

Filtraciones y subpresiones en presas. La influencia de los flujos perpendiculares al cauce

Seepage and uplift in dams. The influence of flows perpendicular to the river bed

Andrés Sahuquillo Herraiz. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Valencia. Real Academia de Ciencias (España). asahuq@hma.upv.es

Resumen: En su célebre *Primera Lección Rankine* A. Casagrande reabrió el debate sobre el efecto de las pantallas de inyección, que, sin ser totalmente concluyente, considera que pueden ser ineficaces para reducir las subpresiones confiando exclusivamente en los drenajes para limitar las supresiones. Una consideración importante para las subpresiones en las presas, especialmente en rocas poco permeables en valles estrechos, no considerada expresamente hasta ahora es la componente del flujo subterráneo perpendicular al río. En esta situación la red de flujo que produce el drenaje de un río poco penetrante tiene una componente vertical ascendente que necesariamente tiene que tener potenciales hidráulicos superiores al nivel del río. Es el mecanismo analizado en el clásico trabajo de Hubbert de 1940. Este flujo puede inducir subpresiones en valles estrechos en algunas presas que se analizan en este trabajo. También se discute el posible efecto de las pantallas de inyección y drenaje en diversas situaciones de la relación río-acuífero y se dan los criterios para considerar la posibilidad de subpresiones altas en los estudios previos y durante el comportamiento posterior del embalse.

Palabras Clave: Embalses; Filtraciones; Drenajes; Río efímero; Río colgado; Karst

Abstract: Casagrande's *1st Rankine lecture* in 1961 reopened the debate of the effect and convenience of grout curtains. He concludes they can be ineffective in reducing dam uplift, trusting exclusively in drainage, without being fully conclusive. An important consideration for dam uplift in low pervious rocks in narrow valleys, not analyzed until now, is the groundwater flow component perpendicular to the river. The flownet induced by the river drainage holds an ascending vertical component, as presented in the classic paper by Hubbert in 1940. That flow can induce uplift in low pervious narrow valleys in several cases discussed in this paper. Grout curtain and drainage efficiency in dams is discussed for diverse situations of aquifer river relationship and some criteria are provided to analyze during preliminary studies the possibilities of high uplift occurrence and how reducing them.

Keywords: Dams; Leakage; Drainage; Ephemeral river; Perched river, Karst

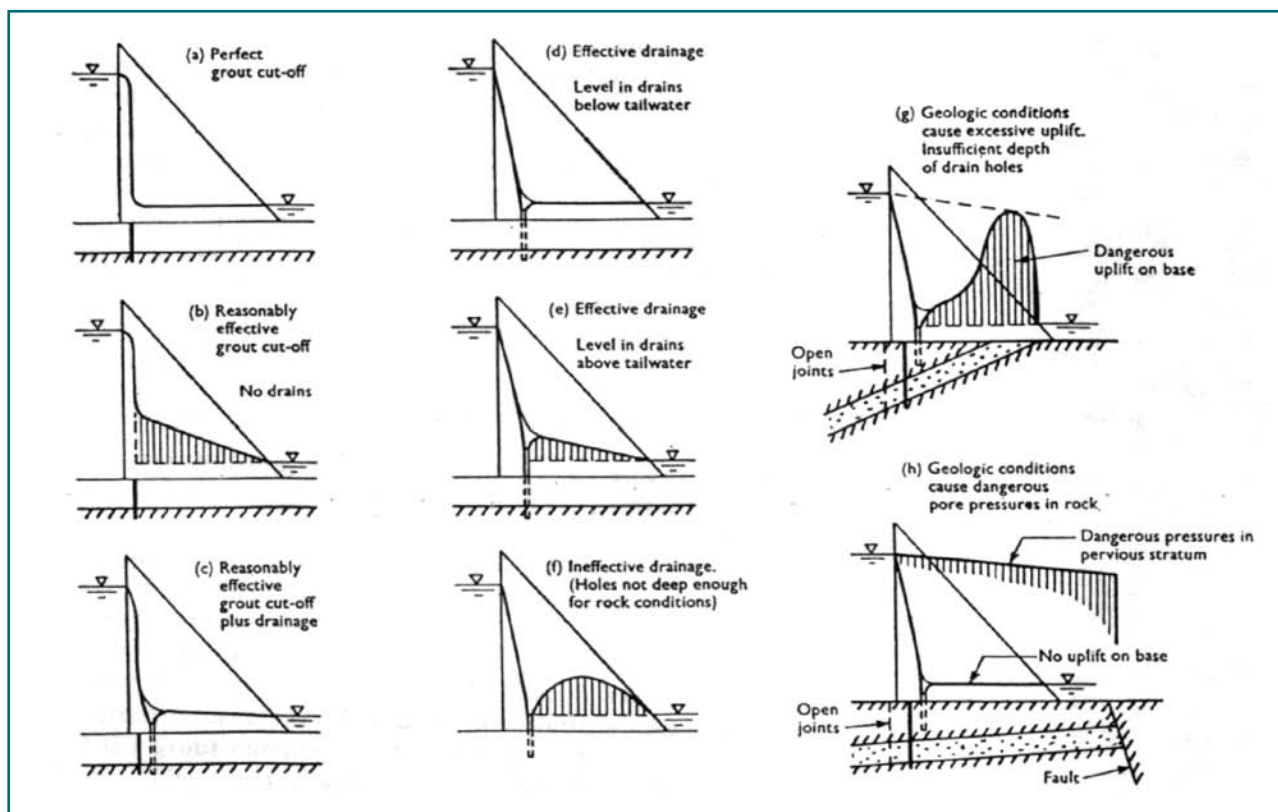
Introducción

Para controlar las filtraciones se suele recurrir a pantallas de impermeabilización situadas en el pié aguas arriba de la presa. Algunas veces se ejecutan varias líneas de sondeos, o se intercalan algunos a menor distancia o con mayor profundidad; pero no existen, ni se han formulado, criterios consistentes para su diseño que con frecuencia se basa en la *experiencia de casos análogos*, o siguiendo diferentes reglas o criterios. Una regla aun muy generalizada es la limitación de la permeabilidad que suele referirse en unidades Lugeon. La

Introduction

In order to control seepage it is common to resort to grout curtains set at the heel upstream of the dam. Various rows of bore holes are sometimes made or these are interspersed at closer distance or deeper: but there is not and has not been any constant criteria for their design and this is frequently based on the experience gained from similar cases or by following different rules or criteria. One rule that is still very widespread is the restriction of permeability considered in Lugeon units. A Lugeon

Fig. 1. Hipótesis de pantallas de inyección y drenaje. (Según Casagrande 1961)/Hypothesis of grout and drainage curtains. (According to Casagrande, 1961)



unidad Lugeon es muy pequeña, del orden de 10^{-7} m/s, y en la mayoría de los casos para que se produzcan filtraciones importantes harían falta conductividades hidráulicas muy superiores a las que se suelen exigir (Sahuquillo 1976). Para reducir las subpresiones lo habitual es perforar una pantalla de drenaje inmediatamente aguas abajo de la pantalla de inyección.

En la primera *Lección Rankine* del Instituto de Ingenieros Civiles británico el Profesor Arthur Casagrande (1961) reabrió el debate sobre la eficacia de las pantallas de inyección y drenaje en las presas para controlar las filtraciones y las subpresiones. La lección y su posterior publicación en *Geotechnique* reabrieron el debate sobre este tema. En ella considera que las pantallas de inyección no son fiables para reducir las filtraciones y que el único medio para controlar las subpresiones son drenajes de profundidad suficiente a lo largo de la base de la presa. Terzaghi (1929) que fiaba fundamentalmente en el drenaje para el control de las subpresiones ya había manifestado la misma opinión, y se mostraba escéptico sobre la eficacia de las inyecciones para realizar esa función, reclamando además la necesidad de que los ingenieros hidráulicos adquiriesen una formación integral en hidrodinámica subterránea.

unit is very small, of around 10^{-7} m/s, and in the majority of cases in which serious seepage occurs, it would be necessary to consider far greater hydraulic conductivities than those normally demanded (Sahuquillo 1976). In order to reduce uplift it is common to set a drainage curtain immediately downstream of the grout curtain.

In the first *Rankine Lecture* of the Institution of Civil Engineers, Professor Arthur Casagrande (1961) reopened the debate on the effect and convenience of grout and drainage curtains to control seepage and uplift. The lecture and its subsequent publication in *Geotechnique* reopened the debate on the subject. He cast doubt on the effectiveness of grout curtains to reduce seepage and maintained that the only means to control uplift was by employing drainage of sufficient depth along the base of the dam. Terzaghi (1929), who essentially trusted in drainage to control uplift, had indicated the same opinion and was sceptical of the efficiency of grout curtains to perform this function, going so far as to suggest the need for hydraulic engineers to gain an complete understanding of subterranean hydrodynamics.

Modelo conceptual de flujo y análisis hidrodinámico

Casagrande analiza el efecto de las pantallas con criterios hidrodinámicos. En la figura 1 muestra los resultados hipotéticos para diversas situaciones de pantallas de inyección y drenaje. La a) es una pantalla de inyección "perfecta" sin drenaje. La línea piezométrica baja por la impermeabilización hasta el nivel del pie de presa. La b) tampoco tiene drenaje y la inyección sería razonablemente efectiva. El nivel baja hasta un 50 % en el plano de la pantalla y luego desciende linealmente hasta el pie de presa. El caso c) sería el resultado de una pantalla de inyección relativamente efectiva con drenaje. Los d) y e) muestran el efecto que produciría una línea de drenes efectivos en los que su boca está al nivel del agua en el pie de presa o más alto. La figura f) es el efecto que produciría un drenaje poco penetrante en un medio permeable profundo. Las figuras g) y h) análogas a las propuestas por Terzaghi indican el peligro de situaciones geológicas desfavorables que pueden producir subpresiones elevadas que hay que corregir con drenajes que penetren en las formaciones permeables que ocasionan el problema.

La figura 2 tomada de Casagrande (1961) que la reproduce de TVA (1950), proporciona la subpresión teórica en la base de una presa de gravedad para un medio permeable, homogéneo e isótropo de profundidad infinita. La primera figura de la izquierda es la solución para el caso sin drenes; difiere de la lineal que se considera habitualmente. Las siguientes reflejan el resultado

Conceptual model of flow and hydrodynamic analysis

Casagrande analysed the effect of the curtains with hydrodynamic criteria. Figure 1 shows the hypothetical results for diverse situations of grout and drainage curtains. The situation shown in a) is that of a "perfect" grout cut off without drainage. The piezometric line goes down the curtain to the level of the heel of the dam. The case shown in b) similarly has no drains and the grout cut-off would be reasonably effective. The level drops down to some 50% in the plane of the curtain and then descends lineally to the toe of the dam. Case c) would be the result of a reasonably effective grout curtain plus drainage. Cases d) and e) show the effect caused by a line of effective drains set at levels below or above the tailwater. Figure f) is the result of ineffective drainage produced by not deep enough drains. Cases g) and h) are similar to those proposed by Terzaghi and show the danger of unfavourable geological situations which may cause excessive uplift which would have to be corrected by drainage penetrating into the permeable formations causing the problem.

Figure 2, taken from Casagrande (1961) which reproduces the TVA (1950) provides the theoretical uplift at the base of a gravity dam for a permeable, homogeneous and isotropic medium of infinite depth. The first figure to the left is the solution for the

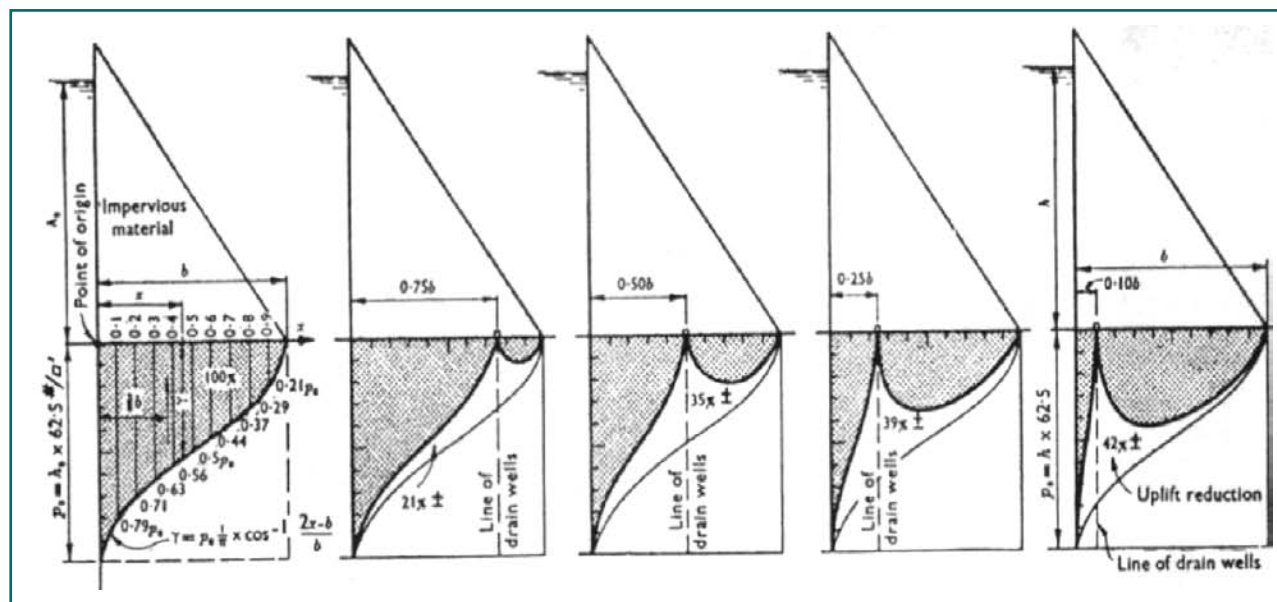


Fig. 2. Efecto de un dren puntual en la cimentación. Según Casagrande (1961), reproducido de TVA (1950)/ Effect of the positioning of drain wells at the base. According to Casagrande (1961), reproduction of TVA (1950)..

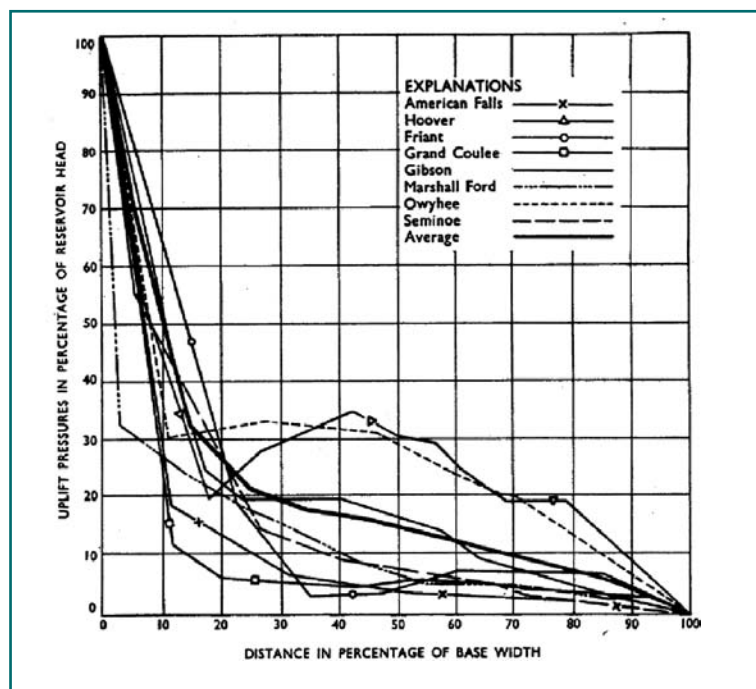


Fig. 3.
Subpresiones en
presas del
Bureau of
Reclamation.
Según
Casagrande
(1981)/Uplift
pressures in
Bureau of
Reclamation
dams.
According to
Casagrande
(1981).

en los que hay un dren poco penetrante (en realidad un dren perpendicular de profundidad nula) a distintas distancias entre el embalse y el pie de presa. Cuanto más próximo está el dren al embalse mayor es la reducción de la subpresión. Casagrande comenta que la reducción es mucho menor que la que se suele observar en la realidad y que no cabía esperar un ajuste mejor dado que tanto la presencia de un medio de permeabilidad homogénea de gran profundidad como la sustitución de sondeos profundos por un dren superficial son situaciones que difieren ampliamente de las reales. Sugiere que el aumento de la subpresión aguas abajo como el que se refleja en la figura 1f puede deberse a poca profundidad en los drenes. Además como las formaciones más superficiales suelen ser más permeables propugna perforar drenes más profundos para aumentar su eficacia.

En la figura 3, se dan las subpresiones medias en la base de 8 presas del Bureau of Reclamation. En dos de ellas la de Hoover y la de Owyhee hay una subpresión por encima de los criterios de cálculo del Bureau. En la figura 4a se pueden ver con más detalle las subpresiones en una de las secciones perpendiculares a la de Hoover en la que eran muy superiores a las de los criterios de cálculo. Para los análisis de estabilidad en las presas de gravedad el criterio del Bureau era que la subpresión baja desde la altura del agua en el embalse en el pie aguas arriba de la presa hasta un tercio de

case without drains and differs from the line usually considered. The following figures show the result in cases where there is a shallow drain (in all reality a drain of null depth) at different distances between the heel and the toe of the dam. The closer the drain is to the heel, the greater the reduction in uplift. Casagrande indicated that the reduction is far lower than that normally observed in reality and that it was not possible to expect greater adjustment as both the presence of a medium of homogeneous permeability of great depth and the replacement of deep wells by a surface drain are situations that widely differ from reality. He suggests that the increase of uplift downstream such as that shown in Fig. 1f may be due to the shallow depth of the drains. Furthermore, as the more superficial formations tend to be more permeable it is suggested that deeper drains be bored to increase their efficiency.

Figure 3 gives the average uplift at the base of 8 dams pertaining to the Bureau of Reclamation. In two of these, the Hoover and Owyhee dams, there is an uplift over the design criteria of the Bureau. Figure 4a shows a more detailed view of the uplift in one of the sections perpendicular to the Hoover dam and where this was very much higher than the design criteria. For the stability analysis of gravity dams, the Bureau's criteria was that the uplift dropped from the height of the water at the reservoir head at the upstream heel of the dam down to a third of this height at the row of drains and then lineally from this point to the level of the tailwater. This then made it necessary to make a considerable amount of additional grouting and drainage work which finally managed to reduce the uplift to that shown in figure 4b. One interesting detail here is that water was seen to come out at very high temperature at some of the drains.

Casagrande attempted to justify the supposed inefficiency of a single grouting curtain with arguments that do not need to be discussed here, and he contended that in order to reduce the uplift it was far more efficient to set small diameter drains, deeper than usual, at the base of the dam down to the tailwater and at the sides. He coincides with Terzaghi (1929) in that in the case of doubt regarding the geological characteristics, it is necessary to measure the uplift at the base of the dam and bore drains to eradicate any possible doubt.

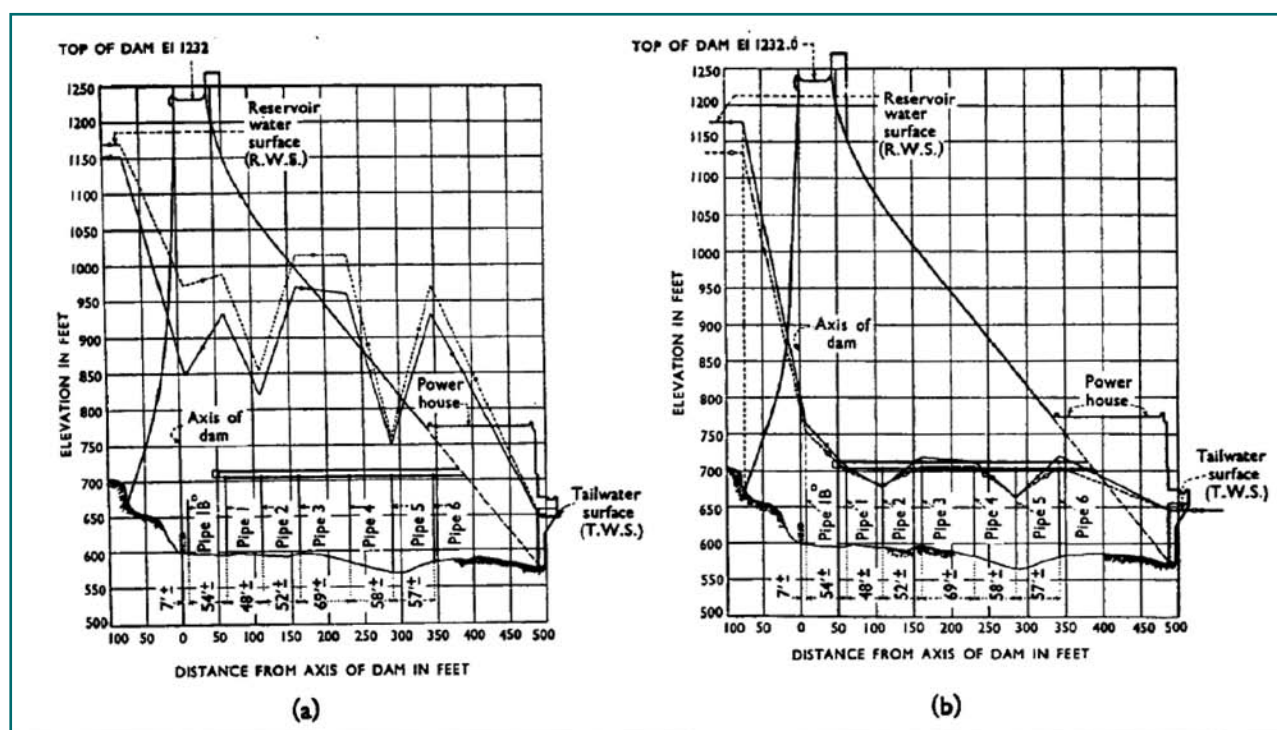


Fig. 4.
Subpresiones en la presa de Hoover antes de hacer trabajos adicionales extensos de impermeabilización y drenaje (a) y (b) después de hacerlos. Tomado de Casagrande (1961)/Uplift at the Hoover dam prior to conducting extensive additional grouting and drainage work (a) and (b) after conducting these works. Taken from Casagrande (1961).

esa altura en la línea de drenes y desde este punto linealmente hasta el nivel de aguas en el pie de presa. Esto indujo a realizar trabajos adicionales muy importantes de inyección y drenaje que finalmente redujeron las subpresiones a las de la figura 4b. Un detalle interesante es que en algunos drenes surgió agua a temperatura elevada.

Casagrande trata de justificar la supuesta ineficacia de una pantalla única de impermeabilización con argumentos que no es del caso discutir aquí, y afirma que para reducir las subpresiones es mucho más eficiente perforar drenes de pequeño diámetro, más profundos que lo habitual, en la base de la presa hasta aguas abajo y en las laderas. Coincide con Terzaghi (1929) en que cuando existan dudas sobre las características geológicas, se deben medir las subpresiones en la base de la presa y perforar drenes para eliminar cualquier duda al respecto.

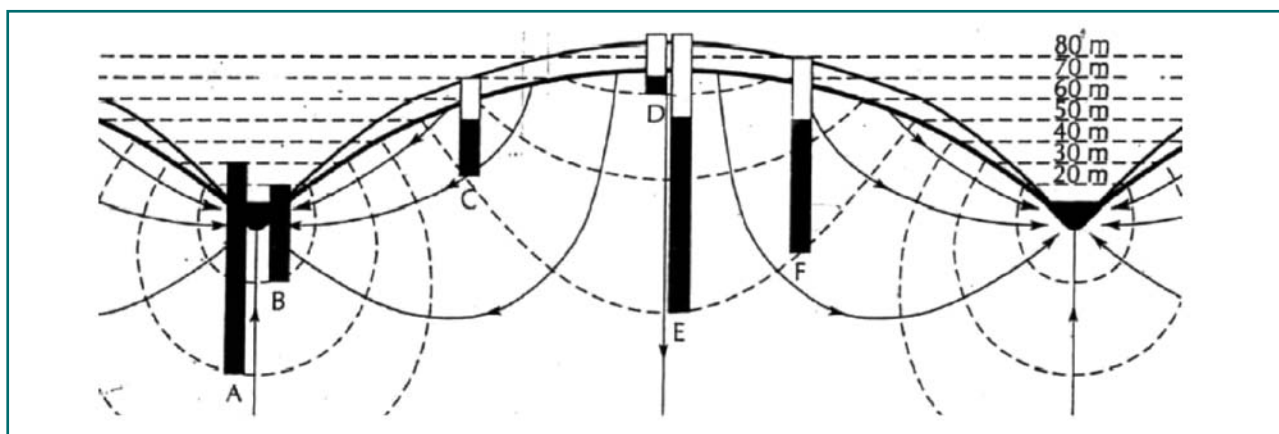
La componente de flujo perpendicular al río

En los análisis que se realizan habitualmente para el flujo bajo las cimentaciones de presas no se tiene en cuenta la componente de flujo perpendicular al río, que en algunos casos puede producir efectos im-

The groundwater flow component perpendicular to the river

The analysis of the flow below the bases of dams does not normally consider the flow component perpendicular to the river which, in some cases, can cause important effects with respect to uplift. We shall attempt to analyse this aspect below. The flownet perpendicular to an outflowing river presented by Hubbert (1940), see Fig. 5, leads on to the conclusion that high piezometric gradients perpendicular to the river bed, such as in narrow valleys in low-permeability formations, may give rise to important uplift in the base of a dam constructed at this point. The well bores with slotted casing at the lower part will be flowing wells as may be seen in Fig. 5. The construction of a dam will modify the boundary condition by preventing the flow from rising at atmospheric pressure at the foundation base. This will then lead to important uplift which cannot be prevented by a "perfect" impermeable curtain, and a row of drains set immediately downstream will only be partially effective. This situation exists in narrow valleys and in low-permeability formations, such as at the Hoover Dam at the bottom of the Grand Canyon in Colorado which drains the large peneplain set over 1000m above the river bed.

Fig. 5. Red de flujo en una sección perpendicular a un río en un acuífero homogéneo. Fetter (2001) modificado de Hubbert (1940)/Flownet of a section perpendicular to a river in a homogeneous aquifer, Fetter (2001) modified from Hubbert (1940).



portantes sobre las subpresiones. En lo que sigue trataremos de analizarlo. La red de flujo perpendicular a un río ganador presentada por Hubbert (1940), ver figura 5, hace pensar que cuando existen gradientes piezométricos elevados perpendiculares al cauce, por ejemplo en valles estrechos en formaciones poco permeables, podrían producirse subpresiones importantes en la base de una presa que se construyese en ese punto. Los sondeos ranurados en su parte inferior, si están próximos al río, serían surgentes, tal como se ve en la figura 5. La construcción de una presa modificaría la condición de contorno al impedir que el flujo saliese en la base de la cimentación a la presión atmosférica. En definitiva se producirán subpresiones importantes, subpresiones que no se pueden evitar con una pantalla de impermeabilización "perfecta", y que una línea de drenes situada inmediatamente aguas abajo solo sería efectiva parcialmente. Esta situación existe en cerradas estrechas y formaciones poco permeables, como en la presa de Hoover en el fondo del Gran cañón del Colorado que dreña la gran penillanura situada más de 1000 m por encima del cauce del río.

Presa de Hitokura, (Japón)

La presa de Hitokura en Japón ha tenido subpresiones importantes. Es una presa de 75 m de altura cimentada en pizarras y esquistos con intrusiones complejas de pórfidos. La pantalla de impermeabilización tiene una profundidad entre 70 y 100 m y se extiende en las dos laderas unos 100 m. Los sondeos de inyección están separados normalmente 1,5 m, excepto en dos zonas donde la roca estaba más fisurada en los que la separación se redujo a 0.75 m, y en las laderas y en los en los 20 o 30 m más profundos de la pantalla donde la sepa-

Hitokura Dam (Japan)

The Hitokura Dam in Japan has sustained considerable uplift. The foundations to this 75 m high dam are set in shales and schists with complex porphyric intrusions. The grout curtain has a depth of between 70 and 100 m and extends some 100 m out on the two slopes. The grouting bores are normally spaced every 1.5 m except in two areas where the rock was more fissured and where the spacing was reduced down to 0.75 m, and on the slopes and in the lower 20 or 30 m of the curtain where the spacing was increased to 3 m. In order to monitor the performance of the grout curtain, 65 m deep wells were bored in the central blocks of the whole dam and revealed very little permeability, of between 1 and 2 Lugeon, and the areas with greater permeability were then grouted. The arrangement of the drains throughout the dam and in the two crosscuts may be seen in figures 6, 7a and 7b. These are spaced every 5 m and penetrate 10 m into the rock. 56 Bourdon pressure gauges were installed to measure the uplift. The figure also show six pressure meters, P.1 to P.6, that were installed in block 13 to measure the interstitial pressure and four more in blocks 9, 10, 11 and 12 downstream.

During the filling of the dam, uplift was detected above design criteria which was then reduced by boring drains from the energy dissipation basin, see figures 6 and 7b. Figures 7 a and b clearly show the flow from the sides perpendicular to the river, and this latter figure similarly shows the reduction in uplift after the setting of the drains, together with the movement of isopiestic line 100 back towards the slopes and the appearance of line 90 not present in figure 7a. It is

ración aumentó a 3 m. Para comprobar el comportamiento de la pantalla de impermeabilización se perforaron sondeos de 65m de profundidad en los bloques centrales de toda la presa, encontrándose una permeabilidad muy pequeña, entre 1 y 2 Lugeon y se inyectaron las zonas con mayor permeabilidad. La disposición de los drenes se puede ver en las figuras 6, 7a y 7b a lo largo de la presa y en dos galerías transversales. Tienen una separación de 5 m y penetran 10 m en la roca. Para medir las subpresiones se instalaron 56 medidores de presión Bourdon. También se pueden ver en estas figuras seis presiometros, P.1 a P.6 instalados en el bloque 13 para medir la presión intersticial y cuatro más en los bloques 9, 10, 11 y 12 aguas abajo.

En el llenado de la presa se detectaron subpresiones por encima de las de diseño que se redujeron al perforar los drenes desde el cuenco de disipación de energía, ver figuras 6 y 7b. En las figuras 7 a y b se ve claramente el flujo desde las laderas perpendicular al río. Y en la figura 7b se como se reducen las subpresiones después de la perforación de los drenes de pié, como la isopieza 100 se retira hacia las laderas y como aparece la 90 que no estaba en la figura 7a. Es evidente que una pantalla de inyección absolutamente impermeable no reduciría las subpresiones en la presa. Esta es una situación distinta de las que se contemplan en la figura 1 donde no se considera la componente transversal del flujo. También difiere de la subida de la subpresión que

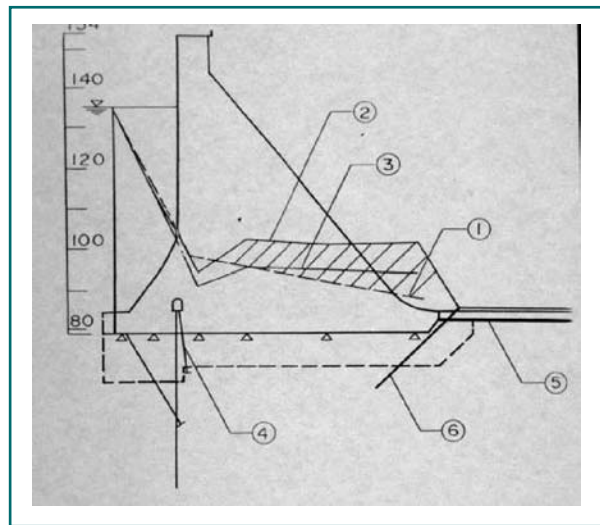
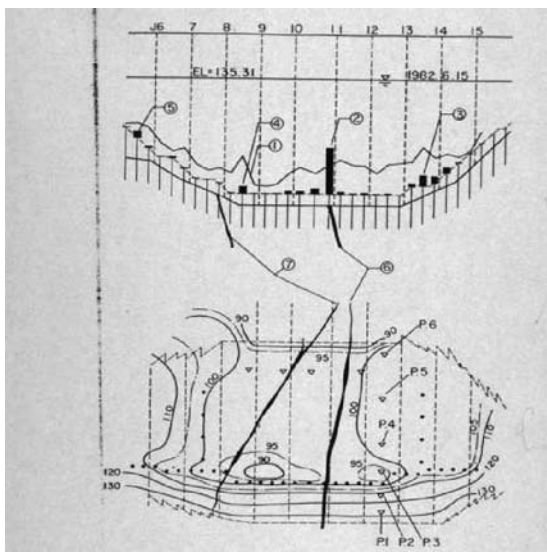


Fig. 6.
Subpresiones
en la presa de
Hitokura. Según
Sugimura &
Miura
(1985)/Uplift in
the Hitokura
Dam.
According to
Sugimura &
Miura (1985).

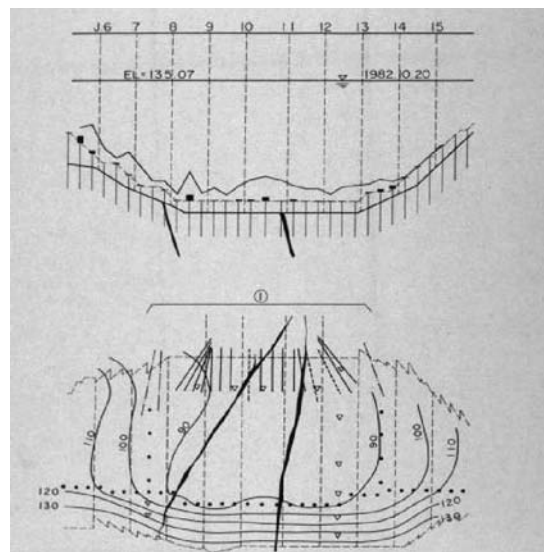
obvious that an entirely impermeable grout curtain will not reduce the uplift in the dam. This is a different situation to that considered in Fig. 1 where the transversal component of the flow was not taken into account. This also differs from the rise in uplift shown in Fig. 1f or in Fig. 2 downstream of the drains close to the reservoir. Here they appear as a result of the flow component perpendicular to the river.

El Pardo Dam, Madrid.

Figure 8 is a vertical section of the flownet of the Fosa del Tajo Miocene aquifer perpendicular to the



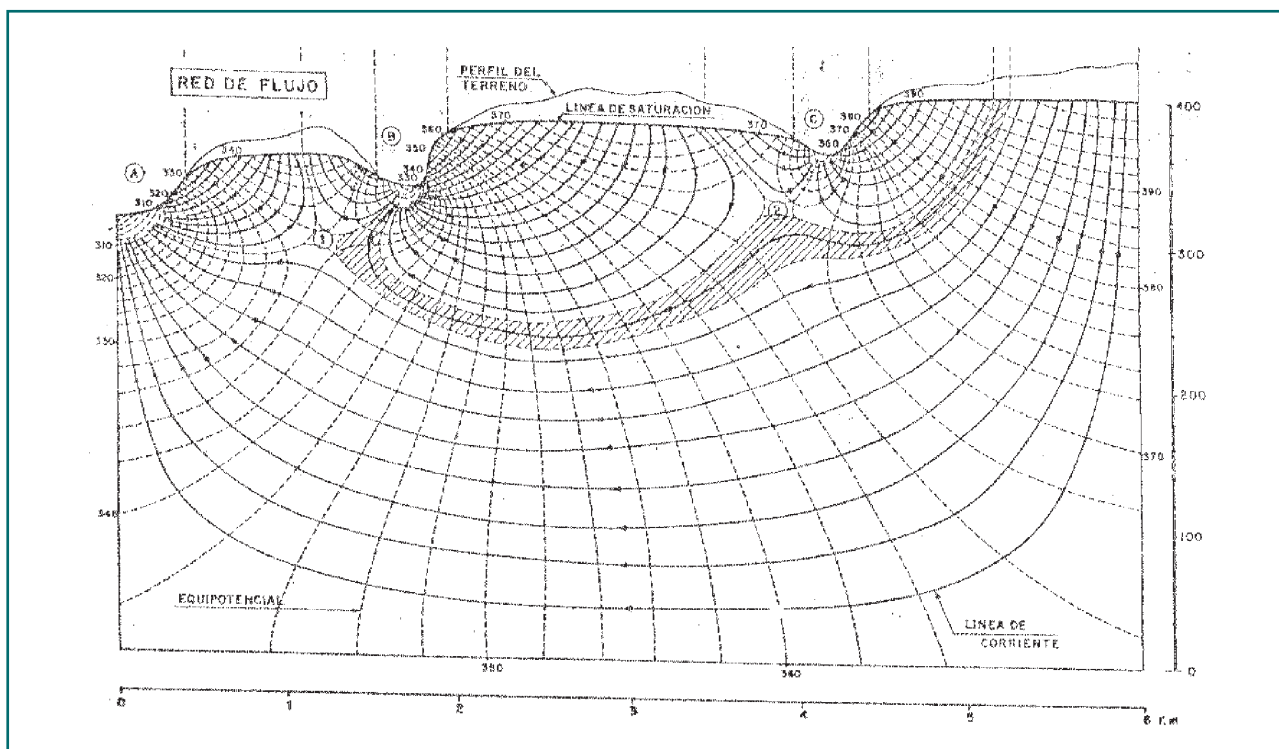
7a



7b

Fig. 7.
Distribución de
las subpresiones
y filtraciones
antes y después
de la
construcción de
los drenes de
pié, Sugimura &
Miura
(1985)/Distributi
on of uplift and
seepage before
and after the
construction of
the base drains,
Sugimura &
Miura (1985).

Fig. 8. Sección vertical de flujo perpendicular a los ríos Manzanares, Guadarrama y Alberche. López Camacho (1977)/Vertical section of the flow perpendicular to the Manzanares, Guadarrama and Alberche rivers. López Camacho (1977).



aparecen en la figura 1f o en la figura 2 aguas debajo de los drenes próximos al embalse. Aquí aparece como consecuencia de la componente de flujo perpendicular al río.

Presa de El Pardo, Madrid

La figura 8 es un sección vertical con la red de flujo del acuífero del Mioceno de la Fosa del Tajo normal al río Manzanares aguas arriba de Madrid. Es un ejemplo ya clásico de la presencia de flujos, locales, intermedios y regionales como los describe Toth (1963). El río de la derecha de la sección (con la letra C) es el Manzanares, precisamente en la zona donde está la Presa de El Pardo, los flujos locales de la parte superior del acuífero que van al río, tienen una componente vertical ascendente que son los que producen las subpresiones en esta presa. La figura 9 es una sección vertical de la presa en la que se puede ver que los piezómetros profundos tienen un potencial hidráulico mayor correspondiendo a la pérdida de potencial debido a los flujos ascendentes. El acuífero que está bastante explotado en otras zonas lo está menos en esta, donde una bajada de niveles provocado por la explotación de pozos en la zona sería en cualquier caso favorable para la estabilidad de la presa.

River Manzanares upstream of Madrid. This is a now classic example of the presence of local, intermediate and regional flows as described by Toth (1963). The river on the right of the section (marked by the letter C) is the Manzanares, precisely in the area of El Pardo Dam and where the local flows of the upper part of the aquifer that go to the river have an ascending vertical component that produce the uplift in this dam. Figure 9 is a vertical section of the dam which shows that the deep observation wells have a greater hydraulic potential corresponding to the loss of potential due to the rising flows. The aquifer, widely exploited in other areas, is less so at this point where a drop of levels caused by the operation of wells in the area would prove favourable for the stability of the dam.

There tends to be little information about the uplift in the foundations of dams as it is not common to bore observation wells and it is even less common to distribute these throughout the entire foundation. However, in some of these there have been seen to be increases in uplift downstream, such as those found at the Bao dam on the Bibey River (see Figure 10). This may be considered as a replica of the arrangement shown in figure 2 as commented above. However, on account of the low permeability of the local formations and the high rainfall in the areas, it is more

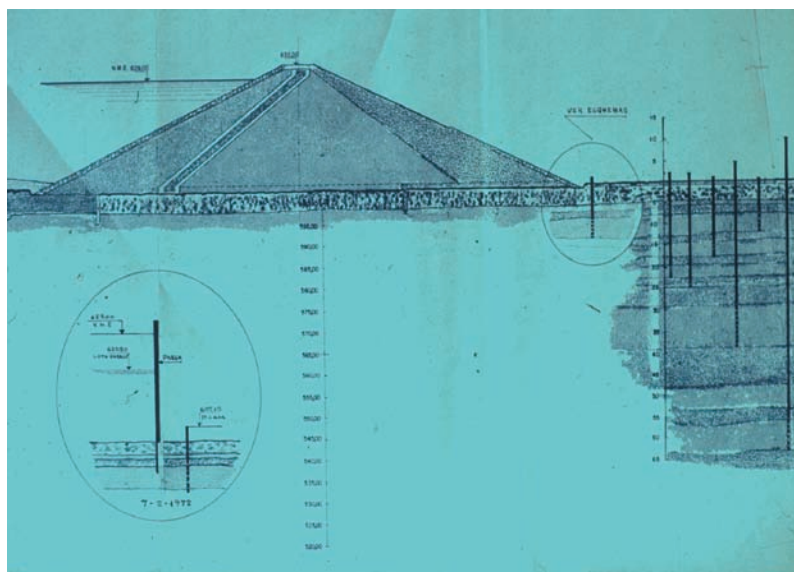


Fig. 9. Sección de la presa de El Pardo/Section of El Pardo dam.

En general se dispone de poca información sobre las subpresiones en la cimentación de las presas, al no ser habitual la perforación de piezómetros. Y aun es menos habitual distribuirlos por toda la cimentación. Pero en alguna aparece un aumento de las subpresiones aguas abajo, por ejemplo en la de Bao en el Río Bibey, (ver figura 10). Podría interpretarse como una réplica del esquema de la figura 2 que se comentaba antes. Pero dada la poca permeabilidad de las formaciones locales y la elevada precipitación en la zona, es más lógico pensar que este también es un caso de existencia de gradientes piezométricos importantes desde las laderas.

Como identificar situaciones análogas

La componente vertical ascendente del potencial hidráulico en la cerrada de una presa es más probable en una cerrada profunda y estrecha, en formaciones poco permeables, con recarga grande, en las que el río actúe de dren. Se pueden identificar fácilmente si se miden sistemáticamente los niveles durante la perforación de los sondeos de reconocimiento y se instalan piezómetros abiertos en una longitud de 4 a 6 m a distintas profundidades, sellando o inyectando cuidadosamente los tramos superiores. Los piezómetros deben medirse periódicamente durante la construcción y el llenado del embalse y posteriormente durante la operación de este. Si se detectase durante la fase de exploración

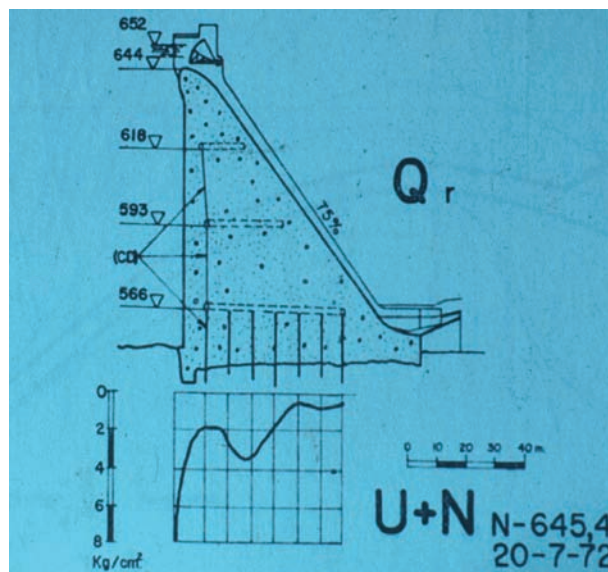


Fig. 10. Subpresiones en la Presa de Bao, (Comité Español de Grandes Presas)/Uplift in the Bao Dam (Spanish National Committee on Large Dams).

logical to presume that this is also down to the presence of considerable piezometric gradients from the slopes.

How to identify similar situations

The vertical rising component of the hydraulic head in the valley of a dam is more probable in deep and narrow valleys, in low-permeability formations with large rainfall recharge and where the river acts as a drain. This may be readily identified if there is a systematic measurement of the levels during the boring of the geotechnical boreholes and the installation of 4- 6 m long open piezometers at different depths and the upper parts carefully sealed or grouted. The hydraulic head should be periodically measured during the construction and filling of the reservoir and subsequently during the operation of the same. If an increase in piezometric level is noted in relation to depth during the exploratory stage, it is then possible to design more intense drainage work. The drainage bores should not be purely located in the lowest gallery of the dam downstream of the potential grout curtain, but also at points throughout the base. These may also be perforated from the toe of the dam and from access galleries. These may take the form of vertical or sloping bores both towards the slopes and towards the river. It is also convenient to place piezo-metres at different depths throughout one or two profiles on the base of the dam.

un aumento del nivel piezométrico con la profundidad se puede proyectar un drenaje más intenso. Los sondeos de drenaje no se localizarían solamente en la galería más baja de la presa aguas abajo de la posible pantalla de inyección, sino también a lo largo de toda su base. También se pueden perforar desde el pie de presa y desde galerías de acceso. Pueden ser sondeos verticales e inclinados tanto hacia las laderas como hacia el río. Sería conveniente que también se situasen piezómetros de observación a diversas profundidades a lo largo de uno o dos perfiles en la base de la presa.

Ríos perdedores y ríos efímeros

En los ríos perdedores se da una situación absolutamente distinta a la descrita hasta ahora. Los ríos con un nivel superior al nivel freático del acuífero son necesariamente perdedores. Cuando las pérdidas superan el caudal que les pueda llegar desde aguas arriba son ríos efímeros en los que no circula agua excepto como respuesta a lluvias intensas. Son típicos de las zonas áridas y semiáridas o de zonas kársticas con algún relieve. Cuando por efecto de una lluvia más intensa llega agua a un cauce efímero se produce la infiltración, creándose un bulbo descendente de flujo saturado que es alimentado por la pérdida de caudal del río. Considerando la profundidad del frente de saturación por debajo del río D , el caudal de filtración Q por unidad de longitud de río, se puede estimar con la fórmula de Green-Ampt, que despreciando el efecto de la tensión negativa debajo del frente de saturación queda:

$$Q = W \cdot k \frac{H+D}{D}$$

Siendo k la conductividad hidráulica vertical saturada y W el ancho medio del flujo saturado descendente. Al ser D pequeño al principio del episodio de filtración el caudal se hace muy grande disminuyendo después asintóticamente al valor $W \cdot k$, si D tuviese un valor infinito.

En el embalse de Maria Cristina los niveles en el acuífero a embalse vacío están a más de 60 m bajo el cauce. El embalse se llena con las avenidas que se producen después de lluvias intensas, normalmente en otoño, con subidas de los niveles piezométricos de hasta 50 o más metros en pocas horas. En la presa de

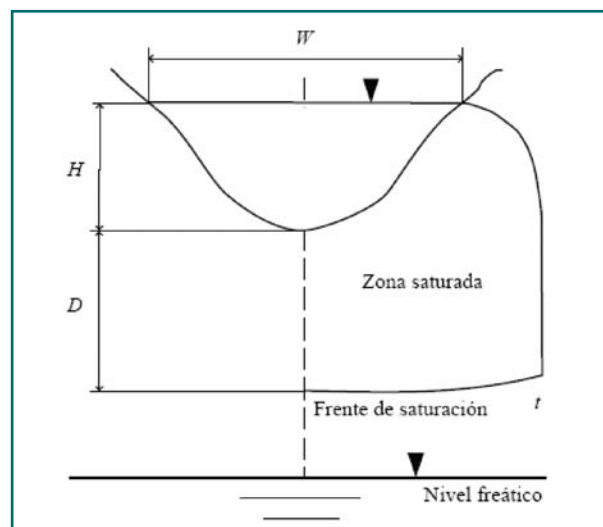


Fig. 11. Río efímero/Ephemeral river.

Influent stream and ephemeral rivers

In influent streams the case is different to that described above. Rivers with a level above to the phreatic level of the aquifer have lose water. When the loss of water is greater than the flow they may receive upstream these then become ephemeral rivers where water only circulates after intense rainfall. These are typical of arid or semi-arid areas or karstic terrain with some relief. When water reaches an ephemeral channel after intense rain, this produces seepage, creating a descending bulb of saturated flow fed by the river losses. When taking the depth of the face of saturation to be below a river D , the filtration flow Q per unit length of river may be estimated by the Green-Ampt formula, which on ignoring the effect of negative stress below the saturation face, gives:

$$Q = W \cdot k \frac{H+D}{D}$$

Where k is the vertical saturated hydraulic conductivity and W the average width of the descending saturated flow. As D is small at the beginning of filtration, the flow becomes very large and then asyntotically decrease to value $W \cdot k$, if D is of infinite value.

In the Maria Cristina reservoir the levels in the aquifer are more than 60 m below the river bed when the reservoir is empty. The reservoir is filled with

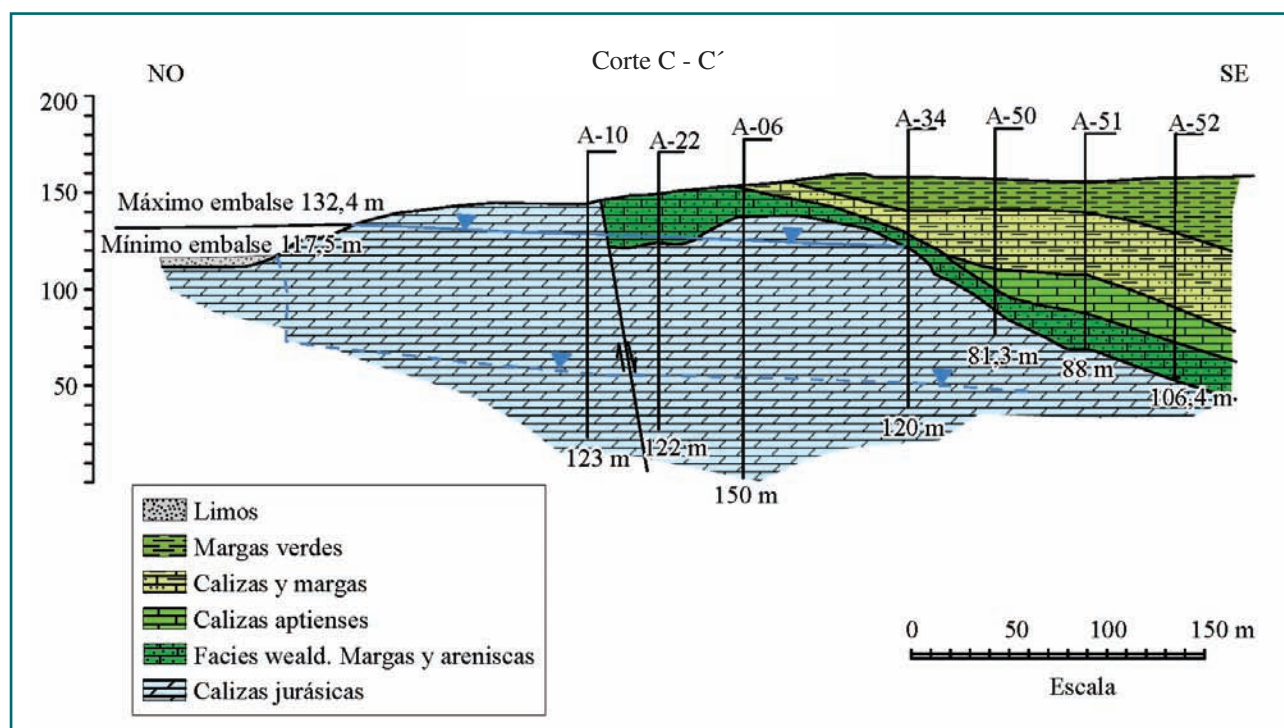


Fig. 12. Corte hidrogeológico por el Embalse de María Cristina/
Hydrogeological section of the Maria Cristina Reservoir.

María Cristina no llegan a alcanzar en ningún caso el nivel del cauce aguas abajo ni aun con el embalse lleno, y no tiene sentido la perforación de drenes para reducir subpresiones. Esta situación de la relación río-acuífero es la causa de las filtraciones de los embalses construidos en ríos efímeros en formaciones calizas del mediterráneo español; María Cristina, Sichar, Foix, Isbert, etc. En la figura 12 se muestra un corte hidrogeológico del embalse de María Cristina con los niveles piezométricos a embalse lleno y a embalse vacío. En la figura 13 se pueden ver las variaciones de los niveles en el embalse en un año hidrológico típico; antes y después de un llenado muy rápido del embalse en otoño y su vaciado a lo largo del año y la campaña de riego. Probablemente las pérdidas del embalse en los primeros momentos pudieran superar a los 20 metros cúbicos por segundo. A embalse lleno se estabilizan a un metro cúbico por segundo.

En casos de formaciones con permeabilidad media o alta el río puede ser ganador drenando el acuífero con gradientes hidráulicos pequeños, por lo que la componente vertical ascendente del potencial hidráulico sería pequeña. Las subpresiones en la presa están condicionadas por los niveles en las laderas. Es un problema de flujo en medio permeable que depende estrictamente: de la forma, dimensiones, permeabilidad y condiciones en los límites del acuífero;

the floods that occur after intense rainfall, normally in autumn, and which result in a rise in the piezometric levels of up to 50 or more meters in just a few hours. At the Maria Cristina dam these waters never reach the level of the river bed downstream even when the reservoir is full and it would make no sense to perforate drains to reduce uplift. This river-aquifer relationship is the cause of seepage in reservoirs built on ephemeral rivers in limestone formations on the Spanish Mediterranean: Maria Cristina, Sichar, Folx, Isbert, etc. Figure 12 shows the hydrogeological section of the Maria Cristina reservoir with the piezometric levels for a full and empty reservoir. Figure 13 shows the variations in the levels of the reservoir for a standard hydrological year: before and after the rapid filling of the reservoir in Autumn and the draining of the same throughout the rest of the year, together with irrigation periods. The losses from the reservoir over the initial moments probably exceed 20 cubic metres per second but once the reservoir is full these steady out to one cubic metre a second.

In cases of formations of medium to high permeability, the river may be effluent and drain the aquifer with small hydraulic gradients and where the ascending vertical component of the hydraulic head will only be very small. The uplift in the dam is

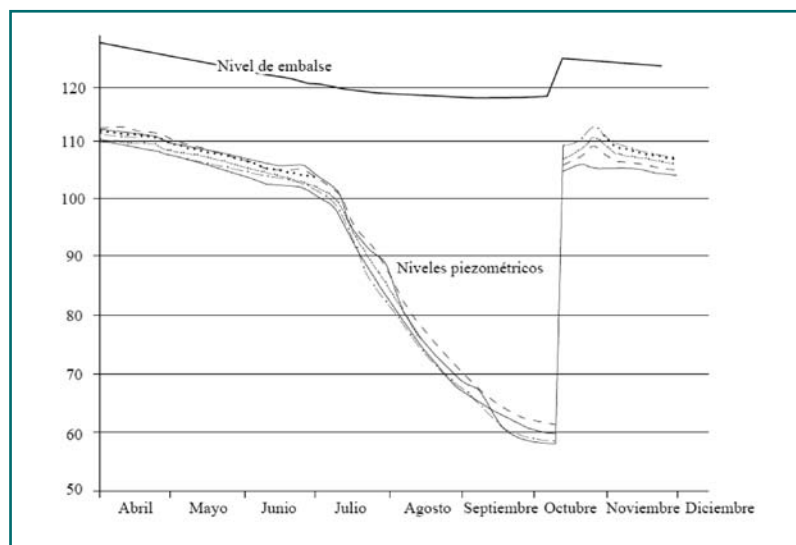


Fig. 13.- Presa de María Cristina. Niveles del embalse y piezómetros/Maria Cristina Dam. Reservoir and piezometric levels.

incluyendo la relación con el río aguas abajo, de la localización y profundidad de los drenes de la recarga de agua de la formación, debido a la lluvia y los flujos que atraviesa o contornean la pantalla. Con una pantalla efectiva y drenes situados adecuadamente parece posible conseguir subpresiones reducidas en la mayoría de las presas de Bureau que aparecen en la figura 3; y en la mayoría que se citan en este artículo.

En muchas presas en formaciones calizas permeables muy karstificadas se han conseguido controlar las filtraciones, como es el caso de las presas de Camarasa y Canelles (Lugeón 1933, Saez et al 1978). En estos casos el potencial hidráulico aguas abajo suele estar próximo al nivel del río y no suele haber problema de subpresiones. En las formaciones poco permeables puede ser difícil conseguir una reducción suficiente de la permeabilidad del terreno para que se produzca un escalón acusado en las subpresiones hacia aguas abajo y además en cauces profundos y estrechos se pueden presentar los problemas de flujos perpendiculares al cauce que se comentan en los párrafos anteriores.

Otras situaciones

En el embalse de Contreras, antes del llenado del embalse el nivel piezométrico en el acuífero estaba 40 metros bajo el cauce a la altura de la cerrada principal. En este embalse se presentaron dos problemas en relación con el flujo subterráneo. El primero el de las grandes filtraciones como consecuencia de la

condicionada por los niveles en las laderas. El problema de flujo en un medio permeable depende estrictamente de la forma, dimensiones, permeabilidad y condiciones en los límites del acuífero; y incluye la relación con el río aguas abajo, la ubicación y profundidad de los drenes, la recarga de la formación en forma de lluvia y los flujos que pasan a través y rodean la pantalla. Una pantalla efectiva y drenes adecuadamente ubicados proporcionarían una reducción de la subpresión en las presas de Bureau que aparecen en la Fig. 3 y en la mayoría de las referidas en este trabajo.

En muchas presas en permeables y altamente karstificadas formaciones de piedra caliza se ha podido controlar la seepage, como fue el caso en las presas de Camarasa y Canelles (Lugeón 1933, Saez et al 1978). En estos casos el potencial hidráulico aguas abajo tiende a estar próximo al nivel del río y no suele causar normalmente problemas de subpresión. En formaciones de baja permeabilidad puede ser difícil conseguir una reducción suficiente de la permeabilidad del terreno para permitir una caída brusca de la subpresión aguas abajo y en cauces profundos y estrechos puede haber problemas de flujos paralelos al lecho del río como se comentó anteriormente.

Other situations

Prior to the filling of the Contreras reservoir, the piezometric level in the aquifer was 40 metres below the bed at the height of the main dam. Two problems arose at this reservoir with respect to the groundwater flow. The first being the large seepage as a result of the high transmissivity of the Lias aquifer, indicated as L_3 in figure 14. This is a highly permeable and karstified formation and this made it impossible to conduct "Lugeon" tests as every time a bore was made there was a total loss and the water levels remained at 40 m below the river and it was not possible to raise the pressure. As an alternative, tests of the rise in level were made by boring down to some tens of metres in the L_3 and injecting a flow of water of around 1 l/s and where the level was measured to rise from several metres to less than a centimeter. Two wells were also bored and pumping tests were carried out and the drawdown measured in various nearby piezometers. Injections of around 20 l/s were also made in bores to measure the water rise in nearby piezometer.

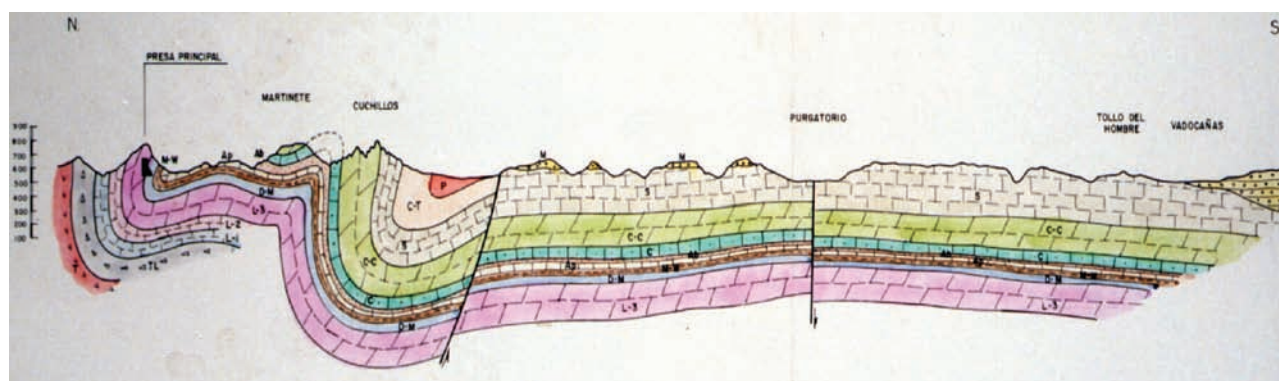


Fig. 14. Corte geológico aguas abajo del embalse de Contreras/Geologic section downstream of the Contreras reservoir.

gran transmisividad del acuífero del Lias, el L₃ en la figura 14. Es una formación muy permeable y karstificada. En esa formación los ensayos "Lugeon" no se pudieron realizar pues después de perforar algún metro en ella se producía pérdida total quedando los niveles agua en el sondeo a 40 m bajo el río y no se conseguía subir la presión. En su lugar se hicieron ensayos de subida de nivel en los que cuando se había penetrado alguna decena de metros en el L₃ inyectando un caudal de agua del orden de 1 l/s el nivel subía desde algunos metros a menos de un centímetro. Además se perforaron dos pozos en los que se hicieron ensayos de bombeo midiendo los descensos en varios piezómetros próximos. También se hicieron inyecciones del orden de 20 l/s en sondeos midiendo los ascensos en piezómetros. En algún sondeo se detectaron cavidades, algunas de varios metros. La formación no aflora aguas abajo del embalse, ni donde aparecieron las filtraciones que llegaron a alcanzar 3 m³/s, a unos 8 Km. en la derecha de la figura, donde existían, (y siguen existiendo), los manantiales de Vadocañas en el río Cabriel. Estos manantiales son la salida del acuífero del Cretácico Superior, situado fundamentalmente en la margen derecha del río Cabriel al Oeste. Como era de esperar, una vez iniciado el llenado del embalse, los niveles subieron rápidamente en todos los piezómetros situados en la formación L₃. Su evolución se puede ver en la figura 15 junto con la evolución del nivel del embalse cuyas variaciones siguen de forma inmediata, prácticamente sin retrasos. En la figura también aparecen las variaciones de caudal de una filtración que apareció al pie de la presa principal, en su margen izquierda, ver figura 16. La filtración, que se selló después de dos intentos, aparece como consecuencia de una rotura producida por el empuje de un diapiro salino situado al Noroeste de la cerrada principal que es el que da lugar al

Caves of up to several metres high were detected in a number of the observations. There was no formation outcrop downstream of the reservoir nor at points where the seepage reached up to 3 m³/s, some 8 km away, on the right of the figure, at the point of the Vadocañas springs on the river Cabriel. The primitive springs came from a Late Cretaceous aquifer, set primarily on the right bank of the river Cabriel to the west. As soon as the reservoir was filled, and as was expected, the levels rose rapidly in all the observation wells set in the L₃ formation. Their evolution may be seen in figure 15 together with that of the reservoir level and where the variations occurred immediately and almost without any lapse in time. The figure also shows the flow variations caused by seepage appearing at the foot of the main dam on the left bank (see fig. 16) The seepage which was finally sealed after two attempts, appeared as a result of a fracture caused by the thrust of a saline diapir set to the northwest of the main narrows which gave rise to the inverted saddle where the main dam is located. The fracture crossing the DM limestone, supra-adjacent to L₃, which are very impermeable except in this fracture. The WM marls set immediately above this limestone are similarly impervious. The direct connection of the seepage to the aquifer of the L₃ formation, feeding the same, became even more apparent after it was sealed as this was followed by a rapid rise in the piezometric levels in the observation wells installed in the L₃ immediately downstream of the dam. The seepage from the aquifer to the river Cabriel is taken to have a similar mechanism to this seepage and is related to some unidentified fracture in El Purgatorio gorge upstream of Vadocañas. This then implies that the flow has to pass through over 600 m of more modern formations of the stratigraphic

Principales Bibliotecas españolas donde se puede consultar la Revista de Obras Públicas

Organismos, Instituciones y Universidades

- Ateneo de Madrid
- Banco de España
- Biblioteca Nacional
- Biblioteca Valenciana
- Biblioteca Pública de Zamora
- Biblioteca Regional de Madrid
- Cámara Oficial de Comercio e Industria. Biblioteca Histórica
- Cartoteca de Catalunya
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX
- Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid
- Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. CIEMAT
- Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. CENIM
- Congreso de los Diputados
- Empresa Nacional de Gas. ENAGAS
- Fundación de los Ferrocarriles Españoles
- Fundación Universitaria Española
- Generalitat de Catalunya. Centre de Documentació de Medi Ambient
- Hemeroteca Municipal de Madrid
- Instituto de Carboquímica (Zaragoza)
- Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja
- Instituto de Salud Carlos III
- Instituto del Frío
- Instituto Geológico y Minero de España
- Instituto Nacional de Administración Pública. INAP.
- Instituto Nacional de Gestión Sanitaria
- Instituto Nacional de Meteorología
- Junta de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente
- Ministerio de Fomento
- Ministerio de Medio Ambiente
- Palacio Real
- Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
- Real Academia de Ciencias Morales y Políticas
- Real Sociedad Geográfica
- Repsol YPF
- Senado
- Sociedad Estatal de Participaciones Industriales. SEPI
- Universidad Complutense de Madrid
- Universidad de Barcelona
- Universidad de Burgos
- Universidad de Córdoba
- Universidad de Granada
- Universidad de las Palmas de Gran Canaria
- Universidad de León
- Universidad de Murcia
- Universidad de Navarra
- Universidad de Oviedo
- Universidad de Sevilla
- Universidad de Valencia
- Universidad de Zaragoza
- Universidad del País Vasco
- Universidad Politécnica de Cataluña
- Universidad Politécnica de Madrid
- Universidad Politécnica de Valencia

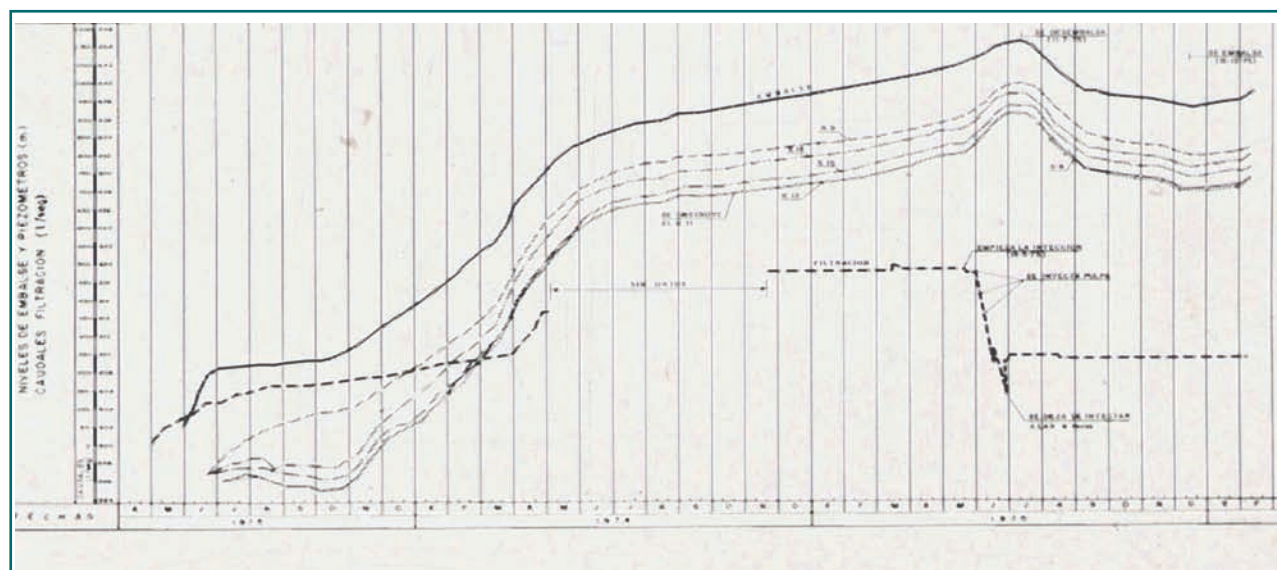


Fig. 15. Evolución de los niveles piezométricos y de la filtración del pie de presa/Evolution of the piezometric levels and seepage at the foot of the dam.

sinclinal volcado en el que se asienta la presa principal. La rotura atraviesa las calizas DM, suprayacentes al L₃, son muy impermeables excepto en esta fractura. También son muy poco permeables las margas WM situadas inmediatamente por encima de estas calizas. La conexión directa de la filtración con el acuífero de la formación L₃, que lo alimenta, se hizo aun más evidente después del sellado de esta, pues aumentaron rápidamente los niveles piezométricos en los piezómetros instalados en el L₃ inmediatamente aguas abajo de la presa. La salida de las filtraciones del acuífero al río Cabriel se supone que puede tener un mecanismo análogo al de esta filtración, relacionado con alguna fractura sin identificar situada en el cañón de El Purgatorio aguas arriba de Vadocañas. Lo que supone que este flujo tiene que atravesar más de 600m de formaciones más modernas de la columna estratigráfica. En ese paquete del orden de 300m tienen una permeabilidad pequeña o muy pequeña.

Además del problema de las filtraciones hay otro importante, el de la estabilidad de la Presa del Collado de la Venta. La presa que cierra un collado, esta cimentada en unas margas fisuradas que en parte están rellenas con yeso. Una de las preocupaciones era evitar lo más posible su contacto con el agua así como las presiones intersticiales. La figura 17 esquematiza la transferencia de flujo que se produciría desde el acuífero a través de las calizas DM y las margas fisuradas del WM. Para detectar esa transmisión se instalaron transductores de presión en las calizas DM bajo la cimentación de la presa. El comportamiento de los

column, and through a total of around 300 m of low or very low permeability rocks.

In addition to the seepage problem of the Collado de la Venta dam there was another serious problem affecting stability. The foundations to this dam, closing off a saddle, are set in fissured marls which are filled with gypsum at this point. There was some concern to prevent this from coming into contact with the water as far as possible and with respect to the interstitial pressures. Figure 17 schematises the transfer of flow that would be produced from the aquifer through the DM limestone and the WM fissured marls. Pressure transducers were installed in the DM below the foundations of the dam in order to detect this transfer. The behaviour of these piezometers over the initial years may be seen in figure 18. The very slow transmission of the piezometric levels through the DM limestone meant that in 14 years there was an increase of 10 m in the piezometric head. The low permeability meant that the drop in interstitial pressure between 1983 and 1985, brought about by the reduction in reservoir volume, was not reflected in the progressive increase caused by a preceding rise in the reservoir. A similar effect may occur in this same limestone immediately downstream of the main dam on account of the increase of the hydraulic head in formation L₃.

Very high permeabilities are difficult to evaluate in pumping tests as very high flows are required to produce small drops or modifications in the levels. However very low-permeability formations require very

Bibliotecas del mundo donde se puede consultar la Revista de Obras Públicas

- The British Library
- The Institution of Civil Engineers (Reino Unido)
- Library of Congress (Estados Unidos)
- Biblioteca Benito Juárez (Cuba)
- Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ingeniería, Biblioteca
- Sistema de Información Integrado, Facultad de Ingeniería, Biblioteca (Buenos Aires)
- Universidad de Guayaquil, Biblioteca General Luis de Tola y Avilés, (Guayaquil)
- ENPC Bibliotheque
- Escuela Colombiana de Ingeniería, Biblioteca (Bogotá, Colombia).
- Biblioteca Nacional de Ciencia y Técnica, Capitolio Nacional (La Habana)
- Instituto Iberoamericano de Información, Ciencia y Tecnología (La Serena, Chile)
- Instituto Tecnológico de Santo Domingo (Santo Domingo, República Dominicana)
- Banco Europeo de Inversiones (Luxemburgo)
- Centro Argentino de Ingenieros (Buenos Aires)
- Centro de Información de Construcción (La Habana, Cuba)
- Consejo Profesional de Ingeniería Civil (Buenos Aires)
- Escuela de Ingeniería Portuaria (Buenos Aires)
- Escuela Militar de Ingeniería (La Paz)
- Escuela Politécnica Nacional de Quito (Ecuador)
- Instituto Politécnico Nacional, E. S. Ingeniería y Arquitectura (México)
- Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas ((Ezeiza)
- Instituto Superior Politécnico José A. Echevarría (La Habana)
- Instituto Técnico Estudios Super. de Monterrey (Monterrey, Nuevo León)
- Pontificia Universidad Católica de Perú (San Miguel de Lima)
- Pontificio Universidad Javeria (Santa Fe de Bogotá)
- Pontificia Universidad Católica de Chile
- Pontificia Universidad Católica de Ecuador
- Pontificia Universidad Católica de Pucamaina
- Puertos Mexicanos (México)
- Universidad Nacional Patagónica San Juan Bosco (Rivadavia)
- Universidad Nacional Mar del Plata (Mar del Plata, Buenos Aires)
- Universidad Anahuac (Huixquilucax, Edo México)
- Universidad Católica Andrés Bello (Caracas)
- Universidad de Camaguey (Camaguey)
- Universidad de la República (Uruguay)
- Universidad de La Salle (México, D.F.)
- Universidad de La Salle (Santa Fe de Bogotá)
- Universidad de Los Andes (Santa Fe de Bogotá)
- Universidad de Los Andes (Mérida)
- Universidad de Oriente (Caracas)
- Universidad de Istmo (El Dorado)
- Universidad de Zulia (Maracaibo, Ed. Zulia)
- Universidad de San Agustín (Arequipa)
- Universidad Rafael Landívar (Guatemala)
- Universidad Tecnológica de Panamá (El Dorado, República de Panamá)
- Universidad Albert Einstein (San Salvador, El Salvador)
- Universidad Autón. Metropolitana, Sede Azcapotzalco (Naucalpan de Juárez)
- Universidad Auton. Santo Domingo (Santo Domingo, República Dominicana)
- Universidad Católica de Nicaragua (Managua)
- Universidad Católica de Argentina (Capital Federal)
- Universidad Católica de Nuestra Señora de Asunción (Asunción)
- Universidad Central del Ecuador (Quito, Ecuador)
- Universidad Mart Abreu de las Villas (Villa Clara)
- Universidad Central Venezuela (Caracas)
- Universidad Centro Occ. Lisandro Alvarado (Barquisimeto Ed Lara, Venezuela)
- Universidad Centroamericana José Simeón (San Salvador)
- Universidad Carabobo (Valencia, Ed. Carabobo)
- Universidad de Chile (Santiago)
- Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (Santiago, Chile)
- Universidad de Piura (Piura, Perú)
- Universidad de Santiago de Chile (Santiago)
- Universidad de Buenos Aires (Capital Federal, Argentina)
- Universidad de Costa Rica, Sistema Bibliotecas (San José, Costa Rica)
- Universidad de Morón (Morón, Buenos Aires)
- Universidad Nacional de Asunción (Paraguay)
- University of Nottingham, Univ. Park (Nottingham)
- Universidad Nacional de Asunción (Paraguay)
- Universidad Iberoamericana (Lomas de Santa Fe, Ciudad de México)
- Universidad Mar de Plata (Mar de Plata)
- Universidad Mayor San Andrés (La Paz)
- Universidad Metropolitana (Caracas Ed Miranda)
- Universidad Nacional Autonom. de México (México D.F.)
- Universidad Nacional Experim. Francisco de Miranda (Coro Ed Falcón)
- Universidad Nacional de Ingeniería de Managua (Managua)
- Universidad Nacional Autónoma de Honduras (Tegucigalpa, Honduras)
- Universidad Nacional de Córdoba (Córdoba)
- Universidad Nacional de Cuyo (Mendoza, Argentina)
- Universidad Nacional de El Salvador (San Salvador, El Salvador)
- Universidad Nacional de Ingeniería (Rimac, Lima)
- Universidad Nacional de La Plata (Buenos Aires, Argentina)
- Universidad Nacional de Rosario (Rosario, Santa Fe, Argentina)
- Universidad Nacional del Sur (Bahía Blanca, Buenos Aires)
- Universidad Nacional Federico Villarreal (San Miguel, Lima)
- Universidad Nacional San Luis Gonzaga (Ica)
- Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña Unan (Santo Domingo)
- Universidad Nacional San Juan (San Juan)
- Universidad Nacional Sede Manizales (Manizales, Caldas)
- Universidad Politécnica (San Salvador)
- Universidad Politécnica de San Juan (San Juan)
- Universidad Privada "José Cecilio del Valle" (Tegucigalpa, Honduras)
- Universidad de Puerto Rico Recinto Mayaguez (Mayaguez)
- Universidad Rafael Urdaneta (Maracaibo, Edo Zulia)
- Universidad Ricardo Palma (Surco, Lima)
- Universidad San Antonio Abad (Cuzco)
- Universidad San Carlos de Guatemala (Guatemala)
- Universidad San Carlos de Guatemala (Guatemala)
- Universidad Santa María La Antigua (El Dorado, República de Panamá)
- Universidad Técn. Federico Santa María (Valparaíso)
- Universidad de Santiago Utesa (Santiago de los Caballeros)
- Universidad Valle de Guatemala (Guatemala)
- Universidad Tecnológica Nacional (Capital Federal Buenos Aires)
- Universitaetsbibliothek (Alemania)

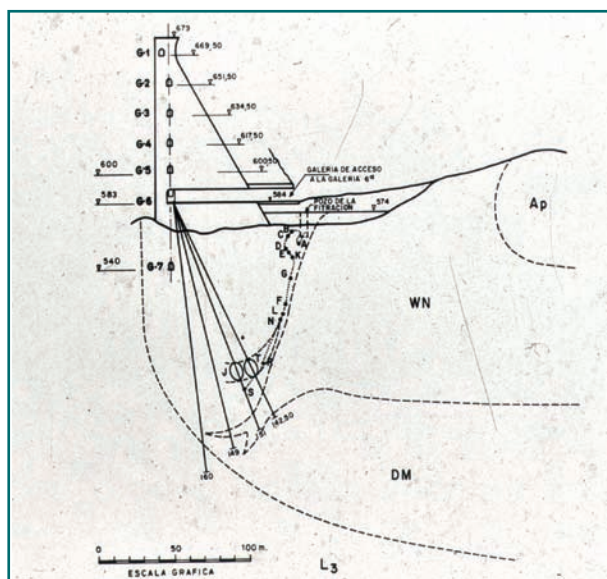


Fig. 16. Filtración al pié de la Presa de Contreras/Seepage at the base of the Contreras dam.

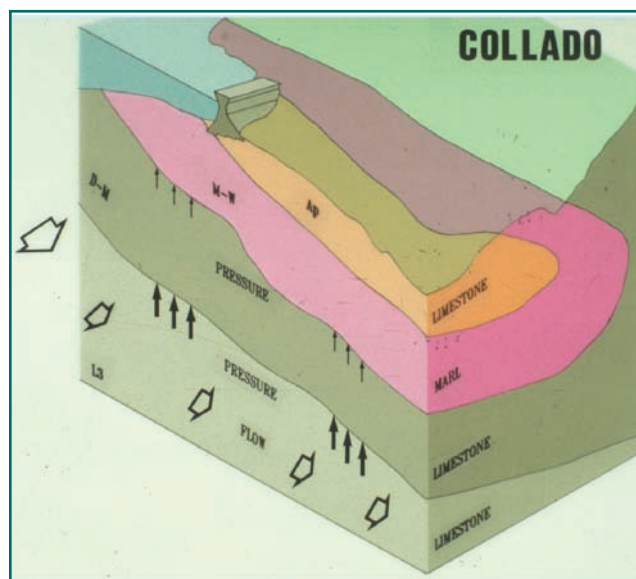


Fig. 17. Transferencias de flujo en las calizas DM de la Presa del Collado/Flow transfers in the DM limestone at the Collado Dam.

primeros años de estos piezómetros se puede ver en la figura 18. La lentísima transmisión de los niveles piezométricos a través de las calizas DM hace que en 14 años se produzca un aumento de 10m en los piezómetros instalados en ellas. Su pequeña permeabilidad hace incluso que los descensos de presión intersticial entre los años 1983 y 1985 por la bajada del volumen embalsado no se reflejen en el aumento progresivo de niveles ocasionado por la subida anterior del embalse. Un efecto análogo podría producirse en esas mismas calizas inmediatamente aguas abajo de la presa principal debido al aumento del potencial hidráulico en la formación L3.

Las permeabilidades muy altas son difíciles de valorar en los ensayos de bombeo al necesitarse flujos muy elevados para producir descensos o modificaciones pequeñas de niveles. Por el contrario las formaciones muy poco permeables requieren técnicas muy distintas y observaciones durante periodos muy prolongados que no son habituales en Ingeniería Civil, pero que en algunos casos hay que abordar.

Conclusiones

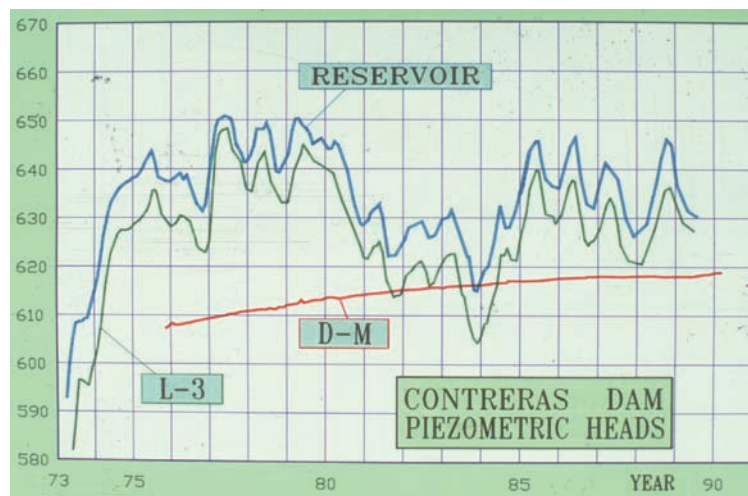
El llenado de un embalse introduce cambios en el flujo subterráneo de su entorno. Para evaluar estos cambios no basta con conocer con detalle y precisión la disposición y permeabilidad de las formaciones

different techniques and observations over very long periods which are not commonplace in civil engineering, but which should be undertaken in certain cases.

Conclusions

The filling of a reservoir introduces changes in the groundwater flow around the same. A detailed and precise knowledge of the arrangement and permeability of the formations involved is not in itself enough to evaluate these changes and it is essential

Fig. 18. Evolución piezométrica en las calizas DM de la Presa del Collado/Piezometric heads in the DM limestone at the Collado Dam.



implicadas. Es imprescindible conocer la situación del flujo y potencial hidráulico previo a la construcción del embalse y las relaciones hidráulicas con el río. Un análisis hidrogeológico detallado puede proporcionar una información adicional muy provechosa. Las técnicas hidrogeológicas han tenido un desarrollo espectacular en los últimos decenios, cuyas posibilidades de análisis no se han aprovechado totalmente.

En los casos de un medio de permeabilidad reducida y valles estrechos con fuertes gradientes ascendentes del potencial hidráulico en el centro del valle se pueden producir subpresiones importantes en la cimentación de la presa. En estos casos es posible que las pantallas de inyección y drenaje perpendiculares al cauce no produzcan una reducción apreciable de las subpresiones. Esta situación se puede reconocer con la medición cuidadosa de niveles en los sondeos de reconocimiento y con la instalación de piezómetros a distintas profundidades en el cauce y las laderas.

Los embalses construidos en ríos efímeros sin calizas con nivel por debajo del cauce, pueden tener filtraciones importantes difíciles de corregir. En España en alguna cuenca con ríos intermitentes en los que se hace utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas, se utilizan de forma no planificada como elementos de recarga de los acuíferos de forma muy eficiente, por lo que no es aconsejable reducir las filtraciones. El objetivo de la presa del Algar en el río Palancia fue el de la recarga de los acuíferos.

Existe una experiencia probada en la eficacia de las pantallas de inyección para reducir las filtraciones en medios muy permeables en los que hubo que recurrir a pantallas de hasta 400m de profundidad, aunque en medios de permeabilidad reducida se plantean dudas sobre su eficacia para reducir la permeabilidad y las subpresiones. ♦

to know the flow situation and hydraulic potential prior to the construction of the reservoir and the hydraulic relationships with the river. A detailed hydrogeological analysis may provide very useful additional information. Hydrogeological techniques have undergone spectacular development over recent decades and their possibilities for analysis have yet to be fully exploited.

In the case of a low-permeability medium and narrow vales with sharply rising gradients of hydraulic potential in the center of the valey it is possible to induce important uplifts at the foundations of the dam. In these cases the grout and drainage curtains perpendicular to the river do no produce an appreciable reduction in the uplift. This situation may be examined by the careful measurement of levels in observation wells and through the installation of piezometers at different depths in the bed and at the slopes.

Reservoirs built on ephemeral rivers in calcareous terrain with levels below the bed, may have a large degree of seepage which is difficult to correct. In certain basins in Spain with intermittent rivers where there is combined use of surface and groundwater, these are employed as a very efficient and unplanned element for refilling the aquifers and it is, subsequently, inadvisable to reduce the seepage. The object of the Algar Dam on the Palancia river was precisely to refill the aquifers.

There is proven experience of the efficiency of grout curtains to reduce seepage in very permeable materials and where it is necessary to resort to curtains of up to 400 m deep, but in less permeable materials doubts arise with regards to the effectiveness of these curtains to reduce permeability and uplift. ♦

Referencias/References:

-CASAGRANDE. A. 1961.- "Control of Seepage through Foundations and Abutment of Dam". First Rankine Lecture, *Geotechnique* vol.11, no. 3.
-FETTER. C.V. 2001. *Applied Hydrogeology*. 4ª Edición.. Ed Prentice Hall
-HUBBERT., M. K. 1940. The theory of Groundwater motion. *Journal of Geology* 48, n°. 5: 785-944.
-LOPEZ-CAMACHO, B. (1977) Estudio del flujo del agua subterránea en medios heterogéneos y anisótropos mediante un modelo digital bidimensional. Aplicación a la región de Madrid. Trabajo correspondiente a la beca de Hidrología Subterránea concedida en diciembre

de 1975. Colegio de Ingenieros de Caminos. 95 pág.
-LUGEON, M. 1933.- *Barrages et Géologie*, Rouge, Lausanne.
-SAEZ RIDRUEJO. C. J. M. LOPEZ MARINAS y E QUILES APARISI (1978).- The impermeabilization of the dam at Canelles in the lower Pyrenees in Spain. *International Association of Engineering Geology*. III International Congress. Madrid
-SAHUQUILLO. A, E. CIFRES y A. GARCÍA de la TORRE (1991).- "Hydrogeological and geotechnical problems posed by highly transmissive and low pervious rocks in the Contreras Reservoir, Spain". *XVII Congress on Large Dams*, Q-66. Vienna 1991

-SAHUQUILLO, A. 1976.- Estudios Hidrogeológicos en relación con los embalses de superficie. En *Hidrología Subterránea*, por E. Custodio y M. R. Llamas Cap. 22.3.
-SUGIMURA. Y y MIURA. M. (1985) Remedial measures for Uplift at Hitohura dam. 15th Congress on Large Dams ICOLD. Madrid, pp 483-507.
-TERZAGHI, K. (1929). "Effect of minor geological details on the safety of dams", American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Technical Publication 215, p. 30.
-TOTH, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. Geophys. Res.*, v 68, p 4795-4812.