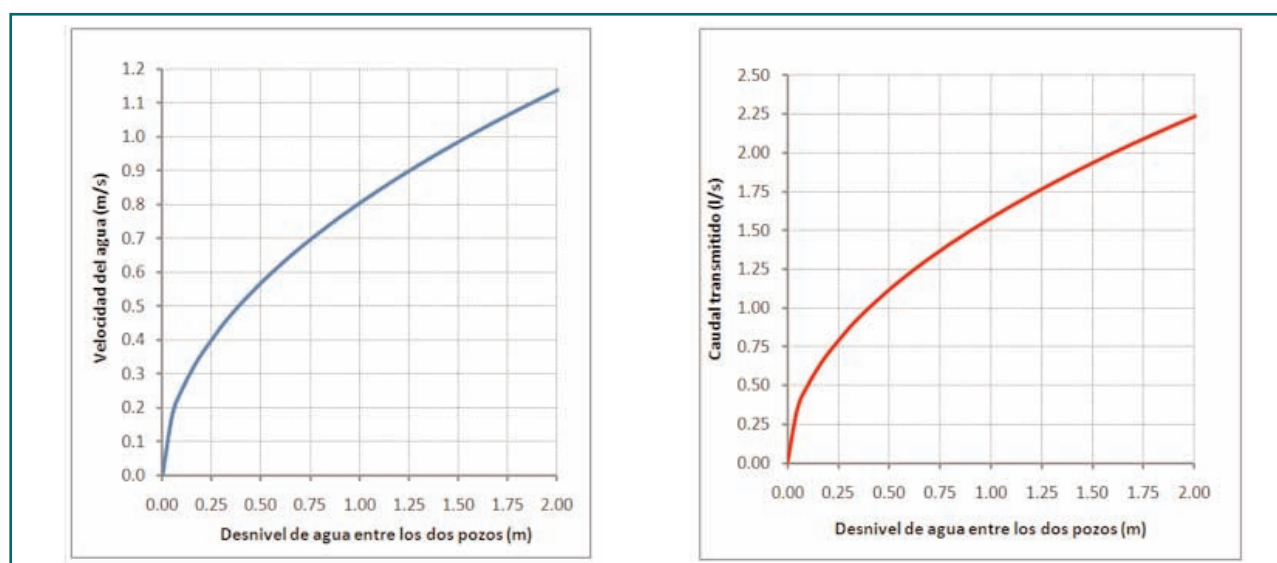


Fig. 5. Velocidad y caudal en función del desnivel, para la prueba realizada en el Metro de Málaga/Velocity and flow according to head levels in the test conducted at the Malaga Metro.

tubo son relativamente pequeñas, se tiene que de forma aproximada:

$$p_B \approx p_{atm} - C \cdot \gamma$$

Es decir, el tubo trabaja en depresión (el agua está a una presión inferior a la atmosférica), y el valor máximo de esta depresión corresponde a la altura máxima del tubo sobre el nivel freático. Esto limita el funcionamiento del sistema, ya que el agua no puede superar un desnivel mayor que la presión atmosférica, que es de aproximadamente 10 m de columna de agua. Si el freático se encuentra a más de 10 m de profundidad este sistema no sería aplicable.

En el caso de la prueba realizada en el Metro de Málaga el tubo tiene una longitud de $L=36$ m y un diámetro interior de $D=50$ mm, quedando la relación entre desnivel, velocidad y caudal que se observa en la Figura 5.

2.3. Captación de agua por los pozos drenantes

Por lo que respecta a la captación de agua por parte del pozo drenante de aguas arriba (y a la emisión de agua en el pozo de aguas abajo, que suponemos produce un desnivel idéntico: $a = b$), se produce un rebaje del freático en el pozo "a" que puede calcularse por la fórmula de los pozos en un acuífero libre (Ref. 6):

$$h^2 = (h - a)^2 + \frac{Q}{\pi \cdot k} \cdot \ln \frac{R}{r}$$

En esa expresión, Q es el caudal que capta el pozo, k es la permeabilidad del terreno, h es el espesor del

This means that the pipe is working under negative pressure (the water is at a pressure lower than atmospheric pressure), and the maximum value of this negative pressure corresponds to the maximum height of the pipe above the phreatic level. This restricts the operation of the system, as the water cannot exceed a greater drop than the atmospheric pressure, this being approximately 10 m of water column. If the phreatic level is more than 10 m deep the system would not be applicable.

In the case of the test conducted at the Malaga Metro, the pipe has a length of $L=36$ m and an internal diameter of $D=50$ mm, and where the relationship between difference in head, velocity and flow is as shown in figure 5.

2.3. Water capture by the drainage wells

With regards to the water capture by the upstream drainage well (and the emission of water from the downstream well, which presumably produces an identical drop: $a=b$), there is a lowering of the water table in well "a" which may be calculated by the equation for wells in an unconfined aquifer (Ref 6):

$$h^2 = (h - a)^2 + \frac{Q}{\pi \cdot k} \cdot \ln \frac{R}{r}$$

In this equation, Q is the flow captured by the well, k is the permeability of the soil, h is the height of the aquifer, a the reduction in phreatic level due to the well, r the radius of the well and R the distance at which it no longer affects the water level (radius of the cone of depression).

acuifero, a es el rebaje del nivel freático debido al pozo, r es el radio del pozo y R es la distancia a la que ya no se afecta el nivel freático (radio del cono de depresión).

En realidad debe aplicarse la fórmula anterior teniendo en cuenta la proximidad de las pantallas del falso túnel, que hace que el descenso en el pozo aumente. Esto equivale a suponer que existe un pozo ficticio situado de forma simétrica con respecto a la pantalla, sumándose el efecto de ambos pozos. En tal caso, se obtiene que el rebaje a en el interior del pozo es:

$$a = 2 \cdot h - \sqrt{h^2 - \frac{Q}{\pi \cdot k} \cdot \ln \frac{R}{r}} - \sqrt{h^2 - \frac{Q}{\pi \cdot k} \cdot \ln \frac{R}{s}}$$

En donde s es la distancia ficticia desde el centro del pozo al otro pozo virtual situado de forma simétrica con respecto al muro pantalla, o lo que es lo mismo, dos veces la distancia del centro del pozo a la pantalla.

Las pruebas del Metro de Málaga se han efectuado en un acuifero libre de $h = 18$ m de espesor (por debajo del nivel freático hasta el terreno impermeable), el pozo tiene un radio $r = 0.65$ m y está situado a una distancia media de 4.4 m de la pantalla (en realidad cada pozo está a una distancia diferente), por lo que $s = 10.1$ m.

Con estos valores de referencia, en la Figura 6 se ha representado el rebaje producido en el interior del pozo, para distintas permeabilidades, siempre suponiendo un radio de influencia $R = 20$ m.

La permeabilidad del terreno está en el rango $k = 10^{-3}$ a 10^{-4} m/s, en función de sus características granulométricas.

The preceding formula should, in all reality, be applied when taking into account the proximity of the diaphragm walls of the false tunnel which cause the drop in the well to increase. This makes it possible to presume the presence of a fictitious well set symmetrically with respect to the diaphragm wall and adding to the effect of both wells. In this case, the difference in level a within the well is then:

$$a = 2 \cdot h - \sqrt{h^2 - \frac{Q}{\pi \cdot k} \cdot \ln \frac{R}{r}} - \sqrt{h^2 - \frac{Q}{\pi \cdot k} \cdot \ln \frac{R}{s}}$$

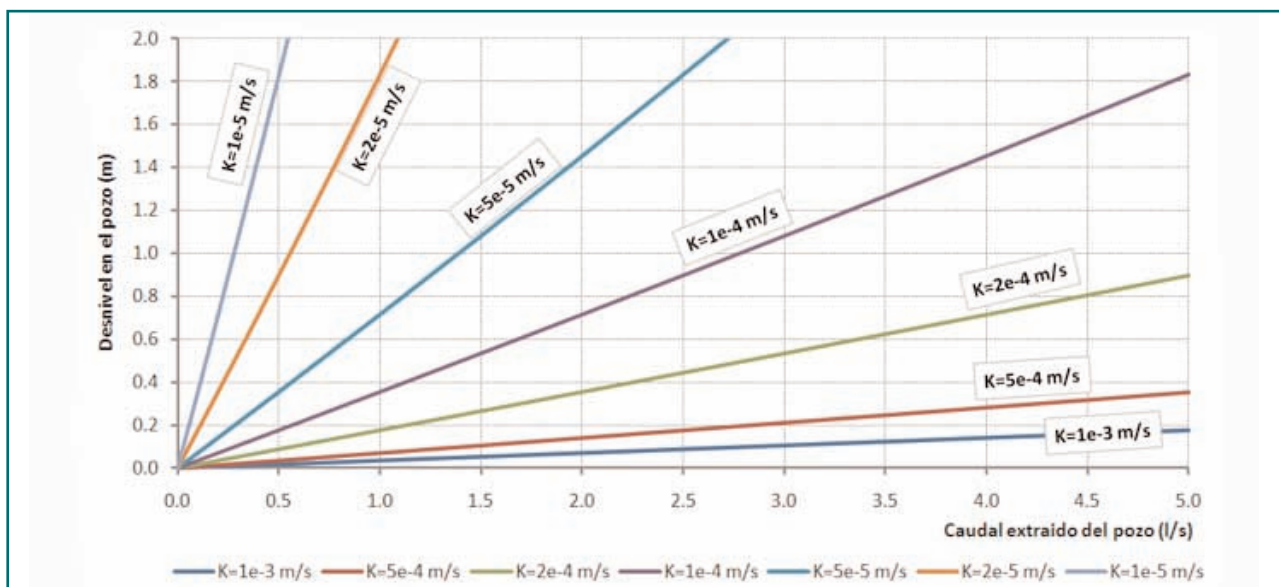
Where s is the fictitious distance from the centre of the well to the other virtual well set symmetrically with respect to the diaphragm wall, or what is the same thing, twice the distance from the centre of the well to the wall.

The test conducted at the Malaga Metro were made in an unconfined aquifer of $h = 18$ m (depth below the water table down to impermeable soil), where the well has a radius $r = 0.65$ m and is set at an average distance of 4.4 m from the diaphragm wall (in reality each well is set at a different distance), and subsequently, where $s = 10.1$ m.

Figure 6 then shows the drop produced inside the well for different permeabilities, on the basis of these references, and when taking a radius of influence $R = 20$ m.

The soil permeability is within the range of $k = 10^{-3}$ to 10^{-4} m/s, in accordance with its granulometric characteristics.

Fig. 6. Relación entre el caudal extraído del pozo y el rebaje del nivel de agua que produce, para distintos coeficientes de permeabilidad del terreno/Relation between the flow extracted from the well and the drop in water level produced, for different soil permeability coefficients.



3. Aspectos constructivos

3.1. Tipo de tubería. Material y conexiones

Las pruebas realizadas en el Metro de Málaga han puesto de manifiesto algunas condiciones que deben reunir las tuberías del sifón de aspiración:

- Es recomendable que el tubo sea de material plástico flexible, lo que facilita las tareas de llenado de agua, así como la introducción del tubo en los pozos drenantes y en el pasatubos que cruza por debajo de la calzada de la calle. Se ha usado un tubo transparente, que permite comprobar visualmente si quedan burbujas de aire al realizar el cebado del sifón.
- El tubo trabaja en depresión, por lo que la presión atmosférica hace trabajar a las paredes de la tubería a compresión. Como las paredes del tubo no son exactamente circulares, la mínima irregularidad da lugar a unas flexiones que terminan por abollar el tubo reduciendo la sección de paso. En consecuencia, deben utilizarse tubos con refuerzo interior helicoidal de acero (ver fotos adjuntas), que están preparados para trabajar en aspiración (depresión). Sin el refuerzo los tubos se han abollado siempre en las pruebas realizadas, disminuyendo su sección de forma importante. Es necesario que el tubo sea de una única pieza entre los dos pozos drenantes. Se han probado algunas combinaciones de tubos empalmados mediante juntas, pero por las que inmediatamente entraba aire, produciendo el descebado del sifón.
- Las válvulas para cierre del tubo pueden ser válvulas normales de esfera, accionadas mediante una cadena o un cable desde el exterior, o incluso simplemente un tapón que se quita tirando con una cadena desde la superficie (ver foto adjunta). La junta de la válvula de cierre con el tubo no necesita ser estanca puesto que se sitúa siempre por debajo del nivel freático.

3.2. Procedimiento de cebado y puesta en marcha del sifón

El sifón requiere para su puesta en funcionamiento del cebado de la tubería, es decir, de su llenado por completo de agua y consiguiente extracción del aire.

3. Construction aspects

3.1. Type of piping. Materials and joints

On the basis of the tests carried out at the Malaga Metro, the pipelines employed in suction siphons are seen to require a number of conditions:

- *It is recommended that the pipe be formed by a flexible plastic material to aid water filling and the housing of the pipe in the drainage wells and in the casing that crosses below the roadway. A transparent pipe has been employed to allow visual checks on the possible presence of air bubbles after the priming of the siphon.*
- *The pipe works under negative pressure which means that the atmospheric pressure makes the walls of the pipe work under compression. As the pipe walls are not exactly circular, the slightest irregularity gives rise to deflection which will end up denting the pipe and reducing the area of passage. It is subsequently necessary to employ pipes with internal helical steel reinforcement (see photos) that are capable of working under suction (depression). In all tests carried out without this reinforcement, the pipes always buckled and incurred a considerable loss of section. It is also necessary that the pipe be formed in one single length between the two drainage wells. Tests were carried out on various combinations of jointed pipe, but air was seen to enter immediately and lead to the unpriming of the siphon.*
- *The cut-off valves to the pipe can be standard ball valves, operated by chain or cable from the outside, or be a simple plug which is removed by pulling a chain from the surface (see photo). The joint of the cut-off valve with the pipe does not need to be watertight as it is always placed below the water table.*

3.2. Procedure for priming and starting up the siphon

The pipe has to be primed to start up the operation of the siphon and this means that it has to be completely filled with water and the air removed.

This operation requires the placing of valves at the ends of the pipes. Conventional ball or butterfly valves have both been employed as well as a wooden plug and have proved satisfactory in all cases. The process for the priming and start-up of the siphon is as follows:



Foto 1. Detalle del tubo utilizado. Se aprecia el refuerzo helicoidal interior de acero/
Photo 1. Detail of the pipe employed showing the internal steel helical reinforcement.



Foto 2. Tapón de cierre del tubo utilizado en una de las pruebas/
Photo 2. Blanking plug used in one of the tests.

Para ello es necesario colocar unas válvulas situadas en los puntos extremos de la tubería. Se han usado válvulas convencionales de esfera o de mariposa, e incluso un tapón de madera. En todo caso el resultado ha sido satisfactorio. El proceso seguido para el cebado y puesta en marcha del sifón es el siguiente:

1. Se extiende la tubería en el exterior, y con las dos válvulas de los extremos abiertas, el sifón se llena de agua por medio de una pequeña bomba. Es importante extender la tubería en el exterior para asegurar que no queda aire en su interior.
2. Se cierran las dos válvulas (primero una y luego la otra al rebosar), dejando el tubo completamente lleno de agua.
3. Con las válvulas cerradas y el tubo lleno de agua se introduce en el pasatubos por debajo de la calle y en ambos pozos drenantes, procurando que ambos extremos estén suficientemente por debajo del nivel freático.
4. Mediante un sistema manual (con una varilla o cadena) se abren las dos válvulas. Las dos válvulas quedan abiertas y ya no es necesario volverlas a accionar.
5. El sifón empieza inmediatamente a trasvasar agua de un lado a otro. En el caso de haber quedado burbujas de aire en el tubo, éstas son arrastradas por la corriente y desaparecen a los pocos minutos.

3.3. Posibles fallos del sistema

El sistema descrito puede dejar de funcionar por entrada continuada de aire al interior de la tubería, con la consiguiente pérdida de la depresión en el agua. Esto puede producirse por un poro, una fisura en la tubería o por una junta en el caso de disponer alguna. Por ello, es

1. The pipe is laid out above ground and, with the two end valves in open position, the siphon is then filled with water by a small pump. It is important to lay out the tube outside to prevent air from remaining inside the pipe.
2. The two valves are closed (first one and then the other when it overflows), leaving the pipe completely full of water.
3. Once the valves have been closed and the pipe is full of water, this is then set within the casing running below the road and into both draining wells and ensuring that both ends are set suitably below the water table.
4. The two valves are opened manually (by rod or chain) and once open do not require further action.
5. The siphon immediately begins to transfer water from one side to the other. In the event that air bubbles are trapped in the pipe, these will be taken away by the current and disappear within a few minutes.

3.3. Potential faults in the system

The system may stop working as a result of the continuous entry of air within the pipe which leads to a loss of negative pressure in the water. This may be caused by a pore or crack in the pipe or by the joint between pipes in the case where these are fitted. It is then preferable that the pipe be formed in one single length, without joints, and that this be of sufficient thickness to prevent accidental cracking.

Air may also enter one of the ends of the pipe when there is a lowering of the water table below the level of the mouth of the pipes. This risk is reduced if the end of the pipe is clearly submerged

conveniente poner un tubo de una sola pieza, sin juntas, y que tenga un espesor suficiente para que sea poco probable que se fisure accidentalmente.

También puede entrar aire por uno de los extremos del tubo en el caso de un rebajamiento del freático por debajo de la cota de la boca de los tubos. Este riesgo se minimiza introduciendo el extremo del tubo claramente sumergido por debajo (al menos 2 m) de la profundidad a la que se estime que puede descender el freático como máximo. Incluso así, una época prolongada de sequía en acuíferos no conectados con una masa de agua importante puede dar lugar al descebado del sifón. No tiene transcendencia el que el sifón deje de funcionar temporalmente ya que no hay agua que trasvasar, pero ya no funcionaría al volver a subir los niveles. En tales casos, resultaría imprescindible un mantenimiento periódico para comprobar el funcionamiento del sifón.

Por otra parte, existen varios fenómenos que pueden producir la formación de aire en el interior de la tubería:

- a) Burbujas de aire que hayan quedado en el proceso de cebado del sifón.
- b) Precipitación del aire disuelto en el agua debido a la depresión, aunque esto no apenas reseñable en tanto que el agua freática tiene normalmente muy poco gas disuelto, ya que no hay turbulencias en la interfase agua-aire.
- c) Formación de burbujas de gases por la acción de los microorganismos, que tampoco tiene casi transcendencia en los casos habituales de agua con escasa materia orgánica en disolución.

El aire producido por cualquiera de estos mecanismos no es capaz de descebar el sifón, en tanto que no es capaz de reducir la depresión del agua. Se trata de aire confinado en el interior de la tubería y que está a una presión inferior a la atmosférica, al igual que el líquido. Además, se ha comprobado que el caudal de agua arrastra estas pequeñas burbujas de aire y las hace salir del tubo por el pozo de aguas abajo.

No obstante, para minimizar la probabilidad de fallo es recomendable que el sistema tenga las siguientes características:

1. Reducir el diámetro del tubo todo lo posible que permita acomodar el caudal previsto. A menor diámetro del tubo disminuye proporcionalmente la superfi-

(at least 2 m) below the maximum depth the water table is estimated to fall. Even in this case, a prolonged period of drought in aquifers that are not connected to a considerable mass of water may give rise to the unpriming of the siphon. While the temporary stoppage of the siphon is of little importance when there is no water to transport, this will, however, mean that it will not start up again when the levels start to rise. In these cases it is essential to make periodical maintenance to ensure the operation of the siphon.

There are also a number of situations which may lead to the formation of air within the pipe:

- a) Air bubbles that were trapped during the priming process of the siphon.*
- b) Precipitation of air dissolved in water due to the negative pressure, though this is barely noticeable as the groundwater tends to have very little dissolved gas as there are no turbulences at the water-air interface.*
- c) Formation of gas bubbles by the action of micro-organisms, that will similarly have a negligible effect in the more common cases of water with little organic material dissolution.*

The air produced by any of these situations is not capable of unpriming the siphon as it is not able to reduce the depression of the water. This is air trapped within the pipe which is at a pressure lower than atmospheric pressure, in the same manner as the liquid. Furthermore, it has been demonstrated that the waterflow carries away these small air bubbles and forces them out of the pipe and into the downstream well.

However, in order to minimise any potential failure, it is recommended that the system has the following characteristics:

- 1. The smallest pipe diameter possible to allow the passage of the predicted waterflow. The smaller the diameter of the pipe, the smaller the outer surface area of the pipe and the lower the possibility of cracks forming.*
- 2. The smaller diameter also serves to increase the velocity of the water flow and makes it easier for the water to drag away any air bubbles than may be formed and reduces the risk of these accumulating within the pipe.*

cie exterior del tubo, con lo que disminuye la probabilidad de formación de una fisura.

2. A menor diámetro también se tiene mayor velocidad del agua en el interior, por lo que es más fácil que el agua arrastre las burbujas de aire que puedan formarse y se disminuye el riesgo de su acumulación.

4. Pruebas realizadas en el Metro de Málaga

Las pruebas se han realizado en la zona de la estación de Puerta Blanca, situada en la Línea 2 del Metro de Málaga. Una vez terminada la construcción del falso túnel, a ambos lados de las pantallas de la estación se han perforado dos pozos drenantes de 1.3 m de diámetro exterior (1.22 m de diámetro interior) rellenos de grava, dejando en su interior un tubo de PVC ranurado de 140 mm de diámetro. Los dos pozos tienen 20 m de profundidad y están separados 6.2 y 2.2 m, respectivamente, de las pantallas.

En una **primera fase** se introdujo una bomba en el pozo de aguas arriba (en el tubo de PVC de 140 mm), con la que se extraía agua y se vertía en el pozo de aguas abajo. Se fue graduando el caudal de la bomba hasta alcanzar un equilibrio entre las entradas y salidas en ambos pozos, que se consiguió para un caudal de aproximadamente $Q=1$ l/s (medición efectuada el 4 de diciembre de 2009).

En una **segunda fase** se retiró la bomba y se dejó que se produjera el efecto barrera. Se alcanzó un desnivel más o menos constante de 3.50 m entre el lado de aguas arriba y el lado de aguas abajo del túnel (4 de marzo de 2010).

En una **tercera fase** se introdujo el sifón de aspiración el día 4 de marzo de 2010, y se fueron midiendo los niveles freáticos en uno y otro pozo durante los días siguientes. En la gráfica de la Figura 7 se representa el desnivel a lo largo del periodo de 55 días de duración de la prueba. Durante este periodo el sifón ha estado funcionando de forma continuada, sin interrupciones ni ningún tipo de mantenimiento.

El día 54 desde la instalación del sifón se realizó una prueba directa de velocidad por medio de un trazador. Se coloreó el agua del pozo de aguas arriba, y se cronometró el tiempo en que tardó en detectarse el colorante en el pozo de aguas abajo. Aunque este procedimiento puede tener un cierto error,

4. Tests carried out on the Malaga Metro

The tests have been carried out in the area of the Puerta Blanca station, on Line 2 of the Malaga Metro. Once the false tunnel was constructed, two draining wells were bored on both sides of the diaphragm walls of the station. These wells have an outside diameter of 1.3 m (internal diameter of 1.22 m) and are filled with gravel with a 140 mm diameter grooved PVC pipe set within the same. The two wells are 20 m deep and are spaced 6.2 m and 2.2 m respectively from the diaphragm walls.

During an **initial stage** a pump was placed in the upstream well (in the 140 mm PVC pipe) in order to extract water and transfer it to the downstream well. The pump flow was graduated until reaching a balance between the discharge and inflow in both wells, which was achieved for a flow of approximately $Q=1$ l/s (measurement made on 4 December 2009).

At a **second stage** the pump was removed and the barrier effect was left to take place. A more or less constant difference in water level of 3.50 m was obtained between the upstream and downstream sides of the tunnel (4 March 2010).

At a **third stage** the suction siphon was inserted on 4 March 2010 and the phreatic levels were measured in each well over the following days. The chart in Figure 7 shows the difference in level over the 55 day period of the test. The siphon was in continuous operation throughout this time, without any interruptions or the need for any type of maintenance.

On the 54th day following the installation of the siphon a direct test of velocity was made by using a tracer. The water in the upstream well was coloured and a record made of the time it took to detect the colorant in the downstream well. While this procedure may have a certain margin of error, it is sufficiently precise to ensure the correct operation of the water transfer by a suction siphon.

The result obtained from the velocity test was $v=0.48$ /s, which is equivalent to a flow of $Q=0.94$ l/s. When considering that the difference in water level between both wells is 0.35 m, this result coincides fairly well with the theoretical flow obtained from the chart in Figure 5.

According to the chart in Figure 5, for a head difference of 3.50 m the siphon will begin to transfer a flow of approximately 3 l/s. In a period of some 6 hours, the difference in water level had reduced to 0.63 and

es suficientemente preciso para asegurar el buen funcionamiento del trasvase de agua mediante el sifón de aspiración.

El resultado obtenido en la medición de velocidad fue de $v = 0.48$ m/s, lo que equivale a un caudal de $Q = 0.94$ l/s. Teniendo en cuenta que el desnivel de agua entre pozos es de 0.35 m, este resultado concuerda bastante bien con el caudal teórico que se obtiene del ábaco de la Figura 5.

Según el ábaco de la Figura 5, para un desnivel de 3.50 m el sifón empezó a trasvasar un caudal de 3 l/s aproximadamente. En un plazo de unas 6 horas el desnivel había bajado a 0.63 m y el caudal trasvasado a 1.27 l/s. Al día siguiente el desnivel entre los dos pozos ya había bajado por debajo de los 0.40 m, manteniéndose desde entonces un desnivel más o menos constante entre 0.30 y 0.40 m.

Para un desnivel medio entre pozos de 0.35 m, resulta que el sifón está trasvasando un caudal medio de $Q = 0.95$ l/s (mismo valor obtenido por medición directa), que por otro lado es muy similar al que se estuvo trasvasando por medio de una bomba en la primera fase de la prueba (1 l/s). El rebaje dentro del pozo (según la Figura 6) es de 10-20 cm (dependiendo de la permeabilidad del terreno).

Durante el periodo de 55 días de duración de la prueba (hasta la redacción de este artículo) el sifón ha trasvasado un total aproximado de 4500 m³ de agua (unos 82 m³ diarios).

5. Conclusiones

En este artículo se ha descrito el sistema de sifón superior de aspiración para paso transversal de agua freática en un falso túnel entre pantallas. De las pruebas realizadas entre diciembre de 2009 y abril de 2010 en las obras de la Línea 2 del Metro de Málaga pueden señalarse algunas conclusiones:

- El sistema de sifón de aspiración puede funcionar correctamente en este tipo de aplicaciones. En la prueba realizada ha funcionado ininterrumpidamente y sin ningún mantenimiento durante 55 días, y continúa funcionando en el momento de redactar estas líneas. La vida útil del tubo de PVC puede estimarse en años.
- El sistema está siendo capaz de trasvasar unos 82 m³ diarios entre un lado y otro del falso túnel sin ningún

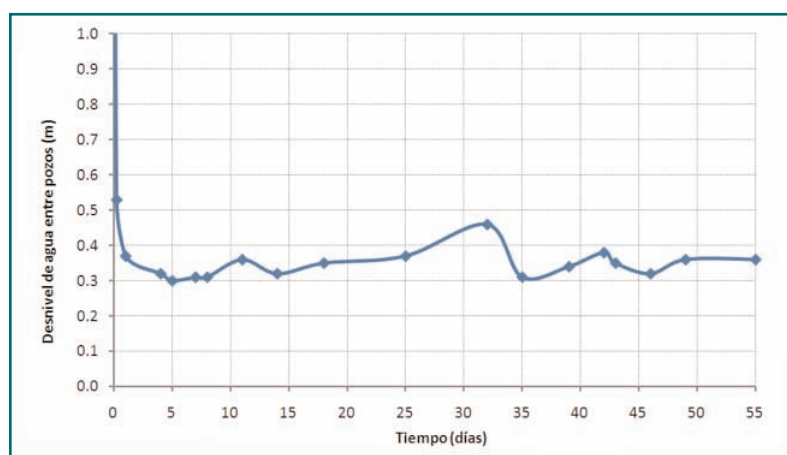


Fig. 7. Medidas del desnivel entre el pozo de aguas arriba y el de aguas abajo/ Recordings of differences in levels between the upstream and downstream wells.

the transferred flow to 1.27 l/s. By the following day the difference between both wells had gone down to below 0.40 m, and the difference remained more or less constant between 0.30 and 0.40 m from this time on.

For an average head difference of 0.35 m between wells, the siphon transfers a mean flow of $Q = 0.95$ l/s (the same value as obtained by direct measurement), and one very similar to that transferred by the pump during the first stage of the test (1 l/s). The drop within the well (according to Figure 6) is between 10-20 cm (depending on the permeability of the soil).

Throughout the 55 day period of the test (up to the drafting of this article) the siphon had transferred an approximate total of 4500 m³ of water (around 82 m³ per day).

5. Conclusions

This article has described the suction siphon system for the transverse passage of groundwater in a false tunnel set between diaphragm walls. From the tests carried out from December 2009 to April 2010 on the works of Line 2 of the Malaga Metro, it is possible to come to the following conclusions:

- The suction siphon system can work correctly in these types of applications. In the test carried out the siphon worked without interruption and without any type of maintenance for 55 days and continues to work at the time of writing this article. The working life of the PVC pipe may be estimated in years.
- The system has been able to transfer around 82 m³ per day from one side of the false tunnel to the other without any mechanical assistance and has

tipo de accionamiento mecánico, y ha conseguido restituir el desnivel de freático desde los 3.50 m iniciales causados por el efecto barrera hasta un desnivel de equilibrio de unos 0.35 m.

- Este sistema tiene varias ventajas que lo hacen interesante en muchas aplicaciones de paso de freático, especialmente en comparación con el sifón inferior o de presión cuya tubería pasa por el interior del túnel:

- I. No es necesario perforar las pantallas del túnel, que es una operación complicada e incluso arriesgada.
- II. Puede instalarse en cualquier momento: antes de realizar la excavación del túnel, o después de estar el túnel en explotación.
- III. Si el sistema deja de funcionar por una fuga o fisura no existe ninguna consecuencia inmediata, mientras que en el sifón inferior puede llegar a inundarse el túnel, afectando a la explotación.
- IV. El mantenimiento y sustitución de la tubería (en el caso de que sea necesario) se realiza con facilidad desde el exterior, sin afectar a la explotación del túnel.
- V. La captación mediante pozo drenante es más eficaz que la captación mediante tubo-dren que utilizan algunos sistemas. Esto es así tanto en capacidad para captar caudal del acuífero, como en el procedimiento constructivo, más simple.

6. Agradecimientos

Los autores quieren mostrar su agradecimiento a Ferrocarriles de la Junta de Andalucía, a la Sociedad Concesionaria del Metro Málaga, a la Dirección de Obra (AYESA) y a la Empresa Constructora (UTE FCC-SANDO-COMSA-AZVI-VERA), por su colaboración en la realización de las pruebas del sifón de aspiración. ♦

managed to restore the difference in the water table from the initial 3.50 m caused by the barrier effect down to a balanced head difference of some 0.35 m.

- *This system has several advantages that make it of interest in many applications for the transfer of groundwater, particularly in comparison with the lower or pressure siphon where the pipe passes through the interior of the tunnel:*

- i. It is not necessary to perforate the tunnels walls, which is a complicated and potentially risky operation.*
- ii. It may be installed at any time: prior to excavating the tunnel or once the tunnel is already in operation.*
- iii. If the system stops working as a result of a leak or crack there are no immediate consequences as opposed to the case of the lower siphon which may cause the flooding of the tunnel and affect operation.*
- iv. The maintenance and replacement of the pipe (where necessary) may be readily performed from the outside, without affecting tunnel operation.*
- v. The capture by drainage well is more efficient than that by pipe-drain as used in certain systems. This with regard to both its capacity to capture flow from the aquifer and its simple construction procedure.*

6. Acknowledgements

The authors wish to express their gratitude to Ferrocarriles de la Junta de Andalucía, to the Metro Málaga Concessionary Company, to the Site Management (AYESA) and the Construction Company (Joint Venture: FCC-SANDO-COMSA-AZVI-VERA), for their collaboration in the testing of the suction siphon. ♦

Referencias/References:

1. Ingeoprés, nº 156 Enero-Febrero 2007, "Técnicas de drenaje para la estabilización de deslizamientos del terreno: Drains Siphons y Drains Electropneumatiques", por Ingrid de Lorenzo, Sebastián Bomont y Rafael Barriouveau.
2. S. Bomont, "Back experience from four landslides stabilized through lines of siphon drains in Normandy (France)", Rio de Janeiro 2004.

3. JC. Gress, "Dewatering a landslide through siphoning drain - Ten years experiences", 7th International Symposium on Landslide, Trondheim, 1996.
4. JC. Gress, "Two sliding zones stabilized through siphon drains", International Conference on landslide, slope stability of infrastructures, Singapore, 2002.
5. CSIRO, "Review of relief wells and siphons to reduce groundwater pressures and water levels in discharge areas to manage salinity", CSIRO

- de Australia (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), 2003.
6. N. Kresic, "Hydrogeology and Groundwater Modeling", CRC Press, 2007.
7. J. Santamaría Arias et al, "Sistemas para dar continuidad a los acuíferos afectados por la interposición de muros pantalla. Descripción tipológica y selección de soluciones", Jornadas sobre el agua y las infraestructuras en el medio subterráneo, AIH-GE, Barcelona, 24-26 de noviembre de 2008.