

# Caracterización hidráulica de formaciones de baja permeabilidad. Aplicación a un sondeo de reconocimiento perforado en materiales graníticos en el sector oriental del Sistema Central

M. Mejías Moreno<sup>(1)</sup>, F. Bellido Mulas<sup>(1)</sup>, M. Lombardero Barceló<sup>(2)</sup> y M. Armendáriz Dufur<sup>(1)</sup>

(1) Instituto Geológico y Minero de España. c/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid, España.

(2) INECO S.A. Paseo de La Habana, 136. 28036 Madrid.  
E-mail: m.mejias@igme.es

## RESUMEN

Se exponen los resultados de un estudio hidrogeológico y estructural de las rocas graníticas aflorantes en el sector oriental del Sistema Central, en el término municipal de Cadalso de los Vidrios (Madrid). El área de estudio presenta un creciente interés desde el punto de vista de la producción, elaboración y comercio del granito en la Comunidad Autónoma de Madrid.

Se describen las características petrológicas y estructurales de los granitos aflorantes y de los testigos obtenidos en un sondeo de reconocimiento, de 200 m de profundidad, perforado en estos materiales. Se lleva a cabo una campaña de testificación hidráulica, mediante ensayos hidráulicos de baja permeabilidad, en secciones aisladas mediante obturadores, aplicando la instrumentación de la Unidad Móvil de Hidrogeología de formaciones de baja permeabilidad desarrollada por el IGME, con el objetivo de obtener los parámetros hidráulicos de los materiales perforados.

Los resultados obtenidos en esta campaña, junto con los datos de otras experiencias similares anteriores, permiten presentar un estudio comparativo de los métodos de ensayos hidráulicos utilizados, algunas incertidumbres y definir el rango de conductividad hidráulica óptimo para aplicar cada método. Finalmente, se describe la distribución de la conductividad hidráulica en función de la profundidad y la fracturación existente en la zona de estudio.

Palabras clave: baja permeabilidad, conductividad hidráulica, ensayos hidráulicos, granito, Sistema Central

## ***Hydraulic characterization of low-permeability formations. Case of reconnaissance borehole drilled in granitic rocks in the western sector of the Central System***

### ABSTRACT

*The results of the hydrogeological and structural study of the granite rocks outcropping in the eastern sector of the Central System, in the municipal boundary of Cadalso de los Vidrios (Madrid) are analysed in this paper. The studied area presents an increasing interest from the point of view of production, manufacture and trade of granite rocks in the Autonomous Community of Madrid.*

*The petrological and structural characteristics of the granite rocks and the core-samples from a borehole investigation, 200 m depth, drilled in these materials are described. The hydraulic testing, in isolated intervals by means of packers, is carried out. The hydraulic tests are conducted by mean of the Hydrogeological Mobile Unit of low permeability formations developed by the IGME, to acquire the hydraulic parameters of the drilled materials.*

*The results obtained in this work, as well as the data of other previous similar studies, allow to elaborate a comparative analysis of the hydraulic tests applied in the investigations, some uncertainties and to define the hydraulic conductivity interval optimum for application of each of the methods. Finally, the hydraulic conductivity on the basis of the depth and the fractures present in the study area is displayed.*

*Key words: granite, hydraulic conductivity, hydraulic tests, low permeability, Sistema Central*

## Motivación de los trabajos desarrollados y objetivos

El presente trabajo se enmarca dentro de las actividades científico-técnicas del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), y forma parte de los trabajos de caracterización hidráulica mediante la aplicación de la Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica de formaciones de baja permeabilidad (UMH) desarrollada por el IGME. Los objetivos del trabajo pueden resumirse en los siguientes apartados:

- Obtención de los parámetros hidráulicos de la formación estudiada, en secciones aisladas mediante obturadores, en un sondeo de reconocimiento perforado en materiales graníticos y situado en el sector oriental del Sistema Central, concretamente en la cantera de granito ornamental de la empresa Marcelino Martínez Madrid, S.L., en el término municipal de Cadalso de los Vidrios (Madrid).
- Profundizar en el conocimiento hidrogeológico y estructural de las rocas plutónicas del área estudiada, dado su creciente interés como aprovechamiento minero desde el punto de vista de la producción, elaboración y comercio del granito ornamental en la Comunidad Autónoma de Madrid.
- Optimización y validación de la metodología general de caracterización hidrogeológica y del protocolo de actuación aplicados con la UMH, establecidos en estudios de caracterización llevados a cabo en otros materiales (rocas sedimentarias, metamórficas y volcánicas), para su utilización en rocas plutónicas.
- Desarrollo de un programa de realización y comparación de los métodos de ensayo utilizados con la UMH (inyección en régimen transitorio, inyección en régimen pseudoestacionario, recuperación de presiones, slug y pulso), que permita definir el rango de conductividad hidráulica aplicable para cada método con la instrumentación desarrollada y analizar la representatividad de los valores de conductividad hidráulica obtenidos.

## Elección del área piloto y descripción del sondeo de reconocimiento

La elección de la zona de estudio se basó principalmente en consideraciones de tipo litológico, estructural, hidrogeológico y logístico. Se buscaba un área granítica, poco fracturada y alterada, con escaso aprovechamiento hidrogeológico, en la que se obtuvieran los permisos necesarios para perforar un sondeo de reconocimiento y se contase con ciertas medidas de seguridad, dado el elevado valor econó-

mico de la instrumentación a utilizar. El sondeo de reconocimiento se localiza en el término municipal de Cadalso de los Vidrios (Madrid), a unos 3,5 km al Este de la población, concretamente en la cantera de la concesión de explotación "El Venero", número 3045-01-01, cuyo concesionario corresponde a Marcelino Martínez Madrid S.L. Los principales datos técnicos de la perforación se resumen en la tabla 1.

Con el objetivo de minimizar la alteración producida en el medio geológico durante los trabajos de perforación se realizó el sondeo utilizando exclusivamente agua como fluido de perforación y, una vez finalizado, se llevó a cabo una limpieza con circulación de agua, mediante inyección a fondo de sondeo, durante 24 horas.

## Marco geológico y características de los granitoides. Análisis litológico-estructural

El Macizo de Cadalso de los Vidrios toma su nombre de la misma población y se localiza en la hoja, a escala 1:50.000, número 580 (Méntrida). Su afloramiento tiene una forma groseramente rectangular y unas dimensiones aproximadas de 8,5 x 7 km. Está constituido por dos facies graníticas principales que corresponden respectivamente a monzogranitos biotíticos con megacristales y leucogranitos biotíticos. Los monzogranitos tienen textura equigranular de grano medio-grueso y localmente cierta tendencia porfídica, mientras que los leucogranitos tienen menor contenido en biotita, un tamaño de grano menor y una cierta inequigranularidad debido a la presencia de fenocristales globulares de cuarzo de mayor tamaño que el resto de los componentes minerales. En la figura 1 se presenta una cartografía esquemática de la distribución de las facies graníticas en el entorno del sondeo elaborada a partir de la hoja MAGNA número 580, Méntrida (Díaz de Neira *et al.*, en prensa).

El granito aflorante en la zona de estudio es muy homogéneo y tiene aprovechamiento industrial, explotándose desde hace tiempo como roca ornamental (Gómez Moreno *et al.*, 1995). Se extrae en dos canteras de bloques y varias artesanales bajo el nombre comercial de Blanco Cristal. En algunas zonas aparece una facies de grano más fino, homogénea, que se comercializa con el nombre de Blanco Fino. El sondeo se localiza sobre el afloramiento de leucogranitos biotíticos de grano medio que corresponden a la denominación comercial "Granito Blanco Cristal". A nivel de afloramiento se trata de rocas muy homogéneas bajo el punto de vista composicional y textural. Tienen un color blanquecino grisáceo y son muy escasas las estructuras bandeadas definidas por

acumulaciones preferentes de mica (schlieren) y las venas y bolsadas aplítico-pegmatíticas; también son muy escasos los enclaves microgranudos o micáceos.

Composicionalmente corresponden a granitos en sentido estricto, con una mineralogía compuesta por cuarzo (27%), feldespato potásico (38%), plagioclasa (27%) y biotita (8%) (Rodríguez-Suárez *et al.*, 1988).

Características	Sondeo Cadalso 1
Coordenada X (Proyección UTM-30T)	0381065
Coordenada Y (Proyección UTM-30T)	4463244
Cota de emboquillamiento	840 m
Profundidad de perforación	200 m
Fecha de inicio de los trabajos de perforación	11-2-2003
Fecha de finalización de los trabajos de perforación	13-3-2003
Equipo de perforación	Hydro-185 (Boart-Longyear)
Sistema de perforación	Rotación, con extracción de testigo continuo y circulación directa
Lodo de perforación	Agua
Diámetro de perforación	0-3 m 146 mm (convencional) 3-11,8 m 122 mm (wire-line) 11,8-200 m 116 mm (convencional)
Entubación	Sin entubación

Tabla 1. Características técnicas del sondeo Cadalso 1  
 Table 1. Technical characteristics of the borehole Cadalso 1

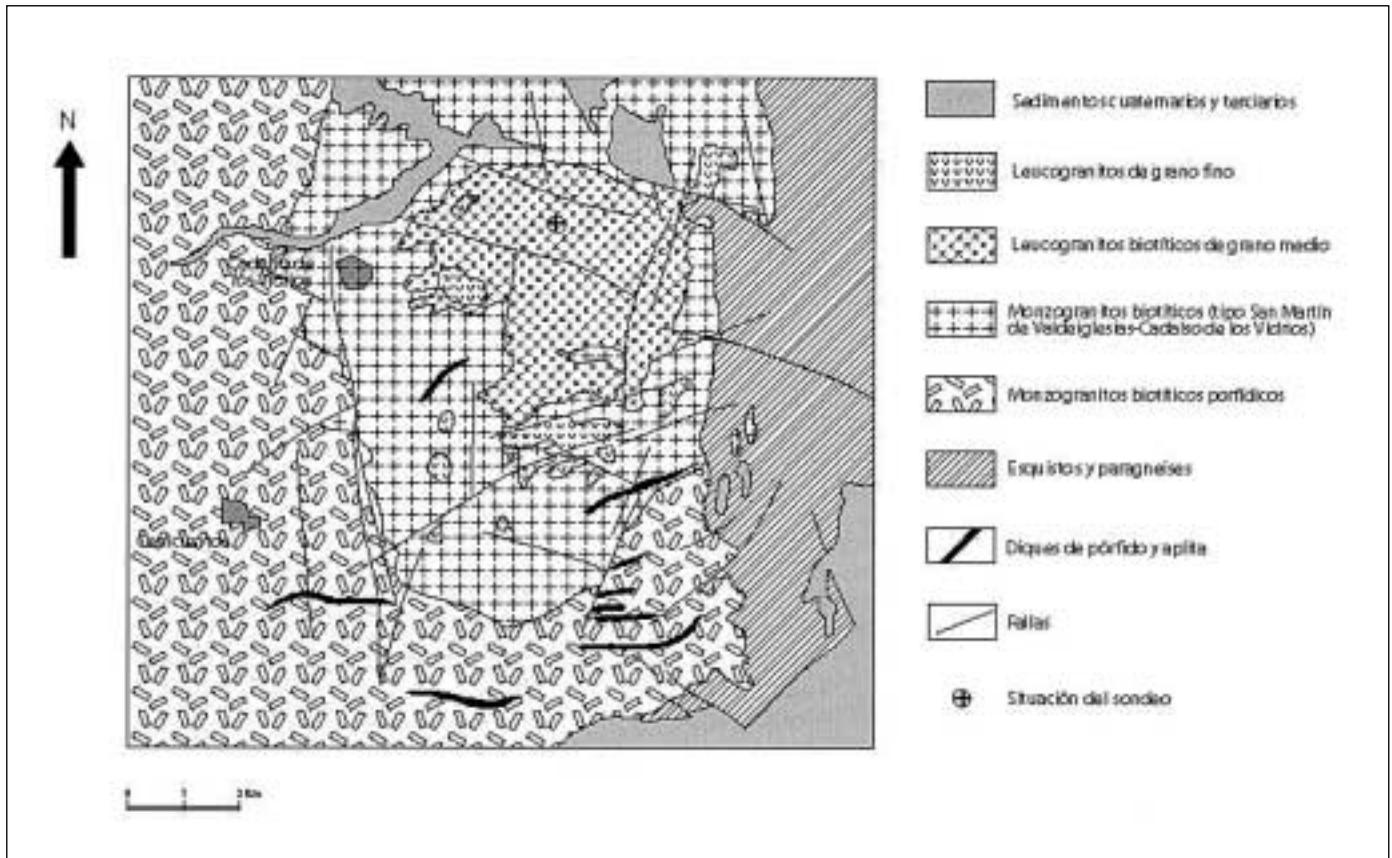


Fig. 1. Mapa de situación geográfica y geológica de la zona de estudio (simplificación de la hoja geológica MAGNA)  
 Fig. 1. Geographical and geological map of the study area (simplification of the MAGNA geological map)

Los minerales accesorios más comunes son: apatito, circón y monacita, pudiendo encontrarse pequeñas proporciones de opacos y fluorita. Como minerales secundarios se encuentran: clorita, moscovita, micas amarillentas, sericita, clinozoisita, prehnita, epidota, esfena, feldespato potásico, albita, opacos, óxidos y calcita. La textura es hipidiomórfica de grano medio, algo inequigranular debido a la presencia de fenocristales de cuarzo dispersos.

Con respecto a la tectónica no se aprecia ningún tipo de orientación relacionada con las deformaciones hercínicas, tratándose de un plutón claramente postcinemático y de emplazamiento muy superficial. Se encuentran por el contrario estructuras frágiles asociadas con procesos de fracturación tardi y posthercínicos. Las más importantes de la zona corresponden a una serie de fracturas que tienen rellenos hidrotermales poco importantes y de baja temperatura (cuarzo, clorita, epidota, carbonato cálcico, sulfuros) y a las que pueden asociarse procesos de episienitización de los granitos afectados, que se manifiestan visualmente por la adquisición de una coloración rosada más o menos intensas.

Ocasionalmente se encuentra alguna vena o masa pegmatítica, con cuarzo, albita, feldespato potásico y algo de biotita y turmalina, cuyas dimensiones máximas son de escasos centímetros. En algún caso, la masa pegmatítica puede tener una cavidad central en la que los cristales de cuarzo desarrollan caras cristalinias libres. También se ha encontrado alguna pequeña cavidad rellena por cuarzo y clorita. Los enclaves son muy escasos y de pequeño tamaño, su dimensión mayor no suele superar los 3 cm y corresponden casi exclusivamente a tipos muy ricos en biotita, de color negruzco y de formas irregulares.

Las manifestaciones filonianas son también muy escasas y de pequeña entidad; se han interceptado en el sondeo un par de diques de aplita de reducida potencia (40 y 18 cm), con bordes netos pero engranados con los leucogranitos encajantes, que corresponden a variedades de grano muy fino y de color claro. En la zona interna del dique de mayor tamaño (que se localiza a una profundidad de 38,5 m), se individualizan algunas heterogeneidades pegmatíticas con grandes cristales de cuarzo y de feldespatos y algunas láminas finas de biotita y turmalina. El buzamiento de estos diques es inferior a 30°.

Otras heterogeneidades identificadas en los testigos de perforación corresponden a masas o bandas de granitoides muy parecidos al tipo blanco cristal, pero ligeramente más pobres en biotita. Estos granitoides más leucocráticos presentan un paso insensible a los de la facies común. En algunas zonas los granitos presentan un tinte rosado muy débil debido a

cambios en la coloración del feldespato potásico. Coloraciones rosadas más intensas se encuentran relacionadas con zonas de fractura afectadas por episienitizaciones asociadas a circulación de fluidos hidrotermales. Estas fracturas suelen tener rellenos de poca importancia y de coloración verdosa, constituidos principalmente por cuarzo, calcita, clorita y epidota. En las zonas más afectadas por fracturas pueden definirse sistemas de microbrechificación, a favor de las fisuras, en las que se aprecian hidrotermalizaciones, crecimientos de micas de grano fino, albitizaciones, carbonataciones, etc. Esta serie de modificaciones texturales, estructurales, de coloración y composicionales se representan esquemáticamente en la columna litológica del sondeo, figura 2.

### **Fracturación**

La fracturación del macizo rocoso en superficie es poco importante. El estudio de la fotografía aérea indica una dirección principal de fracturación N 100° E. La medida sistemática de fracturas en varios frentes de cantera cercanos al sondeo indica un máximo en la frecuencia de fracturas con dirección N 95° E y buzamiento subvertical. Se trata de fracturas por lo general muy continuas (decenas de metros de longitud), con una zona de alteración de la roca de espesor comprendido entre 4 y 10 cm, alteración que se manifiesta por un enrojecimiento de la roca y por la presencia de una pátina de clorita, carbonatos y óxidos de hierro sobre el plano de fractura. En las más importantes se observa trituración de la roca y caolinización del feldespato. El espaciado o distancia entre fracturas es de muy amplio (>6,25 m ≤15,62 m) a extremadamente amplio (>15,62 m), lo que permite obtener grandes bloques en los procesos de explotación.

La segunda dirección de fracturación, mucho menos frecuente que la anterior, es la N 30° E. Son fracturas de continuidad media a alta (métrica a decamétrica), que no suelen tener asociada alteración de la roca. Su espaciado es extremadamente amplio. Por último, se han medido algunas fracturas de buzamiento inferior a 15°, que los canteros denominan "levantes", y que tienen gran importancia para la explotación, ya que definen los pisos o altura de berma de los frentes de cantera.

Con respecto a las fracturas analizadas en los testigos de perforación cabe destacar los siguientes tipos:

- Fracturas-diaclasas: son particiones del granito a favor de superficies planas que están condicionadas, en la mayoría de los casos, por el sistema de

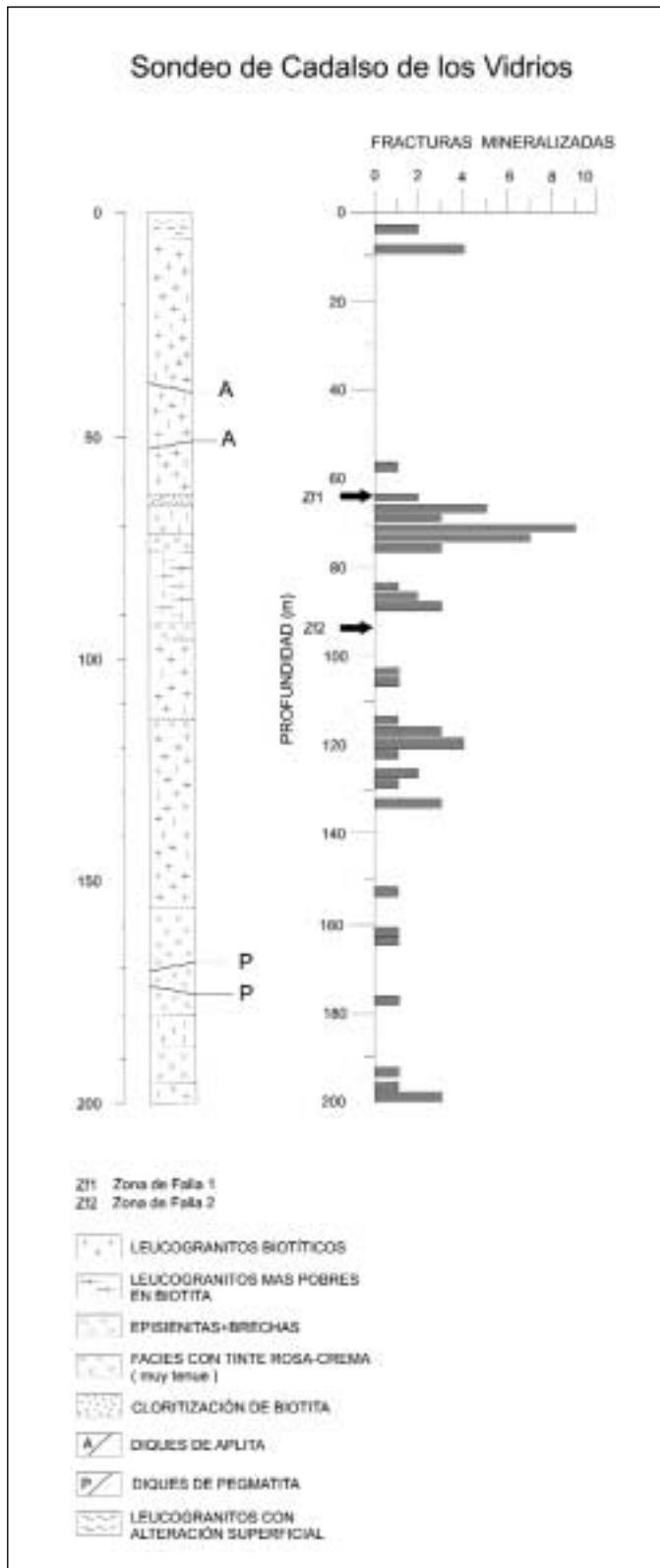


Fig. 2. a) Columna litológica del sondeo y b) distribución de fracturas

Fig. 2. a) Lithological column of the borehole and b) fractures distribution

diaclasado que se desarrolla durante el emplazamiento y enfriamiento del cuerpo plutónico y por la relajación y descompresión debida a la erosión de los materiales suprayacentes o a la extracción de los granitos de los tramos superiores del sondeo. Las que presentan buzamientos más bajos son las relacionadas con los "levantes".

- Fracturas y diaclasas asociadas a zonas de falla: corresponden a sistemas de partición planar asociados a zonas afectadas por fallas relacionadas con eventos de deformación frágil tardihercínicos o alpinos. Estos planos de fractura suelen presentar buzamientos elevados y ángulos bajos (<30°) con el eje del sondeo. Estas fallas y fracturas están asociadas al sistema principal de fracturación del macizo rocoso detectado en superficie y concretamente a las fracturas de dirección N 95° E.

- Fracturas-diaclasas mineralizadas: corresponden a planos de discontinuidad generados por mecanismos equivalentes a los descritos previamente, aunque en este caso las fisuras se encuentran rellenas por minerales depositados por la circulación de fluidos ascendentes (relacionados con la evolución postmagmática del cuerpo plutónico o con actividad hidrotermal posterior) o descendentes (relacionados con la circulación de agua meteórica). En los rellenos pueden encontrarse calcita, cuarzo o productos micáceos o arcillosos producidos en los procesos de alteración asociados a la circulación de los fluidos. La mayoría de los rellenos de fractura tienen un grosor inferior a 1 mm.

En las dos zonas de fracturación asociadas a fallas tardihercínicas o alpinas los granitos presentan un grado de rotura y brechificación variable y están afectados por alteraciones hidrotermales debidas a la circulación de posibles fluidos termales mineralizados. Estas zonas se localizan a profundidades de 66,6 m y 93 m respectivamente, siendo la segunda mucho más importante y asociándose a ella una episienitización intensa de los granitos, que adquieren una coloración rosada. En esta zona se produce además una importante cloritización y epidotización de la biotita, carbonataciones y una movilización del cuarzo que se encuentra relleno algunas de las fracturas. También se observan procesos importantes de argilización de los granitos, que están posiblemente relacionados con reajuegos tardíos de la zona de fractura, acompañados por alteraciones a baja temperatura asociadas a la circulación de aguas superficiales. Los testigos de esta zona corresponden a granitos muy brechificados, alterados y partidos en pequeños fragmentos. Se observan planos de fractura con buzamientos comprendidos entre 70° y 75° y estrías con inmersiones altas, aunque en algunos casos se

encuentran inmersiones más bajas que indican movimientos con una componente de desgarre. Tanto las interferencias entre distintos planos de rotura, como las diferencias existentes entre el tipo de alteración de los granitos, indican que ha habido superposición de al menos dos etapas de fracturación. En el resto del sondeo el tipo de fracturas dominantes tienen buzamientos menores de  $45^\circ$  y se asocian principalmente a la descarga erosiva y a la relajación debida a la extracción de los granitos.

Con respecto a la distribución general de la fracturación puede distinguirse un tramo superior, comprendido entre 0 y 55 m, en el que la fracturación es muy baja. Por debajo de esta zona, la densidad de fracturación experimenta un aumento considerable, apreciándose una serie de máximos y mínimos que presentan un espaciado medio entre picos del orden de 20 m, figura 2b. Esta configuración es posiblemente debida a que la extracción de los testigos, a partir de una determinada profundidad, produce una relajación de esfuerzos muy brusca, con la consiguiente generación de fracturas. Por este motivo, en los tramos superficiales, en los que la carga es inferior, la relajación es menos importante, dando lugar a una menor fracturación.

Cabe destacar que una gran parte de las fracturas y fisuras observadas en los testigos son debidas a la mencionada relajación de esfuerzos al liberar a los granitos de la carga de los materiales suprayacentes. Estas fracturas son realmente de carácter virtual, ya que no están desarrolladas en los granitos en profundidad y por tanto carecen de efectividad en cuanto a la transmisividad de fluidos. Por tanto, las únicas fracturas en las que existe constancia de que se haya producido circulación de fluidos son aquellas que tienen asociadas alteraciones o rellenos minerales, aunque estos mismos rellenos hayan producido un efecto de sellado e impermeabilización.

Estas consideraciones determinan que, en este caso, el estudio de la fracturación, desde el punto de vista de su influencia en la permeabilidad de los materiales graníticos, debe centrarse principalmente en las fracturas relacionadas con zonas de falla y en las asociadas con cualquier tipo de alteración.

### **Instrumentación y metodología de la caracterización hidráulica**

Se pueden definir los medios de baja permeabilidad como aquellas formaciones geológicas que no almacenan agua en cantidad apreciable o que solamente son capaces de transmitirla muy lentamente. Esto supone, en principio, la idea de una difícil o nula uti-

lización del agua presente en la formación. Sin embargo, el escaso aprovechamiento como fuente de recursos hídricos de este tipo de medios tiene como contrapartida su utilidad como barrera geológica natural.

Las formaciones de baja permeabilidad, en función de su valor de conductividad hidráulica, se pueden subdividir en: formaciones de muy baja permeabilidad, con valores de conductividad hidráulica ( $k$ ) menores de  $1 \times 10^{-12}$  m.s $^{-1}$ ; formaciones de baja permeabilidad, con valores de conductividad hidráulica comprendidos entre  $1 \times 10^{-12}$  m.s $^{-1}$  y  $1 \times 10^{-9}$  m.s $^{-1}$ ; formaciones poco permeables, con valores superiores a  $1 \times 10^{-9}$  m.s $^{-1}$  e inferiores a  $1 \times 10^{-7}$  m.s $^{-1}$  y, por último, formaciones algo permeables con valores de conductividad hidráulica comprendidos entre  $1 \times 10^{-7}$  m.s $^{-1}$  y  $1 \times 10^{-5}$  m.s $^{-1}$  (Mejías y López-Geta, 2003).

Los trabajos de caracterización hidráulica de la formación granítica descrita se han llevado a cabo por medio de la Unidad Móvil de Hidrogeología (UMH), constituida por dos camiones todoterreno (Mejías *et al.*, 1998). El primero, denominado Vehículo Base, incluye el sistema de adquisición e interpretación de datos, el de inflado de los obturadores, el de control de flujo de inyección y el equipo de profundidad, así como un área destinada a montaje y mantenimiento de los elementos de la UMH. El segundo, Vehículo de Descenso, tiene como misión el descenso del equipo de profundidad, la ubicación de los carretes del cable de señales y la línea de inflado de los obturadores y el transporte del varillaje, figura 3.

### **Ensayos hidráulicos y metodología de caracterización**

Un ensayo hidráulico es un método de análisis utilizado para determinar las propiedades hidráulicas, las condiciones de borde y las relaciones con el medio físico de una determinada formación geológica que, en general, puede ser considerada como acuífero, o de una sección aislada en ésta mediante obturadores. Su análisis se basa en determinadas fórmulas que implican ciertos supuestos y generalizaciones. Para llevar a cabo una correcta interpretación es preciso prestar especial consideración a las condiciones y limitaciones que llevan consigo los diferentes métodos de análisis.

De forma general, un ensayo hidráulico consiste en aplicar una perturbación controlada en el acuífero o en la sección de la formación a ensayar. Esta perturbación normalmente se basa en el bombeo o inyección de agua desde o en la zona de ensayo. El sondeo donde se realiza esta acción se denomina sondeo activo. El efecto de la perturbación se registra



Fig. 3. Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica operando en campo

*Fig. 3. Mobile Hydrogeological Characterization Unit operating in the field*

mediante la toma de valores de presión y variaciones de caudal.

Las características físicas de los medios de baja y media permeabilidad han llevado al desarrollo de instrumentación específica para la aplicación de ensayos que permitan la estimación de los parámetros hidráulicos, ya que las técnicas aplicadas tradicionalmente en hidrogeología (ensayos de bombeo) producen un agotamiento demasiado rápido de la capacidad máxima del pozo para poder hacer las suficientes medidas con la precisión necesaria, presentan complicaciones técnicas para la regulación de caudales muy bajos y se ven dificultados por tiempos de estabilización de nivel muy dilatados. Por este motivo, se utilizan en su lugar ensayos hidráulicos que conllevan la aplicación de pequeños volúmenes de agua y que pueden realizarse en períodos de tiempo relativamente cortos.

Los principios teóricos básicos de los métodos de ensayo aplicados en el presente trabajo son:

#### *Ensayo de inyección en estado transitorio a nivel constante*

Consiste en la introducción de agua presurizada en la sección de ensayo hasta conseguir un incremento de presión estable, en torno a 20-40 m de columna de agua por encima del nivel inicial, y registrando las variaciones de caudal para mantener constante la presión. Cuando un sondeo (o sección) se ensaya a nivel constante no ocurren efectos de almacenamiento en el pozo, dado que la presión no varía con el tiempo. Sin embargo, la recuperación subsiguiente puede ser afectada de forma importante por los efectos de almacenamiento en pozo.

La solución de la ecuación de la difusividad para el caso de nivel constante fue presentada por Van Everdingen y Hurst (1949) y Jacob y Lohman (1952). Si se representan los valores obtenidos en campo en un gráfico semilogarítmico, inverso del caudal en función del logaritmo del tiempo, se puede realizar su ajuste a una línea recta. La conductividad hidráulica puede ser calculada a partir de la pendiente de la recta mediante la expresión:

$$k = \frac{0,183}{Ho\Delta(1/Q_{(t)})}$$

donde:

$K$  = conductividad hidráulica ( $LT^{-1}$ )

$\Delta(1/Q_{(t)})$  = incremento del inverso del caudal para un ciclo logarítmico ( $TL^{-3}$ )

$Ho$  = presión ( $L$ )

$L$  = longitud de la sección de ensayo ( $L$ ).

#### *Ensayo de inyección en estado estacionario*

El estado estacionario supone que el flujo de agua es constante en magnitud y dirección en todos los puntos del acuífero y que no cambia con el tiempo. Esta situación se presenta muy raras veces en la práctica. En el mejor de los casos puede conseguirse un flujo pseudoestacionario durante un período limitado de tiempo. Para ello se inyecta agua presurizada en la sección de ensayo y se varía el caudal y la presión hasta obtener unas condiciones estacionarias para un período breve de tiempo, de 30 a 40 minutos.

La solución en estado estacionario para una inyección en una sección confinada del pozo activo puede expresarse por (Almen *et al.*, 1986):

$$K = \frac{Q}{\Delta HL} C$$

donde:

$K$  = conductividad hidráulica ( $LT^{-1}$ )

$Q$  = Caudal en estado pseudoestacionario ( $L^3T^{-1}$ )

$\Delta H$  = Incremento de presión ( $L$ )

$L$  = Longitud de la sección de ensayo ( $L$ )

$C$  = Factor de forma adimensional en función de los efectos de flujo.

#### *Ensayo tipo pulso*

Un ensayo de pulso es la respuesta a la inyección (o

extracción) instantánea de un volumen de agua conocido que provoca una sobrepresión (o depresión) en la sección a estudiar. Los fundamentos teóricos tanto para el caso de inyección como para el de extracción son similares. La formulación básica fue establecida por Bredehoeft y Papadopulos (1980) al modificar la de Cooper *et al.* (1967) para ensayos de cuchareo en pozos abiertos. Las hipótesis de partida se fundamentan en considerar el medio homogéneo e isótropo. La sección a testificar actúa a modo de acuífero confinado, el pozo se supone totalmente penetrante y el flujo radial.

Se considera un volumen  $V_w$  de sondeo, aislado del resto mediante obturadores, y el medio físico en condiciones de régimen estacionario. Si en estas condiciones se inyecta instantáneamente un volumen de agua se provoca un aumento de presión en el acuífero igual a (Bredehoeft y Papadopulos, 1980):

$$S_o = \frac{V}{S_w} = \frac{V}{V_w \rho_w g C_{bw}}$$

donde:

$S_o$  = incremento de presión (L)

$V$  = volumen de extracción/inyección ( $L^3$ )

$S_w$  = coeficiente de almacenamiento del sondeo ( $L^2$ )

$V_w$  = volumen de la sección de ensayo ( $L^3$ )

$g$  = aceleración de la gravedad ( $LT^{-2}$ )

$\rho_w$  = densidad del agua ( $ML^{-3}$ )

$C_{bw}$  = compresibilidad del agua ( $LT^2M^{-1}$ )

En el coeficiente de almacenamiento del sondeo ( $S_w$ ) debe tenerse en consideración el término relacionado con la deformabilidad del equipo ( $S_{we}$ ) (Neuzil, 1982). Por lo que, para analizar los ensayos de pulso, es preciso conocer la deformabilidad del equipo usado en su ejecución, ya que un error en su estimación repercute directamente en el cálculo de la transmisividad y del coeficiente de almacenamiento de la formación.  $S_{we}$  debe determinarse experimentalmente y es variable según la instrumentación y configuración elegidas. Para los ensayos de pulso realizados en esta caracterización, con la configuración del equipo de testificación utilizado y para una longitud de sección de ensayo en la fase de reconocimiento general de 18,79 m, se obtuvo un valor de  $S_{we}$  de  $5,41 \times 10^{-5} m^2$ , para un valor experimental de compresibilidad efectiva de  $2,78 \times 10^{-8} Pa^{-1}$  (Martínez Navarrete *et al.*, 1995).

La solución de Bredehoeft y Papadopulos (1980) viene dada por:

$$H = s_0 F(\alpha, \beta)$$

siendo F una función integral tabulada para diferentes valores de  $\alpha$  en función de  $\beta$ .

$\alpha$  y  $\beta$  se definen por las expresiones:

$$\alpha = \frac{\pi r_w^2 S}{V_w C_{bw} \rho_w g + S_{we}} = \frac{\pi r_w^2 S}{S_w}; \quad \beta = \frac{\pi T t}{V_w C_{bw} \rho_w g + S_{we}} = \frac{\pi T t}{S_w}$$

donde:

$r_w$  = radio del sondeo en la sección de ensayo (L)

$S$  = coeficiente de almacenamiento

$T$  = Transmisividad ( $L^2 T^{-1}$ )

$t$  = tiempo (T)

$S_{we}$  = deformabilidad del equipo ( $L^2$ )

$\alpha$  se puede interpretar como un coeficiente de almacenamiento adimensional (relación entre el almacenamiento del acuífero y el del sondeo) y  $\beta$  como un tiempo adimensional.

Con este tipo de ensayos se pueden obtener valores de conductividad hidráulica de hasta  $N \times 10^{-14} m \cdot s^{-1}$ , si bien está sujeto a diversos condicionantes (modo de ejecución, compresibilidad del equipo, efecto piel, periodo de estabilización, efectos termales, sellado de los obturadores, etc) que pueden hacer que su interpretación resulte muy delicada, dando lugar a errores de interpretación de hasta 2 órdenes de magnitud, que, en general, se reducen a 1 orden de magnitud o menos si se utilizan valores reales de compresibilidad del equipo al realizar su interpretación.

### Ensayo tipo slug

La formulación y fundamentos son muy similares a los de pulso, variando básicamente en el coeficiente de almacenamiento del sondeo ( $S_w$ ). En un pulso, como se ha mencionado anteriormente, el almacenamiento está relacionado con la compresibilidad del equipo y la del agua en la zona de ensayo, mientras que en un slug depende de la sección de la tubería de acceso y viene dado por la expresión:

$$S_w = \pi r_v^2$$

donde  $r_v$  corresponde al radio del varillaje donde se produce el cambio de nivel. Al permanecer el intervalo abierto durante la recuperación, las variaciones de volumen de agua inyectada/extraída son proporcionales a dicha sección. Tanto la evolución de niveles durante el ensayo, como las condiciones de contorno en las cuales ésta se resuelve son similares a las de un ensayo de pulso.

La solución viene dada por Cooper *et al.*, 1967:

$$\frac{H}{H_0} = F(\alpha, \beta)$$

donde,

$$\beta = \frac{Tt}{r_v^2} \quad T = \frac{r_v^2}{t} \beta$$

$$\Rightarrow$$

$$\alpha = \frac{r_v^2 S}{r_v^2} \quad S = \frac{r_v^2}{r_v^2} \alpha$$

La determinación de T y S se realiza por comparación con curvas tipo, bien de manera analítica o mediante códigos de interpretación. En la Unidad Móvil de Hidrogeología, el código de interpretación utilizado es Aquifer Test (Waterloo Hydrogeologic, 2002).

#### Metodología de caracterización hidráulica

La metodología de caracterización a aplicar en un sondeo de investigación en rocas fracturadas consta de dos fases: de reconocimiento general y de reconocimiento detallado (Mejías y López-Geta, 2003).

La fase de reconocimiento general consistirá básicamente en la realización de ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario, en secciones de una longitud en torno a un 10% de la profundidad del sondeo, con dispositivo doble obturador, y con una duración suficiente para conseguir un estado pseudoestacionario. La duración de la fase de inyección de cada uno de los ensayos estará en torno a 30-40 minutos, seguidos de una recuperación del mismo orden. Los valores obtenidos de conductividad hidráulica no tienen la precisión que los obtenidos mediante otros tipos de ensayos, pudiendo variar hasta un orden de magnitud respecto a los ensayos de inyección en régimen transitorio, pero se obtiene una estimación bastante precisa del comportamiento de la formación en las proximidades del área ensayada y la distribución de permeabilidades en el sondeo, utilizando tiempos de testificación relativamente cortos.

En el presente trabajo, y con el objetivo de realizar un estudio comparativo de los diferentes métodos de ensayo lo más amplio posible, se ha realizado también en esta primera fase un ensayo de inyección en régimen transitorio a nivel constante en cada una de las secciones de ensayo previstas.

En esta fase también resulta de interés la realiza-

ción de un ensayo de inyección en régimen transitorio a columna completa, con dispositivo de un solo obturador, que aporte una información general de la permeabilidad del sondeo y que sirva como valor de referencia con los resultados obtenidos en cada una de las secciones. Obtenida una primera distribución de conductividad hidráulica y junto con la información recabada de los testigos de perforación y la testificación geofísica relativa a orientación, densidad, longitud, apertura, rugosidad y relleno de las discontinuidades y fracturas, se procede a establecer las secciones de ensayo a testificar en la segunda fase.

En la fase de reconocimiento detallado la longitud de la sección de ensayo será mucho menor que en la fase anterior, habitualmente se emplearán longitudes de ensayo entre 1 y 6 m, estando la longitud de la sección influenciada por el tamaño del área de la discontinuidad a caracterizar y por las limitaciones debidas al estado de las paredes del sondeo para obtener un correcto sellado de los obturadores. Deberá, por tanto, conseguirse un equilibrio entre ambas limitaciones que implique la realización del mayor número posible de ensayos con una misma longitud de sección, consiguiendo de esta manera evitar en lo posible reiteradas fases de instrumentación/desinstrumentación del sondeo para modificar la longitud de la sección de ensayo. La testificación se realizará con dispositivo de doble obturador, con control de la presión en las secciones infrayacente y suprayacente a la sección de ensayo.

La secuencia general de ensayo para una sección dada comienza con un ensayo de inyección a nivel constante o caudal constante; en la mayoría de los casos es preferible utilizar el primero debido a que no existen efectos de almacenamiento en el sondeo y la deformación en el equipo se puede considerar despreciable desde el inicio de la medida de variación de caudal, una vez estabilizada la presión. También, a efectos prácticos, resulta más fácil llevar a cabo variaciones muy pequeñas de caudal para mantener constante la presión.

La duración mínima del período de inyección debe estar en torno a 3 horas, de manera que afecte a un volumen mayor de roca y no sólo al área más próxima como ocurre en los ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario o en régimen transitorio con tiempos de inyección más cortos. El volumen de roca afectado dependerá de la duración del ensayo y de los parámetros hidráulicos de la formación. Al incrementar el volumen de roca afectado, el valor de conductividad hidráulica se aproxima más a un valor medio representativo del macizo rocoso ensayado. Si se continúa aumentando el volumen de roca ensaya-

do llega un momento, variable dependiendo de las características hidráulicas de la formación, en que los parámetros hidráulicos no varían de forma significativa, debiendo valorarse, en función de los objetivos del estudio, el punto de equilibrio entre duración del ensayo y representatividad de los valores, pudiendo llegarse a ensayos de larga duración para analizar conectividad de fracturas y condiciones de borde.

Finalizada la fase de inyección se deberá registrar una fase de recuperación con una duración aproximadamente del mismo orden de magnitud que la primera. El análisis de la fase de recuperación servirá para comparar los valores de conductividad hidráulica obtenidos en ambas fases y suele aportar información sobre el grado de conexión del sondeo con la formación. También es interesante para verificar el correcto funcionamiento del registro automático de niveles y la detección de posibles fugas en la sarta.

El límite inferior teórico de conductividad hidráulica para aplicación de los ensayos de inyección con la instrumentación descrita es de  $N \times 10^{-12}$  m.s<sup>-1</sup>, si bien, debido, entre otros, a efectos termales y de cierre de los obturadores, el límite inferior de conductividad hidráulica que se puede considerar más fiable para este tipo de ensayos viene a ser un orden de magnitud mayor. Por tanto, en las secciones en que se obtengan valores de conductividad hidráulica inferiores a  $N \times 10^{-10}$  m.s<sup>-1</sup> en los ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario, y valores de conductividad hidráulica inferiores a  $N \times 10^{-11}$  m.s<sup>-1</sup> en los ensayos de inyección en régimen transitorio, y, en general, como valor de comparación en determinados casos en que

se obtengan valores de conductividad hidráulica en torno a los órdenes de magnitud citados, resulta conveniente realizar un ensayo de pulso.

## Resultados

Entre las dos fases descritas en el epígrafe anterior se han realizado 32 ensayos hidráulicos: 10 ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario, 11 ensayos de inyección en régimen transitorio a nivel constante, 3 de recuperación, 2 tipo slug y 6 ensayos de pulso. Los valores obtenidos de conductividad hidráulica en cada intervalo, para cada tipo de ensayo, así como el nivel piezométrico de cada sección, se resumen en la Tabla 2.

Desde el punto de vista de la instrumentación, la realización de los ensayos no ha tenido incidencias reseñables, la perfecta estabilidad y uniformidad de las paredes del sondeo ha permitido la introducción y extracción del equipo de profundidad sin ninguna incidencia. Los obturadores se han inflado con nitrógeno a presiones comprendidas entre 10 y 50 bar, en función de la posición del intervalo a ensayar, la profundidad del nivel piezométrico y la presión de inyección. Se ha controlado la evolución de la presión en los intervalos supra e infrayacente a la sección de ensayo sin que se haya producido en ningún caso un incremento anómalo de presión en las mismas.

En la figura 4 se representa la distribución de la conductividad hidráulica en función de la profundidad del sondeo incluyendo los ensayos realizados en las dos fases. Los valores representados para cada

Sección (m)	Inyección pseudoestacionario K (m.s <sup>-1</sup> )	Inyección nivel constante K (m.s <sup>-1</sup> )	Recuperación K (m.s <sup>-1</sup> )	Slug K (m.s <sup>-1</sup> )	Pulso K (m.s <sup>-1</sup> )	Nivel Piezométrico (m s.n.m.)
<b>FASE 1</b>						
13,00-31,79	3,24x10 <sup>-7</sup>			9,42x10 <sup>-8</sup>	2,67x10 <sup>-9</sup>	831,84
31,21-50,00	2,74x10 <sup>-8</sup>	3,05x10 <sup>-9</sup>				831,29
54,71-73,50	5,8x10 <sup>-11</sup>	1,15x10 <sup>-11</sup>	1,17x10 <sup>-11</sup>			835,15
77,31-96,10	2,5x10 <sup>-9</sup>	6,88x10 <sup>-10</sup>				831,63
97,36-116,15	1,36x10 <sup>-11</sup>	8,2x10 <sup>-13</sup>			8,97x10 <sup>-9</sup>	831,61
121,50-140,29	3,25x10 <sup>-10</sup>	4,6x10 <sup>-12</sup>				834,25
141,29-160,08	8,2x10 <sup>-10</sup>	1,76x10 <sup>-11</sup>				831,52
161,00-179,80	9,3x10 <sup>-10</sup>	3,12x10 <sup>-11</sup>	7,12x10 <sup>-11</sup>			831,50
177,00-195,79	9,31x10 <sup>-10</sup>				9,82x10 <sup>-10</sup>	833,30
15,68-200,00		2,9x10 <sup>-10</sup>	3,5x10 <sup>-9</sup>			831,55
<b>FASE 2</b>						
32,00-37,83		2,63x10 <sup>-9</sup>		1,8x10 <sup>-9</sup>	2,71x10 <sup>-10</sup>	830,73
63,15-68,98		5,96x10 <sup>-11</sup>			7,25x10 <sup>-10</sup>	834,10
91,50-97,33	3,14x10 <sup>-10</sup>	4,68x10 <sup>-11</sup>			8,9x10 <sup>-9</sup>	833,96

Tabla 2. Valores de conductividad hidráulica y nivel piezométrico obtenidos en los ensayos hidráulicos  
 Table 2. Hydraulic conductivity and hydraulic head values obtained by hydraulic tests

intervalo ensayado corresponden en su mayoría al obtenido en ensayos de inyección en régimen transitorio a nivel constante, más representativo, en principio, que los obtenidos por otros métodos, a excepción de la sección más superior, 13-31,79 m, en que se ha tomado el valor de conductividad hidráulica del ensayo de inyección en régimen pseudoestacionario, y la sección más profunda, 177-195,79 m, en que el valor representado corresponde al obtenido mediante un ensayo tipo Pulso.

La mayoría de los ensayos aportan un valor de conductividad hidráulica comprendido entre  $N \times 10^{-9}$   $m \cdot s^{-1}$  y  $N \times 10^{-11}$   $m \cdot s^{-1}$ , lo que corresponde a un medio físico que podríamos clasificar como de baja permeabilidad, y sólo el intervalo más superficial, 13-31,79 m, presenta un valor más alto, del orden de  $N \times 10^{-7}$   $m \cdot s^{-1}$  y el intervalo 97,36-116,15 m que presenta el valor más bajo de conductividad hidráulica,  $8,2 \times 10^{-13}$   $m \cdot s^{-1}$ , que puede clasificarse como un tramo de muy baja permeabilidad. La distribución de conductividad hidráulica en función de la profundidad presenta un primer tramo en que se produce una disminución desde el intervalo más superficial,  $3,24 \times 10^{-7}$   $m \cdot s^{-1}$  (ensayo de inyección en régimen pseudoestacionario), hasta una profundidad comprendida entre 97,36-

116,15 m en que se obtiene el anteriormente reseñado valor más bajo de conductividad hidráulica,  $8,2 \times 10^{-13}$   $m \cdot s^{-1}$  (ensayo de inyección en régimen transitorio a nivel constante). A partir de esta última profundidad se produce un incremento de la conductividad hidráulica hasta situarse, en el tramo 177-195,79 m, en  $9,82 \times 10^{-10}$   $m \cdot s^{-1}$ .

En la primera fase se incluye la realización de un ensayo de inyección en régimen transitorio a nivel constante a columna completa; en este caso el intervalo estudiado fue entre 15,68 y 200 m. El valor de conductividad hidráulica obtenido fue de  $2,9 \times 10^{-10}$   $m \cdot s^{-1}$  que, como cabía esperar, corresponde a un valor intermedio entre los valores obtenidos para las diferentes secciones. Este dato sirve, por una parte, como valor de referencia respecto a los valores obtenidos en cada una de las secciones estudiadas y, por otra parte, aporta una información general del comportamiento hidráulico del sondeo en los casos en que no se lleve a cabo una testificación más detallada.

Una vez finalizada la fase de reconocimiento general, y en función de los resultados obtenidos en ésta y en el estudio litológico estructural, se eligieron tres intervalos, con una longitud de sección bastante menor que la utilizada en la primera fase, para su caracterización en la fase de reconocimiento detallado, correspondientes a aquellas zonas con una relativamente mayor fracturación. Estos intervalos fueron referidos a las profundidades siguientes: 32-37,83 m; 63,15-68,98 m y 91,5-97,33 m. No se tuvo en cuenta el tramo más superficial, a pesar de que había aportado los valores de conductividad hidráulica más altos en la fase de reconocimiento general, ya que debido a posibles factores de alteración superficial así como a la afección sufrida por la explotación de uno de los frentes de la cantera, situado a unos 40 m del sondeo, no se consideró representativo del macizo granítico.

En el primero de los intervalos analizados en detalle el valor de conductividad hidráulica obtenido fue de  $2,63 \times 10^{-9}$   $m \cdot s^{-1}$  muy similar al resultado de la sección de la primera fase en que se encuentra incluido, 31,21-50 m, que fue de  $3,05 \times 10^{-9}$   $m \cdot s^{-1}$ . El segundo intervalo, 63,15-68,98 m, presentó un valor de  $5,96 \times 10^{-11}$   $m \cdot s^{-1}$ , muy próximo también al de la sección de la primera fase que lo incluía, 54,71-73,5 m, en que se obtuvo un resultado de  $1,15 \times 10^{-11}$   $m \cdot s^{-1}$ . Por último, el intervalo 91,5-97,33 m dio un valor de conductividad hidráulica de  $4,68 \times 10^{-11}$   $m \cdot s^{-1}$ , en el ensayo de inyección a nivel constante, y de  $3,14 \times 10^{-10}$   $m \cdot s^{-1}$ , en el ensayo de inyección en régimen pseudoestacionario. La sección de la primera fase más próxima a ésta, 77,31-96,1 m, presentó un valor de  $6,88 \times 10^{-10}$   $m \cdot s^{-1}$  en el ensayo de inyección a nivel constante. Mientras que en las dos primeras secciones la zona más frac-

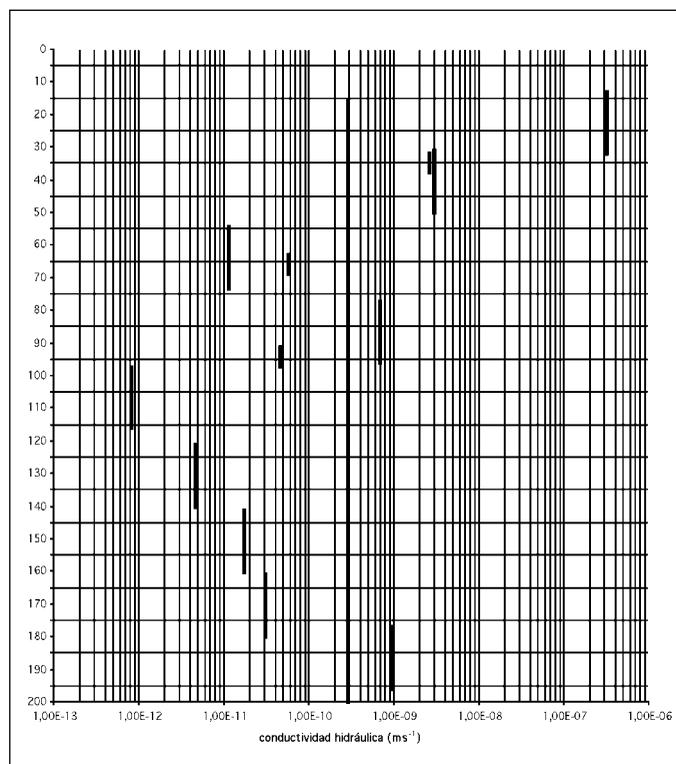


Fig. 4. Distribución de la conductividad hidráulica en función de la profundidad

Fig. 4. Distribution of the hydraulic conductivity versus depth

turada estudiada en detalle parece definir la conductividad hidráulica del tramo ensayado, en el tercer intervalo no sólo no se produce esta circunstancia sino que además esta zona más fracturada presenta una conductividad hidráulica ligeramente menor que la porción de macizo rocoso de su proximidad.

Por último, para cada una de las secciones estudiadas se obtuvo el nivel piezométrico correspondiente. El nivel del sondeo completo fue de 831,55 m s.n.m, obteniéndose para la mayoría de las secciones un valor muy próximo al mismo, con diferencias centimétricas debidas a la propia fluctuación de nivel durante los dos meses aproximadamente que duró la realización de los trabajos. Tan sólo en 4 secciones se produce un incremento de nivel reseñable con respecto al nivel general del sondeo. Los intervalos con un incremento más significativo son: 54,71-73,5 m, 91,5-97,33 m y 121,5-140,29 m, con 3,6 m, 2,4 m y 2,7 m respectivamente. Los dos primeros coinciden con las zonas de falla descritas en el epígrafe correspondiente y corresponden a secciones con valores de conductividad hidráulica de  $1,15 \times 10^{-11}$ ,  $4,68 \times 10^{-11}$  y  $4,6 \times 10^{-12}$  m.s<sup>-1</sup> respectivamente, sin que a partir únicamente de estos valores se puede establecer conclusiones respecto a la distribución del flujo del agua subterránea en la zona de estudio.

### Discusión de los resultados

Los ensayos hidráulicos más utilizados han sido los de inyección en régimen transitorio a nivel constante y los de inyección en régimen pseudoestacionario, completados en determinadas secciones con ensayos de recuperación, slug y pulso. Se han llevado a cabo 32 ensayos hidráulicos, distribuidos en 12 secciones. En cada sección se han realizado entre dos y tres ensayos diferentes dependiendo de la disponibilidad de tiempo y, en ocasiones, de la prioridad de no entorpecer las labores de explotación minera en la cantera donde se encuentra ubicado el sondeo de reconocimiento. Así mismo, se han tenido en cuenta, para el análisis comparativo entre métodos de ensayo, los resultados obtenidos en otras campañas de testificación hidráulica llevadas a cabo en formaciones metamórficas y volcánicas (Mejías *et al.*, 2002).

En función de los objetivos del estudio se ha ejecutado una primera fase de interpretación analítica básica de los resultados de campo, con la finalidad de obtener un valor representativo de conductividad hidráulica para cada una de las secciones ensayadas y establecer una comparación con los datos aportados por el estudio litológico y estructural. No se ha profundizado por tanto en esta primera etapa de

interpretación en aspectos relacionados con modelos geométricos de flujo, efectos de almacenamiento, efecto "piel", doble porosidad, establecimiento de límites hidráulicos, interacción adicional sobre fracturas, etc.

La interpretación de los ensayos de inyección en régimen transitorio a nivel constante se ha realizado de forma analítica (Jacob y Lohman, 1952). En general, se ha obtenido un razonable alineamiento de los datos de campo, permitiendo un buen ajuste de la línea de interpretación. No obstante, cabe señalar algunas peculiaridades en determinados ensayos:

- En ocasiones se produce en el tramo final de los valores de campo una tendencia a un alineamiento vertical, es decir, una sensible disminución del caudal inyectado a partir de tiempos de inyección en torno a 100 minutos. En la figura 5 se observa la interpretación gráfica del ensayo de inyección correspondiente a la sección 31,21-50 m. Esta situación parece producida por una disminución de la conductividad de las fracturas, posiblemente por cerramiento de las mismas o disminución de la conexión entre discontinuidades en zonas relativamente más alejadas del sondeo. Este efecto se produce en cuatro de los 11 ensayos de inyección a nivel constante llevados a cabo.
- Otra incidencia es la aparición de una cierta dispersión en los valores de los pares tiempo-inverso de caudal, con tendencia a la formación de intervalos horizontales paralelos, cuando la magnitud de caudal medido está próximo al límite inferior de medida del caudalímetro pequeño, figura 6. Este límite inferior teórico es de 0,0005 L min<sup>-1</sup>, si

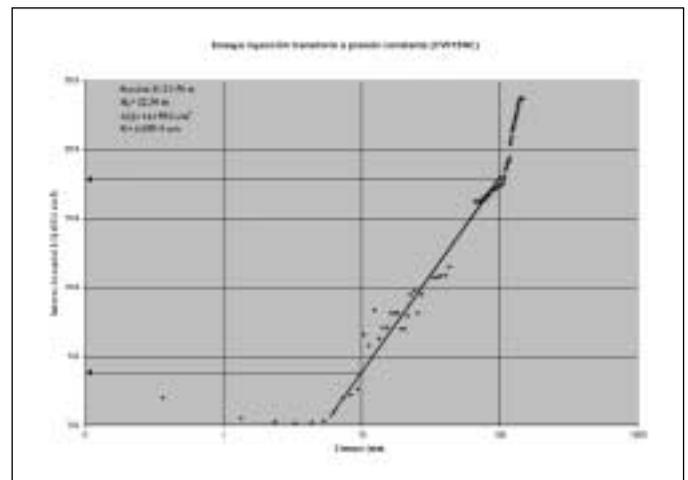


Fig. 5. Interpretación analítica de un ensayo de inyección a nivel constante, sección 31,21-50 m  
 Fig.5. Analytical Interpretation of a constant head injection test, interval 31,21-50 m

bien el efecto citado se produce cuando se miden caudales inferiores a  $0,003 \text{ L min}^{-1}$ . La tendencia al alineamiento horizontal de los valores medidos se produce sólo en el tramo final, cuando el caudal registrado alcanza valores muy pequeños.

En los ensayos de calibración del sistema de control de flujo se estimó que el error máximo en la medida de caudal para valores inferiores a  $0,001 \text{ L min}^{-1}$  era de 10,2% (Mejías *et al.*, 1995) lo que supone un error aceptable con respecto al valor final de conductividad hidráulica obtenido para este rango de caudales.

- En el ensayo de inyección a nivel constante correspondiente al tramo 121,5-140,29 m se pueden ajustar dos rectas con distinta pendiente. La primera para tiempos de inyección hasta 30 minutos, y a continuación se produce un incremento significativo del caudal de inyección, que pasa de valores en torno a  $10 \text{ ml min}^{-1}$  hasta valores de  $40 \text{ ml min}^{-1}$  para, posteriormente, producirse una rápida disminución del caudal inyectado a partir del minuto noventa de inyección hasta el final del ensayo, con valores en torno a  $4 \text{ ml min}^{-1}$ . En la figura 7 se pueden observar ambas rectas, con diferente pendiente, y el resultado obtenido en cada caso.

La interpretación de esta respuesta correspondería al comportamiento de una sección con una zona próxima al sondeo en que existe una mayor conductividad hidráulica de las fracturas, dando lugar a un aumento del caudal de inyección, para, posteriormente, producirse una disminución de caudal en zonas relativamente más alejadas del

sondeo por cierre de las fracturas o menor grado de conexión entre las mismas. La diferencia entre los dos valores de conductividad hidráulica obtenidos es de prácticamente un orden de magnitud.

- Por último, se producen en ocasiones desplazamientos laterales de la recta de ajuste a los datos de campo, pero manteniendo la misma pendiente, que se corresponden con variaciones de la instrumentación utilizada, bien por cambio en el control de medidas del caudal del caudalímetro grande al pequeño, o bien por cambio de válvula de regulación cuando se producen variaciones de caudal en los límites inferiores de regulación de éstas.

En cuanto a los ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario se han realizado 10 tests cuya ejecución no ha presentado ningún problema reseñable; en dos casos se han obtenido valores de conductividad hidráulica de  $\text{Nx}10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$  lo que supone el límite inferior práctico de fiabilidad para este tipo ensayos. La interpretación se ha realizado mediante la aplicación de las ecuaciones para condiciones estacionarias, utilizando como datos de caudal y presión los valores obtenidos durante el tramo final del ensayo.

Finalmente, los ensayos tipo slug y pulso han presentado más incertidumbres, tanto en su ejecución como en su interpretación. Del primero se han realizado sólo dos ensayos, ya que los valores de conductividad hidráulica obtenidos en la fase de reconocimiento general quedaban fuera del rango de aplicación de este tipo de ensayos; no así los ensayos de pulso, para los que los valores obtenidos en las restantes pruebas los enmarcaban en un intervalo

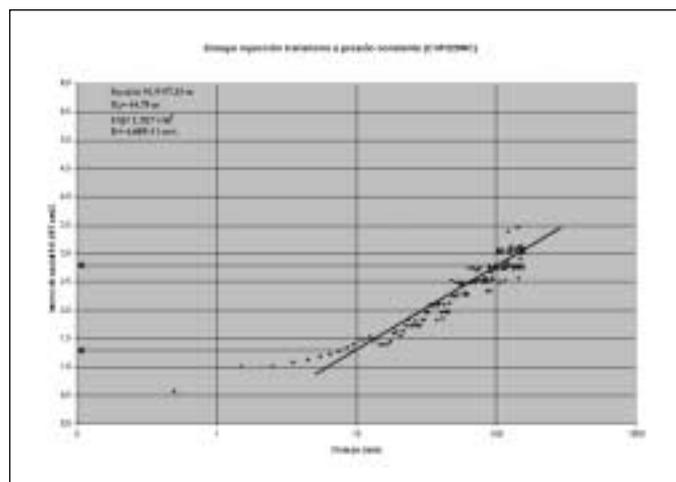


Fig. 6. Interpretación analítica de un ensayo de inyección a nivel constante, sección 91,5-97,33 m  
 Fig. 6. Analytical Interpretation of a constant head injection test, interval 91,5-97,33 m

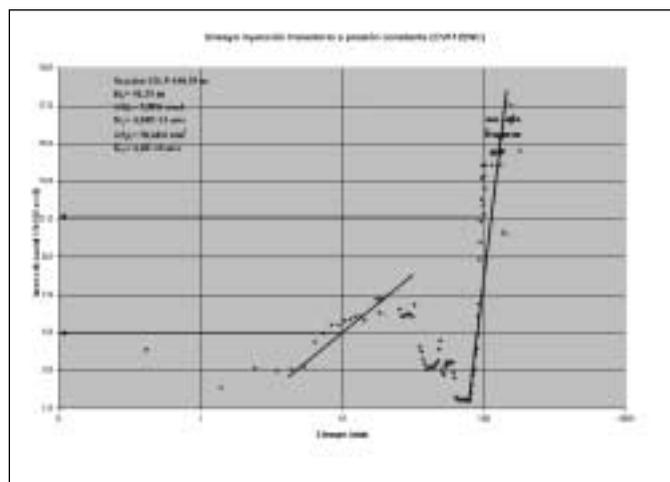


Fig. 7. Interpretación analítica de un ensayo de inyección a nivel constante, sección 121,5-140,29 m  
 Fig. 7. Analytical interpretation of a constant head injection test, interval 121,5-140,29 m

idóneo de aplicación. Los ensayos slug y de pulso proporcionan una estimación de la conductividad hidráulica en un entorno muy próximo al del sondeo, pudiendo estar afectados, entre otros, por las labores de perforación, si bien en el sondeo de reconocimiento de este estudio se disminuyeron al máximo estos factores. La interpretación de estos ensayos se ha realizado de forma automática mediante el código Aquifer Test Pro (Waterloo Hydrogeologic, 2002) por ajuste de los datos de campo a las curvas patrón de Cooper *et al.*, 1967. En ambos tipos de ensayos el ajuste de los datos de campo a las curvas patrón no ha sido bueno en términos generales, resultando mejor en los dos ensayos tipo slug y más deficiente en los 6 ensayos de pulso, especialmente en los valores correspondientes a los primeros tiempos de registro.

Tanto en la ejecución como en la interpretación de los ensayos de pulso existen una serie de incertidumbres que dificultan la obtención de un valor representativo de conductividad hidráulica y que, en la práctica, son complicados de controlar. A continuación se enumeran los principales factores que pueden afectar a la interpretación y ejecución de los ensayos de Pulso y las prevenciones tomadas en este trabajo para paliar en lo posible estas incertidumbres:

- Magnitud de la compresibilidad efectiva del equipo utilizado: cuando se realiza un ensayo de pulso, la compresibilidad del agua debe ser tenida en cuenta para evaluar el cambio en el almacenamiento en la sección de ensayo, pero la compresibilidad de la instrumentación aplicada suele ser mayor que la del agua (Neuzil, 1982), resultando necesario obtener la compresibilidad efectiva para una configuración de equipo determinada. Para la interpretación de los ensayos de Pulso se ha utilizado el valor de compresibilidad efectiva obtenido experimentalmente para el dispositivo estándar del equipo de profundidad:  $2,78 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$  (Martínez-Navarrete *et al.*, 1995).
- Efecto piel: en un ensayo de pulso se produce una variación de volumen de agua muy pequeña en la sección de ensayo que da lugar a un significativo incremento o descenso de presión. Este volumen podría ser fácilmente disipado en una piel de espesor finito con un cierto almacenamiento, por lo que los datos obtenidos podrían reflejar las propiedades hidráulicas de esta piel que recubriera el sondeo, especialmente en los primeros tiempos de ensayo (Moench and Hsieh, 1985). En esta primera etapa de interpretación no se han aplicado los métodos de análisis de pulso que incluyen el efecto piel (Ramey *et al.*, 1975) (Moench and Hsieh, 1985), presuponiendo que la forma de operación durante la perforación ha minimizado la

posibilidad de que se produzca este efecto. No obstante, el propio proceso de perforación puede producir un incremento de la permeabilidad en el espacio anular más próximo al sondeo, o el depósito de una delgada película en las paredes del sondeo procedente del propio material perforado. Por lo que en una segunda etapa de interpretación más elaborada se aplicará este tipo de análisis.

- Estabilización del nivel de agua: resulta imprescindible obtener un nivel estable antes de comenzar cualquier tipo de ensayo hidráulico para que se cumplan las premisas supuestas al realizar el análisis. De lo contrario, y en el caso de los ensayos de pulso, se debería interpretar el ensayo suponiendo desconocido el nivel estático, pero esto complica notablemente su análisis. Una vez finalizado el inflado de los obturadores se ha procedido al cierre de la válvula de ensayo, aislando el intervalo a caracterizar de la sarta, lo que permite una estabilización más rápida de la presión en la sección de ensayo y reduce el almacenamiento. El tiempo de estabilización ha sido de al menos 24 horas, y en alguno de los ensayos se ha llegado a varios días desde el cierre de la válvula de ensayo hasta la ejecución del test.
- Efectos termales: Durante todo el desarrollo de los ensayos tipo pulso se han tomado los valores de temperatura en la sección de ensayo. El sistema de adquisición de datos permite obtener una precisión en la medida de temperatura de  $1^\circ \text{C}$ . En ninguno de los ensayos de pulso realizados se ha observado cambios en el registro de temperatura durante la ejecución de los mismos. No obstante, dados los bajos valores de conductividad hidráulica obtenidos en las secciones en que se han aplicado ensayos de pulso y, por tanto, el escaso volumen de agua introducido en la sección de ensayo, con valores comprendidos entre 0,023 L y 0,0045 L, podría haber sido aconsejable un control de temperatura más preciso pero que, por otra parte, conllevaría una importante complicación instrumental.
- Sellado de los obturadores: el volumen de agua desplazado durante el inflado de los obturadores se obtuvo experimentalmente, para el mismo tipo de obturador utilizado en los ensayos, una presión de inflado de 20 bar y con una longitud de sección de ensayo de 1,965 m, resultando que a los 15 minutos desde el inicio del inflado el caudal de agua desplazado era de  $0,0004 \text{ L min}^{-1}$  (Martínez-Navarrete *et al.*, 1995). Por lo que, en principio, debe considerarse que no existe afección a las medidas por el posible caudal de agua desplazado en el acoplamiento de los obturadores, una vez

transcurridos tiempos largos de estabilización del nivel tras su inflado.

- Apertura/cierre de la válvula de ensayo: uno de los factores claves en la realización de un pulso es la duración del proceso de apertura/cierre de la válvula de ensayo. Así, se puede distinguir entre pulso "sensu stricto" o de inyección instantánea y pulso de duración finita. En este caso, la válvula de ensayo utilizada se ha operado neumáticamente para profundidades de ensayo menores de 100 m e hidráulicamente para profundidades mayores. El proceso de apertura en sentido estricto de la válvula se ha considerado como instantáneo, y como tal se ha llevado a cabo la interpretación (Connell, 1994). No obstante, transcurre un tiempo desde que se acciona en superficie el dispositivo de apertura/cierre hasta que éste se trasmite en profundidad. En el caso de la operación neumática transcurren unos 20 segundos, mientras que la operación hidráulica está en torno a 30 segundos. Este tiempo de espera, junto con la pequeña inercia en el tiempo de respuesta del Sistema de Adquisición de Datos, puede dar lugar a una cierta descoordinación de los valores de presión registrados en los primeros segundos, que desaparece cuando se espacia la toma de datos a cada 3 ó 5 segundos.

A pesar de las precauciones citadas para cada una de las incertidumbres anteriores, la suma de todas ellas, o la posible afección en según que casos de unas sobre otras, explicaría el deficiente ajuste entre los datos de campo y las curvas patrón comentado para los ensayos de pulso. La adición de estas incertidumbres puede llegar a producir un error en la estimación de la conductividad hidráulica por medio de ensayos de pulso de hasta dos órdenes de magnitud, que suele reducirse a un orden de magnitud cuando se utilizan valores reales de compresibilidad efectiva.

## Conclusiones

Respecto al análisis comparativo entre ensayos en una misma sección se pueden obtener las determinaciones siguientes:

- En general se ha producido un acuerdo muy bueno entre los valores de conductividad hidráulica obtenidos por los diferentes tipos de ensayos empleados en una misma sección, tabla 1. En la gran mayoría de los casos se produce un razonable ajuste de los datos pese a la compleja respuesta propia de las rocas fracturadas. No obstante, en los ensayos de pulso el ajuste resulta bastante más pobre que en los restantes tipos de

ensayo, atribuible básicamente a las incertidumbres anteriormente mencionadas, así como a posibles perturbaciones en los valores de presión debido a las características de las rocas fracturadas.

- Los valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario aportan siempre valores de conductividad hidráulica más altos que los obtenidos en ensayos de inyección a nivel constante, si bien, salvo algunas excepciones, la diferencia no supera un orden de magnitud. Estos ensayos resultan relativamente fáciles de ejecutar e interpretar y son muy apropiados para la fase de reconocimiento general, estando su límite inferior óptimo de aplicación hasta valores de conductividad hidráulica de  $N \times 10^{-10}$  m.s<sup>-1</sup>, pudiendo alcanzarse, con menor exactitud, valores de permeabilidad de hasta un orden de magnitud menor.
- Los ensayos de inyección a nivel constante aportan valores muy fiables de conductividad hidráulica hasta un límite inferior de  $N \times 10^{-11}$  m.s<sup>-1</sup>. Incluso para valores de un orden de magnitud menor, donde la precisión de la medida de caudales muy bajos puede tener un error en torno a un 10%, aporta información más fiable que la obtenida por otros métodos, ya que el continuo control de los valores de caudal, presión y temperatura en un sistema absolutamente estanco permite evaluar en todo momento la correcta ejecución del ensayo. Con respecto al límite superior es básicamente función de la instrumentación desarrollada, resultando para la aplicada en este trabajo un valor máximo de conductividad hidráulica de  $N \times 10^{-6}$  m.s<sup>-1</sup>. Para valores de permeabilidad de  $N \times 10^{-12}$  m.s<sup>-1</sup> e inferiores estaría indicado el ensayo de pulso. En los ensayos de este tipo llevados a cabo no se ha obtenido una buena correspondencia con los valores de los ensayos de inyección a nivel constante, produciéndose en los ensayos de pulso diferencias de más de un orden de magnitud con respecto al valor de conductividad hidráulica obtenido por los otros métodos. El límite superior de aplicación de estos ensayos se correspondería con un valor de conductividad hidráulica de  $N \times 10^{-9}$  m.s<sup>-1</sup>, ya que para valores superiores el tiempo de recuperación es demasiado corto como para alcanzar una adecuada precisión en las medidas.
- Los ensayos tipo slug, realizados en las dos secciones con valores de conductividad hidráulica más altos, tienen una buena correspondencia con el valor obtenido en los ensayos de inyección. El intervalo de aplicación óptimo de este tipo de ensayo estaría comprendido para valores de conductividad hidráulica entre  $N \times 10^{-6}$  m.s<sup>-1</sup> y  $N \times 10^{-9}$

m.s<sup>-1</sup>; para valores inferiores a este último, los tiempos de recuperación de presión resultan excesivamente elevados.

- De los tres ensayos de recuperación analizados, dos de ellos tienen un valor muy próximo de conductividad hidráulica al obtenido en el ensayo de inyección a nivel constante, habiéndose registrado en ambos una recuperación en torno al 75%. El tercer ensayo corresponde al análisis del sondeo a columna completa y aporta un valor de conductividad hidráulica un orden de magnitud mayor que el aportado por el ensayo de inyección a nivel constante, pero es debido a que en este caso se tuvo que detener el registro de recuperación en sólo un 6% por incidencias en las labores de explotación minera.

Finalmente, respecto a la distribución de la conductividad hidráulica en función de la profundidad y la fracturación se pueden establecer las siguientes consideraciones:

- Se observa una disminución progresiva de la permeabilidad desde 13 m hasta 73,5 m, interpretable como una disminución de la apertura de las fracturas y diaclasas con la profundidad, debido al aumento progresivo de la presión litostática.
- En el tramo comprendido entre 63 y 97 m se registra un ligero aumento de la conductividad hidráulica relacionado con las dos zonas de falla interceptadas por el sondeo (a 66,6 m y 93 m). El escaso incremento del valor de la conductividad hidráulica es debido a que la actividad hidrotermal asociada a estas fracturas ha producido un sellado parcial de las mismas por precipitación de depósitos minerales.
- A partir de la sección 97,36-116,15 m, en que se obtiene el valor mínimo de conductividad hidráulica, y hasta el final del sondeo se registra un aumento progresivo de la permeabilidad debido posiblemente al acercamiento a una zona de fractura que cortaría a bajo ángulo al sondeo y a una profundidad algo superior a los 200 m. Al ir aumentando la profundidad, el sondeo se aproximaría más a la zona de fractura en la que las fisuras latentes de descompresión se encontrarían más abiertas, con el consiguiente aumento de la conductividad hidráulica. Esta posibilidad se ve corroborada por el aumento de la fracturación a profundidades próximas a los 180 m, que se manifiesta sobre todo en las fracturas que tienen ángulos mayores de 70° con el eje del sondeo.

Por último, cabe señalar que las propiedades hidráulicas de discontinuidades individuales es, a mayor extensión, determinada por su grado de conexión con otras fracturas y esto no es posible determi-

narlo sólo en base a las características litológicas y estructurales observadas en los testigos de la perforación.

## Agradecimientos

Los autores de este trabajo quieren expresar su agradecimiento a la empresa Marcelino Martínez Madrid, S.L. por su decidido apoyo a los trabajos de investigación realizados y por su autorización para perforar el sondeo de reconocimiento en los terrenos pertenecientes a su concesión de explotación. Así mismo, agradecer el soporte logístico prestado durante la ejecución de los trabajos descritos y en especial al Director Técnico de la explotación, D. Juan Jesús Maestre Díaz, por su apoyo y sugerencias técnicas.

## Referencias

- Almen, K.E., Andersson, J.E., Carlsson, L., Hansson, K. y Larsson, N.A. 1986. Hydraulic testing in crystalline rock. A comparative study of single-hole test methods. Technical Report 86-27 SKB, Uppsala, 183 pp.
- Bredehoeft, J.D. y Papadopoulos, I.S. 1980. A method for determining the hydraulic properties of Tight formations. *Water Resources Research*, 16(1), 233-238.
- Connell, L.D. 1994. The importance of pulse duration in pulse test analysis. *Water Resources Research*, 30(8), 2403-2411.
- Cooper, H.H., Bredehoeft, J.D. y Papadopoulos, I.S. 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Research*, 3(1), 263-269.
- Díaz de Neira, J. A., López Olmedo, F., Solé Pont, J., Hernaiz, P.P. y Calvo Sorando, J.P. (en prensa). Mapa Geológico de España a E 1:50.000, Hoja N° 580 (Méntrida). IGME, Madrid.
- Gómez-Moreno, G., Lombardero, M., Moreno, T. y Regueiro, M. 1995. Estudio de los granitos de la Comunidad Autónoma De Madrid. Informe inédito. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, fondo documental del IGME, doc. n° 11.391.
- Jacob, C.E. y Lohman, S. 1952. Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. *Transactions American Geophysical Union*, 33(4), 559-569.
- Martínez-Navarrete, C., Grima, J., Mejías, M. y Gómez, J.A. 1995. Celda de presión para ensayo de componentes de un equipo de testificación hidráulica. Especificaciones técnicas y ensayos. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XIX, 209-222.
- Mejías, M. y López-Geta, J.A. 2003. Instrumentation and methodology for the hydraulic characterization of fractured rocks. *International Conference on groundwater in fractured rocks*, Praga, IHP-VI, series on groundwater, 7, 275-276.

- Mejías, M., López-Geta, J.A. y Segura, D. 2002. Caracterización de formaciones de baja permeabilidad mediante ensayos hidráulicos: aplicación a dos sondeos de reconocimiento situados respectivamente al Sur y Este de las cortas mineras de Aznalcóllar y Los Frailes en la mina de Boliden-Apirsa, S.L. (Aznalcóllar, Sevilla). *Boletín Geológico y Minero*, 113(1), 45-55.
- Mejías, M., Grima, J., Gómez, J.A. y Martínez-Navarrete, C. 1998. Unidad Móvil de caracterización hidrogeológica de formaciones de baja permeabilidad. Ensayos de calibración. X Congreso Internacional de Minería y Metalurgia, Valencia, 1, 199-218.
- Mejías, M., Grima, J., Martínez-Navarrete, C. y Gómez, J.A. 1995. Sistema de control de flujo para la realización de ensayos hidráulicos de inyección. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XIX, 223-236.
- Moench, A.F. y Hsieh P.A. 1985. Analysis of slug test data in a well with finite thickness skin. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Congress of IAH, Tucson, Arizona. Memoires XVII (1)*, 17-29.
- Neuzil, C.E. 1982. On conducting the modified slug test in tight formations. *Water Resources Research* 18(2), 439-441.
- Ramey, H.J., Agarwal, R.G. y Martin, I. 1975. Analysis of slug test or DST flow period data. *Journal Canadian Petroleum Technology*, 14, 37-47.
- Rodríguez-Suárez, J.J. y Muñoz de la Nava, P. 1988. Prospección de rocas ornamentales en Madrid. Informe inédito. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, fondo documental del IGME, doc. nº 11.214.
- Van Everdingen, A.F. y Hurst, W. 1949. The Application of the Laplace Transformation to flows problems in reservoirs. *Transactions, AIME* 186, 305-324.
- Waterloo Hydrogeologic 2002. *Aquifer Test Pro. User's Manual. Graphical Analysis and Reporting of Pumping Test and Slug Test Data*. Waterloo, Ontario (Canada), 267 pp.

Recibido: abril 2004  
Aceptado: enero 2005