

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## NUEVA METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA RED DE DRENAJE EN PRESAS. PRESA DE LA RIBEIRA. LA CORUÑA. ENDESA

Alonso Pérez, Julián<sup>1</sup> y Gonzalo Carracedo, Alberto<sup>2</sup>

*RESUMEN: La presente comunicación muestra una nueva metodología de trabajo, extraordinariamente eficiente, que ha empezado a ser utilizada con éxito en varias presas españolas, para un dimensionamiento óptimo del drenaje. En el trabajo se cuestionan algunos conceptos relativos a la subpresión, pantallas de impermeabilización, redes de drenaje y sistemas de piezometría, que, a pesar de su trascendental importancia para la seguridad de las presas de hormigón, esencialmente las de gravedad, se manejan con poca base ingenieril y, en muchos casos con manifiesto poco acierto.*

*El método propuesto comienza por la ejecución, en primer lugar de la red de piezometría y posteriormente la toma y análisis de las correspondientes lecturas de presiones, dimensionando los tres parámetros que configuran la red de drenaje, espaciamiento, profundidad y diámetro, en función de los condicionantes reales de cada presa, y no por leyes empíricas de dudosa justificación. La utilización de métodos geofísicos especialmente adaptados, permiten la ejecución de los drenes sólo donde son necesarios, así como eventuales inyecciones puntuales de polímeros, como refuerzo de la pantalla de impermeabilización, en zonas muy localizadas y con la presa en servicio, configuran este nuevo método, notablemente más eficiente que la doctrina*

---

1 Ingeniero de Caminos (ENDESA) jalalonso@endesa.es

2 Dr. Ingeniero de Caminos (HCC) alberto@hcc-es.com

*tradicional. Se expone el caso particular de su aplicación a la presa de La Ribeira.*

## **1. HISTORIA DE LA CONSIDERACIÓN DE LA SUBPRESIÓN.**

La rotura de la presa francesa de Bouzey, ocurrida en 1895, fue el detonante para que se introdujera el concepto de subpresión en el cálculo de estabilidad de las presas, aunque se tardaría, sorprendentemente, más de 40 años en empezar a comprender el fenómeno. En un principio se pensó que el empuje del agua bajo la presa se debía a la formación de una grieta en el contacto, por la que entraba el agua, directamente desde el embalse. La teoría de la Grieta, ha llegado hasta los años 80 con bastante pujanza. Sin desdeñar la posibilidad, constatada en numerosos casos, de que aparezcan grietas en el pié de presa de aguas arriba, la subpresión se produce, de forma generalizada, por la naturaleza porosa tanto del hormigón de la presa, como de la roca sobre la que apoya la estructura.

A día de hoy se siguen aplicando antiguas reglas empíricas y obsoletas, y en algún caso manifiestamente erróneas para el cálculo y dimensionamiento del drenaje.

## **2. INFORME DEL ICOLD EUROPEAN CLUB.**

Uno de los documentos más clarificadores sobre esta materia es el informe realizado por el ICOLD EUROPEAN CLUB, titulado “Working Group on Uplift Pressures Under Concrete Dams”, fechado en 2004 y coordinado por G. Ruggeri. Este informe es de acceso libre y está disponible en la Web de ICOLD.

Son de destacar las siguientes conclusiones del informe:

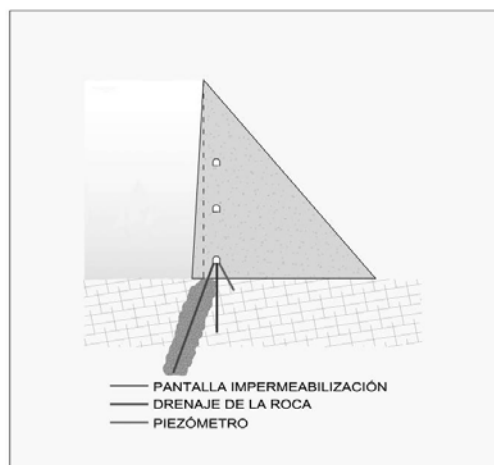
- 2.1. Estado del Arte: De los estudios recientes analizados por este grupo de trabajo, se desprende que la motivación común de aquéllos, ha sido comprobar que los criterios de diseño universalmente admitidos sobre los efectos del drenaje, de la pantalla de impermeabilización o de cualquier otro método de control de las subpresiones, nunca han sido plenamente contrastados. Muchas presas antiguas, a la luz de las actuales exigencias de seguridad y de los criterios tradicionalmente admitidos sobre la subpresión, obligan a actuar sobre ellas. Un mejor conocimiento de los mecanismos de la subpresión y de su control, podrían contribuir a obviar innecesarias actuaciones.
- 2.2. Pantalla de impermeabilización: Su profundidad puede variar entre el 10 % y varias veces la altura de la presa; y aunque está universalmente admitido, que la correcta ejecución de la pantalla de impermeabilización reduce las filtraciones bajo la presa, su influencia en la disminución de la subpresión es todavía un tema de debate. Efectivamente, aunque pantallas, de dos o tres líneas de taladros de inyección, muy bien ejecutadas, parece que pueden contribuir a disminuir la subpresión, no se les puede confiar, en exclusiva, este cometido.
- 2.3. Drenaje: Todos los estudios confirman que un correcto drenaje es el medio más efectivo para conseguir la reducción de la subpresión.

- 2.4. Cambios estacionales: Los datos confirman que los cambios estacionales de temperatura pueden producir alteraciones significativas en la subpresión; los mayores valores se alcanzan en tiempo frío. Los cambios de temperatura pueden asimismo tener influencia sobre la falta de linealidad de los valores de la subpresión con respecto a la cota de embalse.
- 2.5. Medida de la subpresión: Una conclusión muy importante, sobre la que volveremos más adelante es que la forma, bastante habitual, de medir la subpresión cerrando un dren y colocándole un manómetro es una práctica absolutamente descartable.
- 2.6. Subpresiones en el cuerpo de presa: A pesar de la importancia que tienen para la seguridad de la presa, prácticamente nunca se mide la presión intersticial en el cuerpo de presa.

### **3. LA PANTALLA DE INYECCIÓN.**

Aunque forma parte del ideario común que la pantalla de impermeabilización es el elemento esencial de prevención de la subpresión, este concepto es falso. La pantalla de impermeabilización no es estanca, y, en el mejor de los casos, si está correctamente dimensionada y ejecutada, se limitará a reducir significativamente el caudal de filtración y a aumentar las pérdidas de carga de ésta. Pero que la subpresión se manifieste, independientemente de la pantalla, es una mera cuestión de tiempo.

Por lo tanto, para reducir la subpresión a magnitudes asumibles, es imprescindible eliminar el agua intersticial, tanto del cuerpo de presa, como del cimientto, mediante drenes. Un dren, al igual que lo haría un pozo produciendo un abatimiento del nivel freático, tiene que distorsionar lo máximo posible las líneas de corriente en su entorno. Es evidente que la pantalla de impermeabilización, al reducir las filtraciones bajo la presa colabora, de forma importante a la efectividad del drenaje. En los años 50, algunos autores hablaban del “concierto entre la pantalla de impermeabilización y la red de drenaje”.

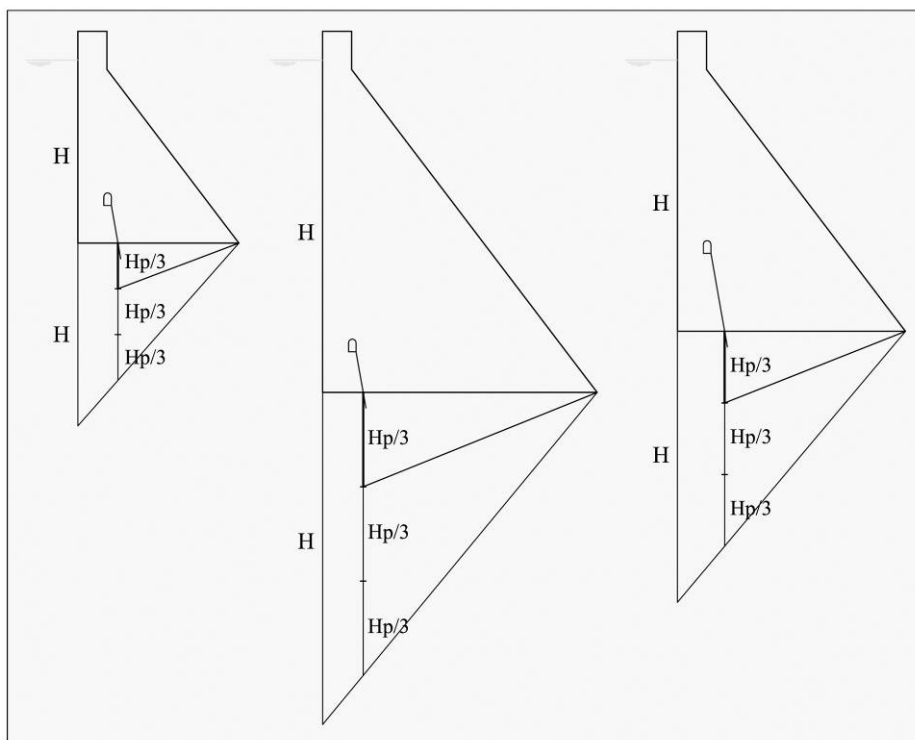


*Fig.1. Disposición de la pantalla, drenes y piezómetros.*

Vemos, por lo tanto que para el control de las subpresiones se requiere un primer elemento que es la pantalla de inyección, un segundo que es la red de drenaje y un tercero que sería la red de piezometría, donde miden aquéllas. Su disposición ha de ser la indicada en la Fig.1, hacia aguas arriba, la pantalla de impermeabilización, a continuación la red de drenaje, y, hacia aguas abajo la red de piezometría.

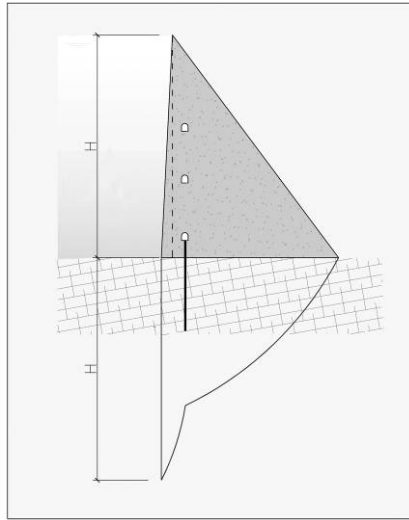
#### **4. PROFUNDIDAD DE LOS DRENES.**

El dren ha de profundizar lo suficiente en el cimiento, como para conseguir que en su zona de influencia, la subpresión se reduzca aproximadamente al tercio de la ley triangular teórica en su perfil. (Fig. 2)



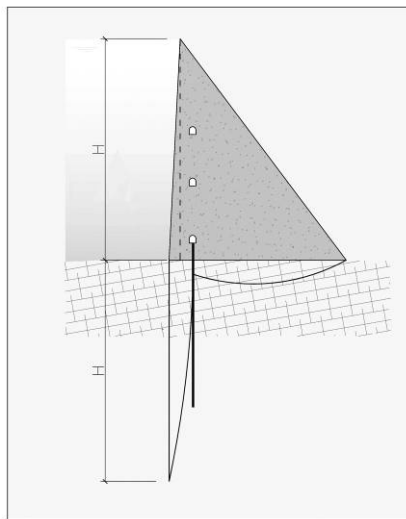
*Fig.2: Obtención gráfica de la ley de subpresiones máximas admisibles en cada piezómetro, en tres perfiles.*

Suele ser práctica muy habitual, fijar como profundidad del dren, a priori, un tercio de la cota de embalse en el bloque correspondiente, lo que no tiene ningún soporte técnico. Evidentemente un dren que se quede corto, que no tenga la profundidad adecuada, no captará las filtraciones que superen la barrera de la pantalla de impermeabilización. (Fig. 3)



*Fig. 3: Red de drenaje corta, incapaz de conseguir una disminución adecuada de la ley de subpresiones.*

Evidentemente la situación ideal es la que representamos en al Fig. 4, donde los drenes se han profundizado lo suficiente como para lograr una efectiva recogida de las filtraciones, y por lo tanto una correcta disminución de la ley de subpresiones.



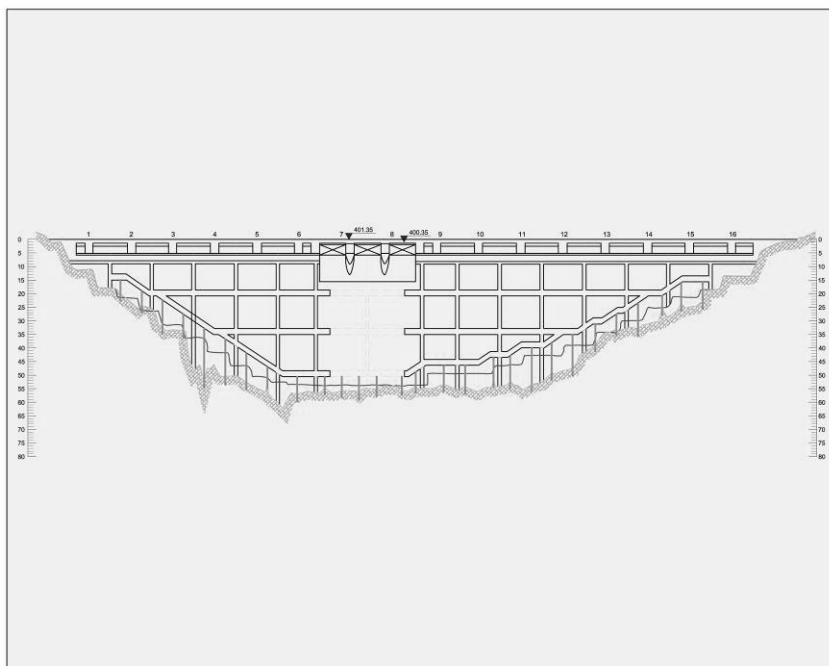
*Fig. 4: Una red de drenaje eficazmente diseñada es capaz de conseguir una adecuada reducción de la ley de subpresiones.*

El problema estriba en cómo establecer, mediante el cálculo, la profundidad, la separación, el diámetro e incluso la inclinación de los drenes. Desgraciadamente no hemos encontrado aún respuesta, dada las dificultades para poder modelizar la roca y sus diaclasas.

## **5. NUEVA METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO DE LA RED DE DRENAJE.**

La nueva metodología que propugnamos parte de una idea muy simple: si la red de drenaje tiene como principal función, rebajar las subpresiones hasta los límites que los cálculos de seguridad establezcan, la primera actuación ha de ser la instalación de la red de piezometría, y su lectura. Evidentemente, antes del primer llenado de una presa es necesario disponer de un mínimo de drenes, pero siempre auxiliados por una completísima colección de piezómetros, a ser posible de cuerda vibrante.

Por lo tanto en primer lugar se establece la posición en alzado de la ubicación de los piezómetros (Fig.5).



*Fig. 5. Alzado de la distribución de piezómetros en la presa de La Ribeira.*

Posteriormente, se dibujan (Fig. 2) todas las secciones de la presa que disponen de un piezómetro. Se han dispuesto dos por bloque. De la figura 2, se obtiene la ley triangular teórica máxima en el contacto, justo en la posición de cada piezómetro, de donde se obtiene la subpresión máxima admisible en cada sección. A partir de esos valores, se representa en la Fig. 6 la curva de subpresiones máximas admisibles y la ley real medida en los piezómetros.

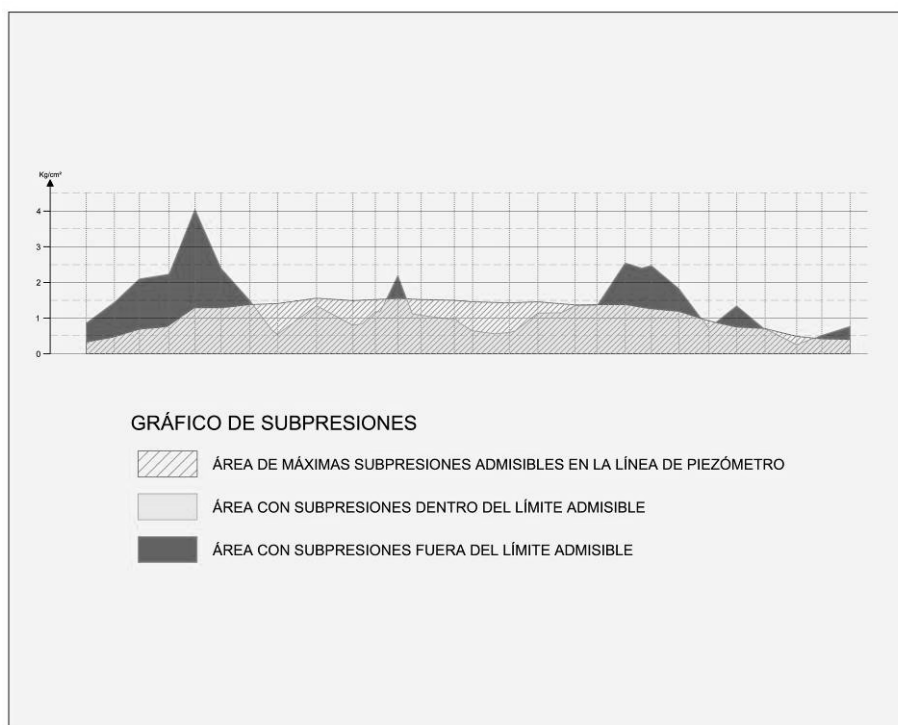


Fig. 6. Curvas de subpresiones reales y máximas admisibles.

Evidentemente, a partir de este esquema resulta extraordinariamente sencillo determinar las zonas que requieren una mejora del drenaje, y las que no necesitan intervención alguna.

Una vez conocidas las zonas sobre las que hay que actuar y la magnitud de las subpresiones a reducir, queda la incógnita de cómo lograrlo con la mayor eficiencia. Las variables son el diámetro del dren, su profundidad y la separación entre ellos. La magnitud de la obra a realizar en La Ribeira, donde en amplias zonas de la presa se duplicaban las subpresiones admisibles, nos llevó, de común acuerdo con Endesa, a realizar distintos tramos de pruebas, evidentemente, con el objetivo de rebajar las subpresiones con el menor coste posible.

De entrada tenemos que señalar que el diámetro del dren, de 76 o 100 mm., no tiene influencia alguna, por lo tanto, seguimos recomendado realizarlos de 76 mm., que tienen menor coste.

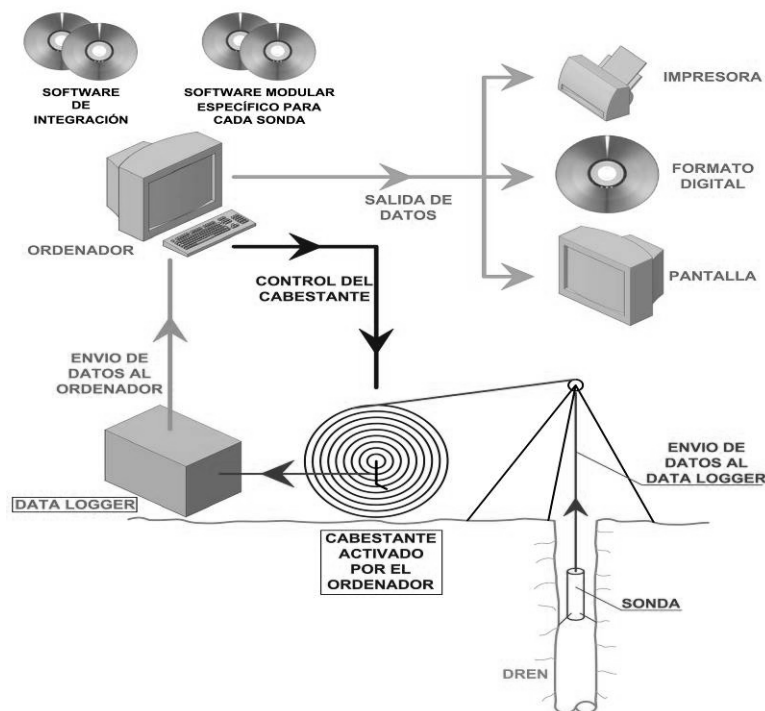
Una vez eliminada una de las variables, quedaban las otras dos, la profundidad y el espaciamiento. Y también una pregunta en el aire, habida cuenta que no se tiene constancia de que durante la construcción de la presa se realizara la pantalla de impermeabilización, ¿se pueden rebajar las subpresiones hasta valores admisibles, sólo ejecutando drenes?

Dado que, a priori no se puede conocer el espaciamiento óptimo entre drenes, se optó por determinar la profundidad óptima, empleando métodos geofísicos.

## 6. MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS A LA OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE.

Los métodos de investigación geofísica, de aplicación habitual en geología y minería, se basan en las diferencias de propiedades como densidad, temperatura, conductividad, permeabilidad magnética, etc., que presentan los materiales que pueden ser analizados en un sondeo o en un pozo.

La idea de utilizar estas técnicas, en las que se combinan geología, física, química y electrónica, para la investigación de drenes, surgió, por un lado al considerar la analogía entre éstos y los pozos, y, por otro, al no lograr, mediante el mero uso de cámaras de TV y el análisis de testigos, toda la información necesaria para la correcta toma de decisiones. El esquema del sistema se representa en la Fig. 7.



*Fig. 7. Esquema de los aparatos de geofísica utilizados. El ordenador dirige un cablestante que coloca con gran precisión distintos tipos de sondas en los taladros de los drenes. La información recogida de las sondas, es encaminada al ordenador para su oportuno procesamiento.*

El agua suele llegar a cada dren por las diaclasas a las que éstos cortan. Generalmente, cuanto más profunda es la diaclasa menor es su aportación de agua debido a la compresión del macizo. La aplicación de métodos geofísicos va a permitir, en primer lugar, determinar la posición de estas diaclasas, y en



segundo medir su caudal de aportación a cada dren. De esta forma se determina hasta qué profundidad resulta económicamente rentable profundizar los drenes en cada zona.

En la práctica, se realiza, en cada zona en la que se subdivide la presa un dren de gran profundidad, que puede llegar al 50 % o incluso el 100 % de la altura de la presa en ese punto. En primer lugar se introduce una sonda doble, capaz de medir resistividad /conductividad del agua, y su temperatura. El análisis de todo el dren da lugar a un diagrama donde se reflejan, en función de la profundidad, los cambios de estos dos parámetros. En la Fig. 8 se representa un diagrama de resistividad y de temperatura. Un cambio brusco de estos dos parámetros, delatan la presencia de un aporte de agua.

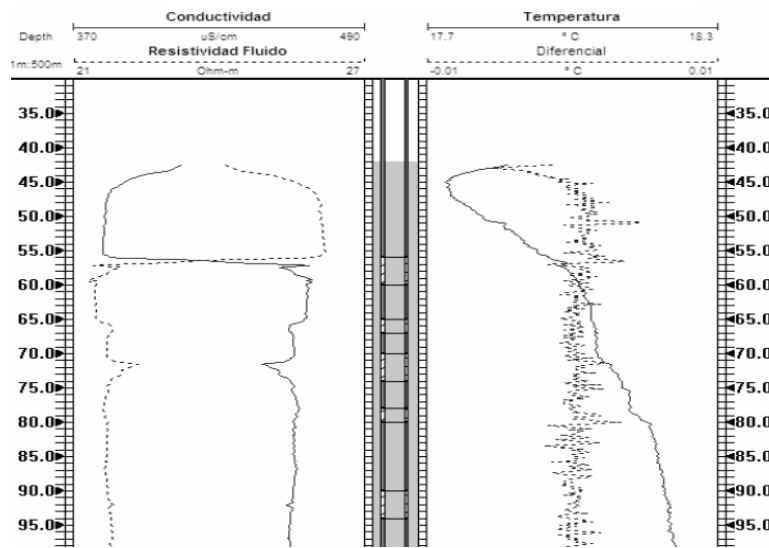
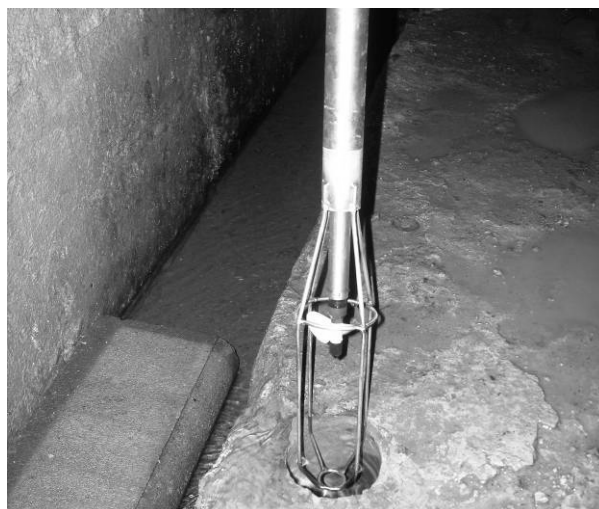


Fig. 8. Gráfico de resultados de resistividad y temperatura a lo largo del sondeo.

En la cota 55 se aprecia el cambio brusco de resistividad/conductividad y temperatura. La gran precisión de las sondas permiten magnificar cambios de temperatura de apenas unas décimas de grado.

Una vez conocida la posición de las diaclasas, se deben determinar sus caudales de aportación. Para determinar estos caudales de entrada, o salida del dren por zonas, se utiliza un caudalímetro. Para caudales de cierta importancia, se recurre a una sonda dotada de una hélice vertical, o molinillo, movida por las corrientes ascendentes o descendentes, existentes dentro del dren. (Fig. 9). Para caudales bajos, son preferibles las sondas de Pulso Térmico.



*Fig. 9. Sonda dotada de un caudalímetro de molinillo.*

Las medidas se pueden tomar mientras se hace avanzar la sonda a una velocidad constante a través del dren, para generar un perfil continuo del caudal del fluido a lo largo del mismo o, también, se puede fijar la sonda a una determinada profundidad para medir la evolución del caudal en ese punto, y así ver su evolución en función de la cota de embalse o de la influencia de otros drenes cercanos.

De ésta manera se determinan con exactitud las profundidades donde se encuentran las máximas aportaciones de agua al dren, lo que permite fijar, de la forma más eficiente, hasta dónde se debe perforar en cada zona.

## **7. PROYECTO DE DRENAJE.**

Una vez conocida la profundidad óptima de perforación en cada zona, sólo queda determinar el espaciamiento óptimo entre drenes. Para ello se comienza con distancias amplias, de unos cuatro metros. La presencia de los piezómetros y su lectura regular, permite conocer en tiempo real la eficacia de cada dren en su entorno. La realización de gráficos semanales, permite proyectar el trabajo para la siguiente semana, disminuyendo la separación entre drenes exclusivamente, dónde realmente se requiere.

Es posible, como ha ocurrido en la Ribeira, que en algunas zonas puntuales, se haya llegado a espaciamientos pequeños entre drenes, del orden de los dos metros, sin que se haya conseguido rebajar totalmente las subpresiones por debajo de los límites deseados (Fig. 10). Esto puede deberse a que los caudales evacuados por los drenes son inferiores a los aportados por las diaclasas. La solución es realizar una inyección muy localizada de las diaclasas que aportan esos caudales excesivos.

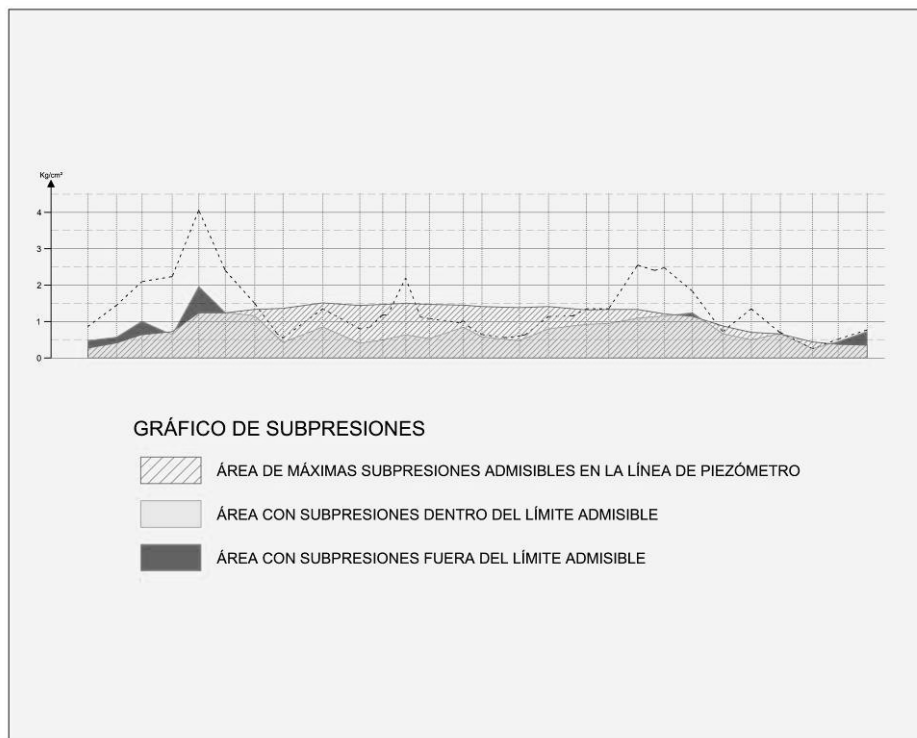


Fig. 10. Gráfica de subpresión, una vez completada la red de drenaje. La línea de puntos representa el estado inicial.

## **8. INYECCIÓN LOCALIZADA DE DIACLASAS.**

Si el último escollo que queda para rebajar las subpresiones a los valores que el cálculo fija como admisibles, lo constituyen unas filtraciones excesivas en determinadas zonas, el tratamiento lógico es, de acuerdo con el esquema de la Fig. 1, efectuar una pantalla localizada, hacia aguas arriba, en correspondencia con los piezómetros que dan lecturas excesivas.

El trabajo ha de ser realizado en servicio, esto es con embalse lleno, en primer lugar porque es la manera de ver, en tiempo real, a través de las medidas de los piezómetros, la efectividad del tratamiento, y en segundo por los problemas que todo desembalse conlleva.

La reducción de los aportes de las diaclasas se realiza mediante inyecciones. Obviamente se requiere un material que mantenga sus propiedades con el tiempo, que no se diluya en agua, ni sea arrastrado por ésta, ni contamine. Estos materiales son determinadas resinas epoxi, espesadas hasta convertirse en masillas, especialmente formuladas para este tipo de trabajos. Para poder inyectar estos materiales, que no se rigen por las leyes convencionales de la hidráulica, al ser no Newtonianos, se requieren equipos de inyección capaces de dar más de 600 kp/cm<sup>2</sup> de presión en salida de bomba.

A medida que avanza la inyección y se va creando la barrera, se aprecia, en tiempo real, tanto una disminución del aforo de los drenes, como de la

subpresión en los piezómetros. Una vez logrado el objetivo, se da por finalizado el trabajo.

## **9. CONCLUSIONES**

La metodología expuesta, está teniendo una gran acogida entre los responsables de presas, ya que permite, tanto en presas antiguas, como en las que están en su primer llenado, controlar filtraciones y adecuar las subpresiones a los parámetros de seguridad, incidiendo sólo en las zonas que lo necesitan. Frente a los tratamientos generalizados tanto de inyecciones como de drenaje, este nuevo sistema permite reducir muy significativamente los costes y mejorar, también de forma apreciable los resultados. En este caso, a diferencia de lo que ocurre en el mundo de la moda, el traje a la medida, resulta más económico que el “prêt à porter”.