

Los nuevos métodos sísmicos y las diagráfías de sondeos mecánicos en el proyecto y construcción de presas

Por JOSE M. SANZ SARACHO

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

y PEDRO R. SOLA CASADO

Ingeniero de Caminos, Canales y puertos.

En el presente artículo se recogen las posibilidades y experiencias llevadas a cabo mediante la utilización de los procedimientos geofísicos en los reconocimientos de base de los emplazamientos y préstamos de futuras presas.

Se repasan, en primer lugar, las posibilidades y limitaciones de los modernos sistemas sísmicos («petit-sismique» y SASW) y luego se comentan las diagráfías de sondeos en su doble faceta (registro de parámetros de perforación y registros diferidos). Dentro de las limitaciones de espacio se ha intentado, para cada sistema, valorar sus aportaciones específicas y aplicaciones, ejemplarizando estas posibilidades con gráficos de correlación.

Entendemos que el interés fundamental del artículo es la llamada de atención respecto de nuevos procedimientos de reconocimiento, cuya aplicabilidad en las primeras fases del estudio pueden representar unas importantes ventajas de rapidez y economía.

1. INTRODUCCION

Las presas son obras singulares en las que la tipología estructural puede variar desde una bóveda de hormigón a un perfil trapecoidal de tierra o pedraplén, a fin de adaptarse al cimiento de la cerrada que puede consistir en un macizo rocoso, más o menos heterogéneo, o en un recubrimiento cuaternario de composición y potencias variables.

Esta circunstancia hace imprescindible un reconocimiento geológico del terreno, suficiente tanto para la ubicación y proyecto del cuerpo de presa y sus obras complementarias (desvío del río, aliviadero, pantallas drenantes y/o de impermeabilización etc.), como para la elección y explotación de las canteras y préstamos de los materiales necesarios para la construcción; necesidad esta última que se considera a menudo de forma ligera en el proyecto, y que posteriormente puede dar lugar a sorpresas indeseables.

Hoy día, existen pocas dudas de que la cam-

paña de investigación geotécnica para una presa ha de tener una gran preponderancia de técnicas y ensayos «in situ». Asimismo, es aceptado que el reconocimiento debe concretarse, ante todo, en una secuencia lógica de operaciones, que al principio cuando la cerrada y el proyecto están poco definidos, utiliza medios rápidos, versátiles y poco costosos, mientras que reserva el empleo de procedimientos y ensayos más elaborados, onerosos y lentos para el emplazamiento definitivo y las zonas más difíciles del terreno.

Sin embargo, hasta hace unos años, el ingeniero no ha podido realmente llevar a la práctica esa concepción del reconocimiento geotécnico, pues las técnicas de exploración y ensayo «in situ» puestas a su disposición, han sido apropiadas, en su mayoría, para los estudios locales y detallados correspondientes a la última fase antes señalada, y poco indicadas para obtener información suficiente en las primeras fases y con relación a las canteras o préstamos.

En efecto, hasta hace una década, la base de

los métodos geotécnicos de reconocimiento «in situ» comercialmente operativos ha estado, entre otros, en sondeos mecánicos con recuperación de testigo, las galerías y zanjas para inspección y ensayos, los ensayos a corte de discontinuidades en bloques tallados en la roca, y los ensayos de carga en grandes superficies con gatos columna o planos; técnicas todas ellas que requieren una elevada inversión de tiempo y recursos económicos. En estas circunstancias no es de extrañar, que salvo en los proyectos de gran envergadura, la información obtenida para la toma de las primeras decisiones o de cara al estudio de canteras, haya resultado con frecuencia corta e insuficiente.

Afortunadamente, desde principios de los años setenta, la situación ha comenzado a cambiar al incorporarse a la ingeniería civil, gracias a los progresos en el campo teórico y al desarrollo de la electrónica y la informática, un conjunto de nuevas técnicas de reconocimiento «in situ», que procedentes, en buena parte, de la industria del petróleo y la minería, en la actualidad son plenamente operacionales y casi rutinarias en los países avanzados.

Se trata de métodos indirectos de exploración, ágiles y rápidos, que se fundamentan en principios geofísicos tales como propagación y emisión acústicas, propiedades geoeléctricas, radioactividad natural y respuestas a radiaciones nucleares, difusión de ondas electromagnéticas (georradar), gravimetría, observación termométrica, registro de parámetros de perforación de taladros, etc.

Pensar que estas nuevas técnicas resuelven, o resolverán todos los problemas geotécnicos planteados por las presas, sería una conclusión entusiasta y lejos de la realidad. Sin embargo, no deja de ser cierto también que utilizadas con fines específicos y en combinación con los otros métodos de exploración y ensayo, constituyen unos medios potentes y cada vez más fiables, de necesaria consideración en las campañas de reconocimientos «in situ».

Tiene interés, por tanto, analizar los fundamentos, posibilidades y limitaciones de algunas de estas técnicas, como los nuevos métodos sísmicos desde superficie y las diagrfias de sondeos mecánicos, en la seguridad de que este conocimiento es la mejor garantía del éxito de

su utilización en el campo de la construcción de presas.

2. NUEVOS METODOS SISMICOS DESDE SUPERFICIE

La sísmica de refracción se ha empleado tradicionalmente en los reconocimientos del cimiento de las presas, y en los estudios de canteras. Este método sísmico clásico permite detectar la profundidad y espesores de horizontes sucesivos del terreno, de compacidad creciente, caracterizándolos por la velocidad a través de ellos de las ondas de presión, las componentes más rápidas del tren de ondas sónicas.

A finales de los años sesenta, los avances en la miniaturización electrónica y en el campo de los análisis espectrales, propician el abandono del viejo concepto de onda única refractada, y se pasa a considerar también las propagaciones de las ondas de corte, o transversales, y de las superficiales o Rayleigh. Nacen, así, sendos nuevos métodos sísmicos: La pequeña sísmica, primero, y el Análisis Espectral de Ondas Superficiales, en el último lustro.

Ambas técnicas de exploración no sólo son de mayor fiabilidad que la sísmica de refracción clásica, sino que proporcionan, además, información muy valiosa sobre la estructura y propiedades geotécnicas de rocas y suelos. Por otra parte, como los dos métodos implican a volúmenes limitados del terreno, resultan medios muy apropiados para una rápida comprobación y caracterización geomecánica de las zonas que establezcan y definan los estudios geológicos.

2.1. Pequeña sísmica

A diferencia de la sísmica convencional, la Pequeña Sísmica se interesa también por las ondas de corte propagadas a través de la formación a reconocer, y lleva consigo la obtención de registros, veáse fig. 1, que permitan calcular, además de la velocidad, otros parámetros relativos a esa clase de ondas (frecuencia, longitud de sonda, atenuación, etc.).

El sistema operativo en campo es similar al empleado por la sísmica clásica, si bien los perfiles son de menor longitud, 10 a 40 m, y la

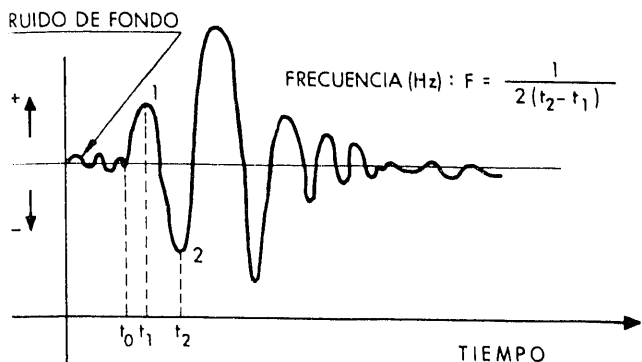


Figura 1.—Registro típico de onda de corte en la pequeña sísmica.

fente sónica suele consistir en golpes de energía calibrada. Puede utilizarse indistintamente desde superficie, en zanjas, en galerías subterráneas o en pozos.

La superioridad de este nuevo método sobre la sísmica tradicional estriba en una doble circunstancia:

- Las ondas de corte, al contrario que las de presión, no son afectadas por el agua, y su propagación, por consiguiente, refleja mucho mejor las propiedades del esqueleto de los suelos y de la estructura de los macizos rocosos.
- Pueden encontrarse, y de hecho ya existen, correlaciones empíricas entre los parámetros de las ondas de corte y diversas características e indicadores del comportamiento del terreno.

En este último sentido Schneider inició el camino en 1967 estableciendo correlaciones entre la frecuencia y el módulo de deformación estático «in situ» de macizos rocosos, y entre la longitud de onda y la razón entre los módulos dinámico y estático. Desde entonces, el mismo autor en 1979 y otros investigadores, han propuesto nuevas correlaciones entre otros parámetros de las ondas de corte (velocidad, atenuación, etc.) y diferentes propiedades de las rocas (intensidad y apertura de la fracturación, porosidad de la matriz, etc.).

No obstante, en el momento actual, la correlación más experimentada y de mayor interés, sigue siendo la que parece existir entre la frecuencia de las ondas de corte y el módulo de deformación estático «in situ», obtenido, bien

mediante ensayos de carga, presiométricos y/o dilatométricos, bien a partir de la auscultación de obras en servicio.

Tal como se aprecia en la fig. 2, la relación lineal propuesta por Schneider (1967) corresponde bien al comportamiento de rocas compactas, de baja a media fracturación, con frecuencias de propagación no inferiores a 200 Hz. Para macizos rocosos menos competentes con frecuencias más bajas, los datos de Monjoie y Schroeder (1978) indican una incurvación de la recta casi asintótica al eje de abscisas.

Como contrapunto a estos resultados excelentes, espectaculares incluso, conviene no perder de vista las limitaciones propias de todo método sísmico:

- Un horizonte no es detectado cuando está situado debajo, o detrás de otro más compacto al que correspondan mayores velocidades sónicas. Asimismo, capas de pequeño espesor entre otras claramente más compactas, pueden no ser observadas.
- Las geometrías complicadas, tanto en superficie como en los contactos entre horizontes, ofrecen serias dificultades a la interpretación.

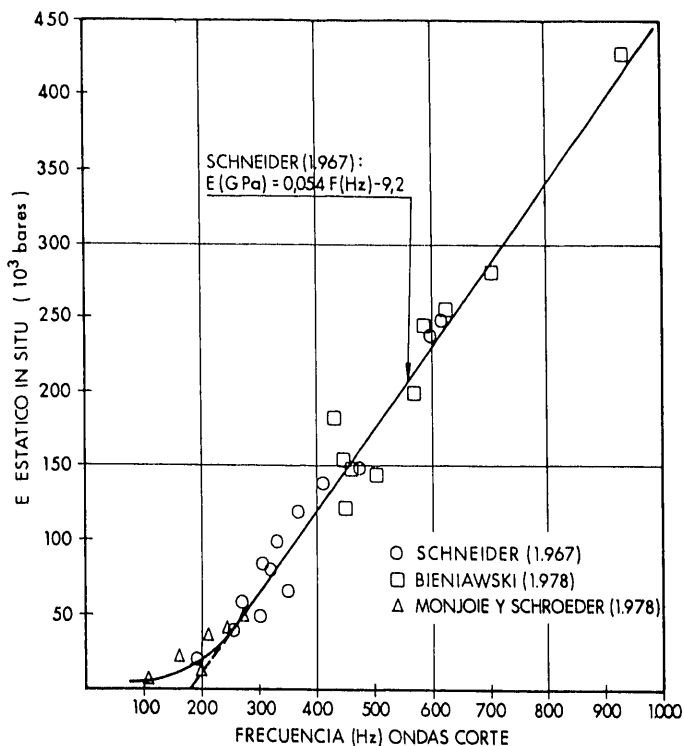


Figura 2.—Correlación entre módulo de deformación estática in situ y frecuencia de ondas de corte en pequeña sísmica.

LOS NUEVOS METODOS SISMICOS Y LAS DIAGRAFIAS DE SONDEOS MECANICOS

- En cualquier caso, la pequeña sismica debe utilizarse dentro de un contexto estudiado geológicamente, y en combinación con otros métodos de exploración.

A pesar de todo, y además de las posibilidades ya comentadas, esta nueva técnica ha aportado avances valiosos en campos tan diversos como los siguientes entre otros:

- Determinación de las propiedades dinámicas de suelos y rocas.
- Estudios de canteras: calidad de la roca, distribución de la alteración y ripabilidad o modo de extracción.
- Diferenciación de los espesores afectados por explosivos, y por la decompresión natural o provocada por las excavaciones. En este último caso, evolución con el tiempo del espesor de la zona influenciada y de sus propiedades geomecánicas.
- Detección de zonas falladas y/o accidentes importantes.
- Anisotropía y aumento de módulo de deformación in situ con la presión de confinamiento.
- Control del efecto de inyecciones de consolidación.

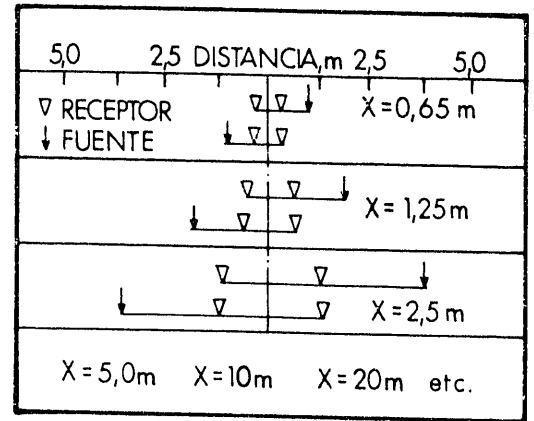
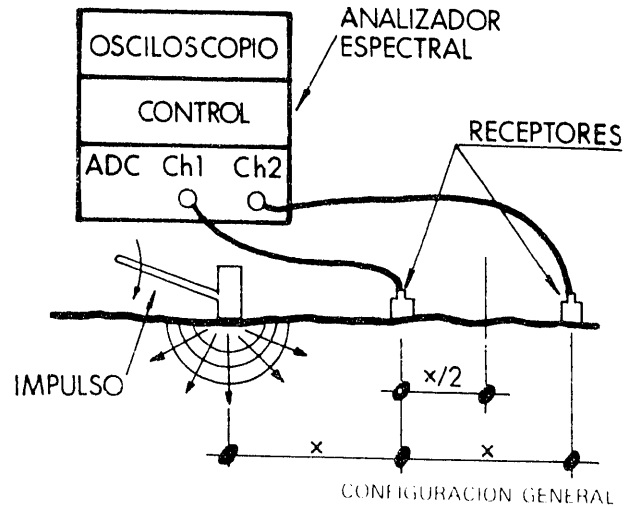
2.2. Análisis espectral de ondas superficiales

Este nuevo método sísmico, conocido por sus siglas en inglés SASW, es un sistema que determina «in situ» el perfil de variación con la profundidad de las ondas de corte. A partir de ese perfil de velocidades, es inmediato establecer la estratigrafía de detalle, y obtener la deformabilidad dinámica correspondiente a cada nivel.

El fundamento del SASW está en la medida y análisis de la propagación de las ondas superficiales, o de Rayleigh, a través del terreno que se investiga.

La configuración del procedimiento de ensayo, conocida por geometría de receptores equidistantes y descrita en la fig. 3a, es tal que cada ensayo correspondiente a una posición de los mismos, queda solapado por los siguientes ensayos con mayor espaciamento entre ellos. A mayor distancia entre receptores, o geófonos,

a) Esquema de disposición para ensayos Sasw.



DISPOSICION FUENTE RECEPTORES

b) Curva de dispersión para los ensayos efectuados en Wildlife.

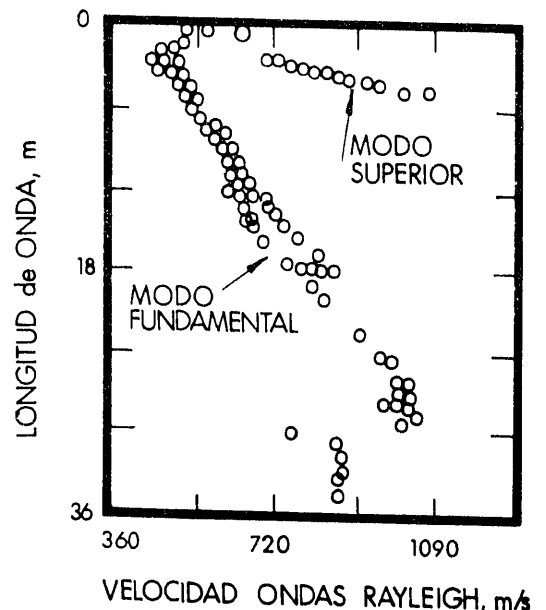


Figura 3. — Según Nazarian y Stokoe, 1983.

más profundos son los niveles reconocidos.

Para cada posición de receptores, se efectúan dos series de impactos de martillo que generan ondas Rayleigh de varias frecuencias que son promediadas y registradas en el dominio de tiempos: esas dos series con varios impactos cada una, se ejecutan en dos puntos simétricos con respecto al punto medio entre receptores. A medida que aumenta la distancia entre éstos, es necesario utilizar mazas potentes capaces de producir frecuencias cada vez más bajas.

El aparato de registro utilizado es un analizador espectral que, trabajando en el dominio de frecuencias, calcula la curva de dispersión que da la longitud de onda correspondiente a cada frecuencia (véase fig. 3b), siguiendo el criterio de Haisey et al (1982) de desprestigiar los puntos con una longitud de onda mayor que tres veces, o inferior a la mitad de la distancia entre geófonos.

Finalmente, el perfil de velocidades de corte se obtiene a partir de esa curva de dispersión, aplicando un procedimiento analítico de reconstrucción. Nazarian y Stokoe (1984) han desarrollado el procedimiento de ese tipo más perfecto y fiable hasta el momento. Es un método iterativo que basado en un perfil de velocidades supuesto, calcula la curva teórica de dispersión que le correspondería, y la compara con la realmente obtenida con los ensayos; cuando las diferencias entre ambas curvas es admisible, se da por bueno el último perfil de velocidades de corte supuesto.

Hoy día la principal limitación de esta nueva técnica estriba en la dificultad de generar ondas superficiales con frecuencias inferiores a los 5 Hz, pues esto supone una limitación a la máxima profundidad de terreno explorada, que por el momento es de unos 20-25 m; en un futuro inmediato, el desarrollo de fuentes de frecuencias entre 2 y 5 Hz, va a permitir alcanzar profundidades de al menos 50 m. Asimismo, como en los demás métodos sísmicos, los resultados son mejores, cuanto más suave es la geometría de la superficie, y menos irregulares y complicados son los contactos entre las capas que constituyen el terreno.

Por el contrario, caben pocas dudas de las ventajas y posibilidades de este nuevo proce-

dimiento sísmico de reconocimiento «in situ»:

- Se trata de una técnica fiable. La estratigrafía y el perfil de velocidades de las ondas de corte, tal como se aprecia en la figura 4a, se determinan respectivamente con errores inferiores a pocas pulgadas y al 10 por 100, en comparación a lo dado por los sondeos mecánicos con testigo y los ensayos «cross hole».
- El perfil obtenido con el SASW es bastante continuo y detallado, y registra la velocidad y espesor de capas situadas entre, o por debajo, de otras más compactas con velocidades superiores. La fig. 4b es un ejemplo en este sentido, y confirma que esta nueva técnica no tiene esa limitación característica de los otros métodos sísmicos.
- Es una técnica no destructiva, rápida y económica frente a los sondeos con testigo y los ensayos «cross hole». Actualmente cada perfil requiere unas cuatro horas de ensayos en el campo y otras cinco en gabinete; sin embargo, en un futuro inmediato el desarrollo de los equipos y del «software» reducirá el tiempo total para cada perfil a menos de dos horas.
- Además de participar en los reconocimientos «in situ» previos al proyecto, el SASW se ha empleado, o podrá utilizarse, para comprobar las propiedades dinámicas del cuerpo de una presa de tierras y/o de su cimiento, tal como se observa en la fig. 4c. Asimismo, podrán controlarse tanto las condiciones de puesta en obra, como la posible evolución de los materiales bajo la acción del tiempo u otros agentes (meteorización, filtraciones, etcétera).

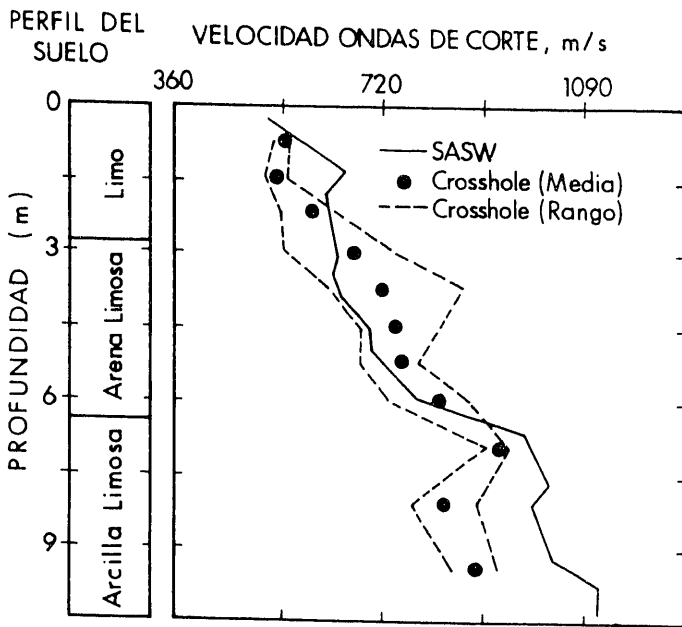
3. DIAGRAFIAS DE SONDEOS MECANICOS

Recibe este nombre todo registro, automático y continuo con la profundidad, de algún parámetro de las operaciones de perforación, y/o alguna característica física del terreno atravesado por un sondeo mecánico.

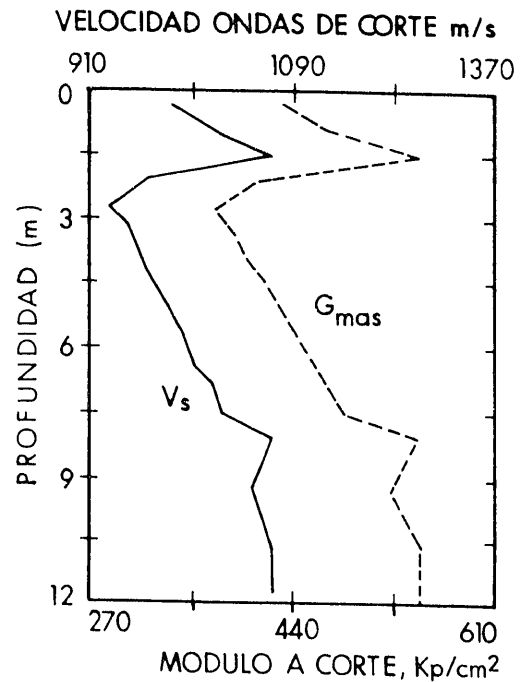
Las diagrfías se ejecutan cada vez más en los

LOS NUEVOS METODOS SISMICOS Y LAS DIAGRAFIAS DE SONDEOS MECANICOS

a) Perfil de velocidad de ondas de corte en Wildlife.



b) Perfiles de velocidad de ondas de corte y módulo dinámico en Meloland.



c) Perfiles de velocidad de ondas de corte en coronación. Presa de tierras en Carolina del Sur.

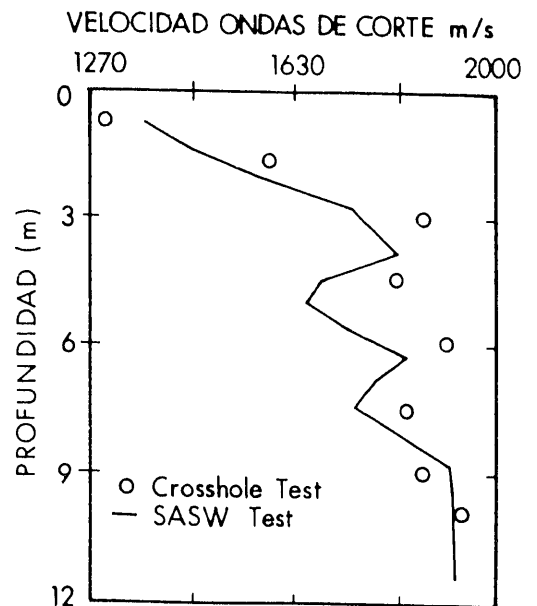


Figura 4. — Según Nazarian y Stokoe, 1983.

sondeos con recuperación de testigo, pues la tendencia es aprovechar al máximo la información proporcionada por este sistema de perforación. No obstante, la idea impulsora y el estímulo para su aplicación en las campañas de reconocimiento geotécnico, viene estando en que estas técnicas sean el complemento suficientemente fiable que permita a los sondeos a destroza, o sin recuperación de testigo, sustituir en el mayor grado posible a los sondeos tradicionales con recuperación de testigo, actualmente más de tres veces más lentos y costosos.

Por otra parte, hoy día resulta obligado conocer y estudiar estas técnicas, pues la experiencia indica que una correcta utilización de las distintas clases de diagrfias, no sólo mejora la información suministrada por los sondeos con testigo, sino que también permite, hasta cierto punto, superar sus limitaciones y detectar problemas fuera de su alcance. Al respecto y entre otros, cabe señalar:

- En ciertas formaciones es muy difícil recuperar testigo intacto y suficientemente representativo de la estructura «in situ» del terreno. Tal es el caso de rocas poco compactadas y cementadas (calcarenitas, dolomías, carniolas, pumitas, conglomerados, etc.): de rocas esquistosas alte-

radas (pizarras, esquistos, etc.); y de formaciones cuaternarias sin finos y/o cor grandes tamaños (bolos, zahorras, etc.). En yacimientos de suelos granulares, a menos que se utilicen medios de muestreo muy costosos, es prácticamente imposible saber si los finos limo-arcillosos

LOS NUEVOS METODOS SISMICOS Y LAS DIAGRAFIAS DE SONDEOS MECANICOS

contaminan el conjunto de modo continuo, o si aparecen en bancos.

- En la mayoría de los casos el testigo rara vez es recuperado en su totalidad, y precisamente esa parte desconocida suele ser de importancia decisiva (rellenos de discontinuidades, pasadas muy fracturadas en los aledaños de las fallas, niveles arenosos de pequeño espesor, lechos reblanecidos en macizos yesíferos, etc.). Las discontinuidades vacías y las pasadas fracturadas de pequeño espesor pueden no ser detectadas si el operador no es muy experto.
- En alteraciones monótonas de areniscas y margas, calizas y margas o arcillas y arenas, resulta poco viable establecer un corte geológico distinguiendo los diferentes niveles.
- Cabe sospechar que el sistema y las maniobras de perforación, así como la manipulación del testigo, pueden afectar, en cierto grado, a la fracturación de las muestras de roca recuperadas. Este hecho que afecta a la validez y objetividad de índices como el RQD, ha sido confirmado por los trabajos de Stein (1976), Allard (1978), Whitworth (1979) y Halker et al (1982). La figura 5 es reveladora al respecto.

Aunque las diagrfías, como se verá en lo que sigue, pueden suplir en buena parte estas carencias señaladas para los sondeos con testigo, tampoco se está ante una panacea que no plantea problemas, pues es obvio que los registros, y por ende la calidad de su interpretación, son afectados por variaciones ya sea en las condiciones de perforación (pérdidas mecánicas, desgaste de útiles por abrasión, etc.), ya sea en el taladro finalizado (diámetro, entubación, lodo, agua, etc.).

Como estos problemas no pueden ser resueltos totalmente por las tablas de calibración, la utilización correcta de esta técnicas en los reconocimientos geotécnicos impone una doble premisa a seguir:

- Cada sondeo debe testificarse con varias diagrfías que sean complementarias.

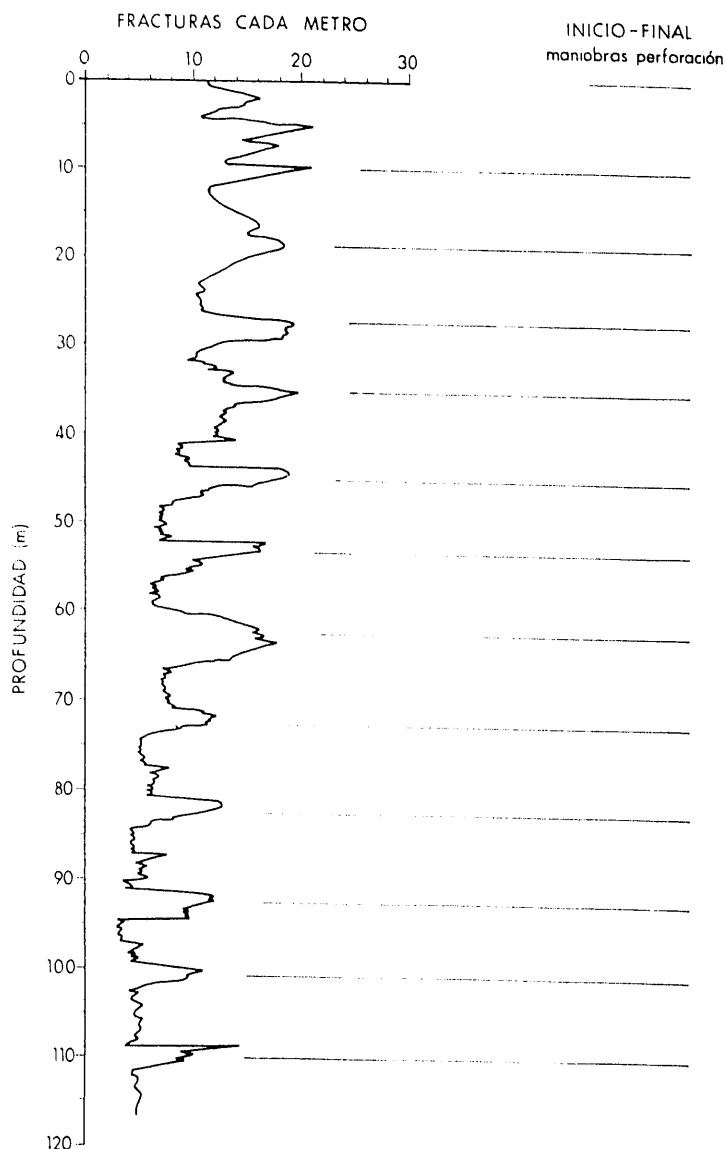


Figura 5.—Influencia de maniobras de perforación en la fracturación del testigo recuperado (Halker, 1982).

- El conjunto de sondeos a destroza testificados debe compararse, o tararse, con un mínimo de sondeos con testigo.

A pesar de todo, el interés y las ventajas de estas técnicas están claras: además de más cantidad y calidad de información en cada sondeo, se dispone de una mayor densidad de puntos reconocidos para el mismo coste del estudio.

3.1. Diagrfías de perforación

La ejecución de un sondeo pone en juego diversas variables ligadas a la maquinaria y los útiles de perforación, que cambian instantánea-

mente cuando se perfora un material u otro, o cuando dentro de una misma capa existen modificaciones en sus características y propiedades geotécnicas. Se trata de los denominados parámetros de perforación, entre los que están: velocidad de avance, empuje sobre el útil, par motor, presión y caudal del fluido, etc.

Las diagrafiás de perforación, o instantáneas puesto que se ejecutan a medida que avanza ésta, consisten en el registro, continuo, automático y simultáneo, de uno o varios de esos parámetros anteriores.

Esta técnica conocida de antiguo en el mundo del petróleo, ha irrumpido con fuerza en la ingeniería civil, cuando en los pasados años sesenta, la electrónica e informática han permitido el registro continuo y automático con la profundidad, y la fabricación, a coste razonable, de equipos capaces de soportar las duras condiciones de obra. En este sentido, el primer equipo comercial, totalmente español, ha sido el primer modelo del Diagrason de GEOCISA que medía sólo la velocidad instantánea de avance, y fue empleado para reconocer el macizo calcáreo karstificado que constituye el cimiento de la Central Térmica de Velilla en el norte de Palencia (véase foto 1).

Un análisis somero de los parámetros de perforación induce a agruparlos en dos categorías bien distintas:

a) *Dependientes de la maquinaria y controlados por el operador*

Entre otros están:

- EMPUJE SOBRE EL UTIL, E: La presión axial que permite romper y penetrar el terreno. A medida que progresa el taladro y se desgasta el útil, es preciso incrementarlo para mantener la velocidad de avance.
- VELOCIDAD DE ROTACION, W: Casi constante en las máquinas eléctricas. A empuje constante, hay una relación directa entre ella y la velocidad de avance.
- CAUDAL DEL FLUIDO DE PERFORACION, Q: Debe ser suficiente para la refrigeración y el transporte de detritus. Se reduce al mínimo cuando se trata de re-

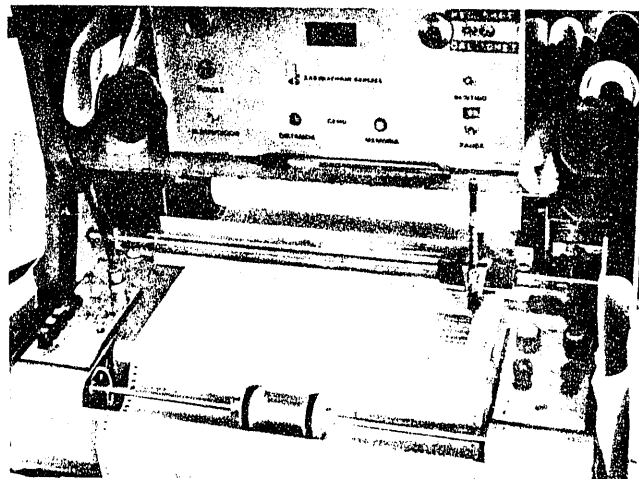


Foto 1. — Registro analógico de la velocidad de avance a roto-percusión con el Diagrama 1c de GEOCISA.

cuperar testigo poco alterado, pues un caudal excesivo altera el terreno flojo, y ablanda y fragmenta el testigo.

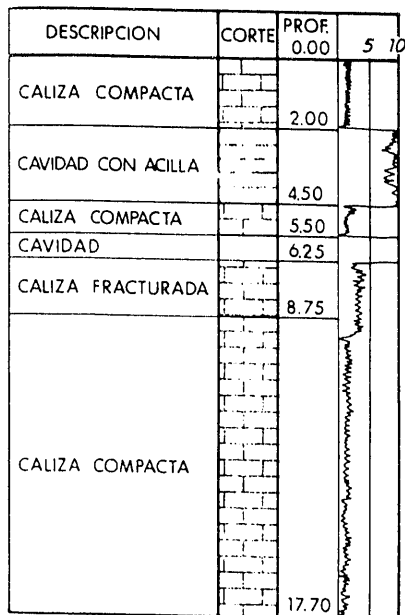
a) *Ligados a las condiciones geotécnicas del terreno atravesado*

Los más considerados e importantes son:

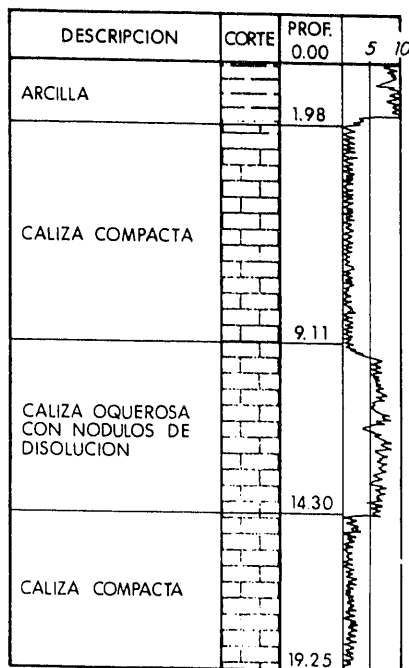
- VELOCIDAD DE AVANCE, V: Es afectada por todos los parámetros del grupo anterior. Se incrementa con el empuje y con la velocidad de rotación.
- PAR MOTOR, M: Es necesario para cortar el terreno, y en los sondeos profundos, para vencer los rozamientos del varillaje. En sondeos superficiales, se incrementa con el empuje sobre útil, y se reduce cuando aumenta el caudal del fluido.
- PRESION DEL FLUIDO, P: Varía con el caudal del mismo, el empuje, la velocidad de avance, y con las condiciones hidráulicas del terreno. Se incrementa con los enganches en materiales plásticos o con los niveles artesianos; se reduce cuando se interceptan pasadas muy permeables o con fracturas muy abiertas y limpias.
- ENERGIA REFLEJADA, E: En los sondeos a roto-percusión, parte de la energía transmitida al útil sirve para la perforación de la roca, mientras que otra se refleja a través del varillaje. Esta parte reflejada suministra información sobre el terreno.

LOS NUEVOS METODOS SISMICOS Y LAS DIAGRAFIAS DE SONDEOS MECANICOS

SONDEO P-14



SONDEO P-24



SONDEO P-45

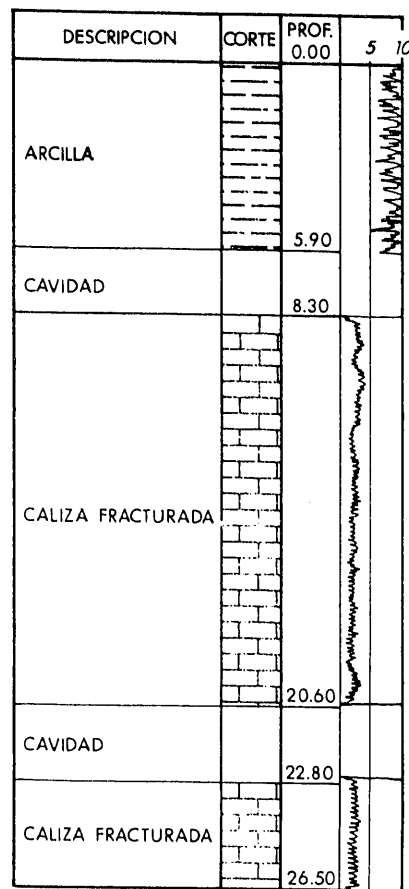


Figura 6. — Sondeos a rotoperusión en caliza kárstica con registro de velocidad de avance mediante el Diagrason de GEOCISA (Palencia, 1981).

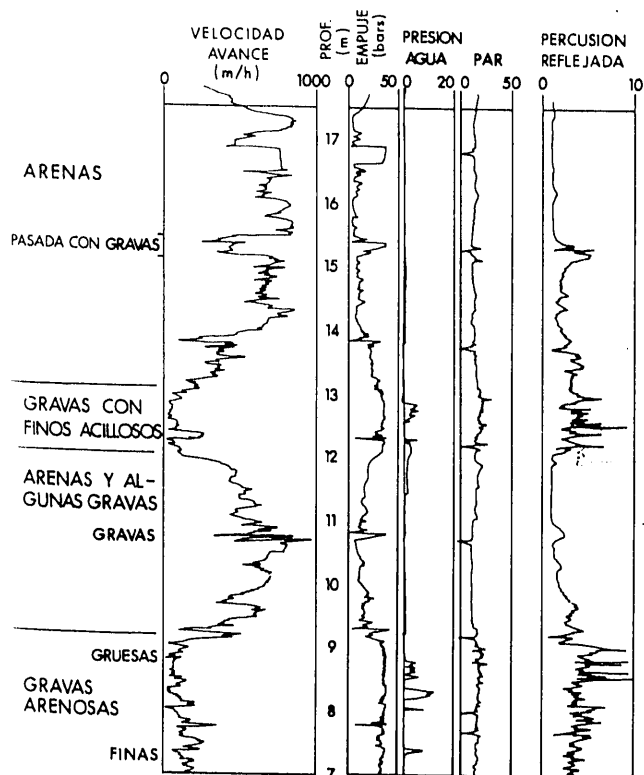


Figura 7. — Registros de cinco parámetros de perforación (según Lutz, 1981).

Actualmente el número de esos parámetros anteriores registrados simultáneamente, no suele bajar de tres, y su elección depende del modo de perforar, rotación o percusión, y del tipo de terreno a reconocer. Puesto que la tendencia del sondista debe ser la de mantener constantes los parámetros del primer grupo, los registrados suelen pertenecer al grupo de los ligados al terreno, si bien pueden ir acompañados por otros, como el empuje y la velocidad de rotación, a modo de control sobre las maniobras del operador. Dos ejemplos de diagrasías diferentes se muestran en las figs. 6 y 7, y sendos aspectos del DIAGRASON 5c de GEOCISA se han recogido en las fotos 2 y 3.

El tratamiento y la interpretación de los datos suministrados por estas diagrasías admite dos etapas:

a) *Interpretación cualitativa*

Permite situar los tramos homogéneos en cada sondeo, y distinguir o correlacionar entre va-

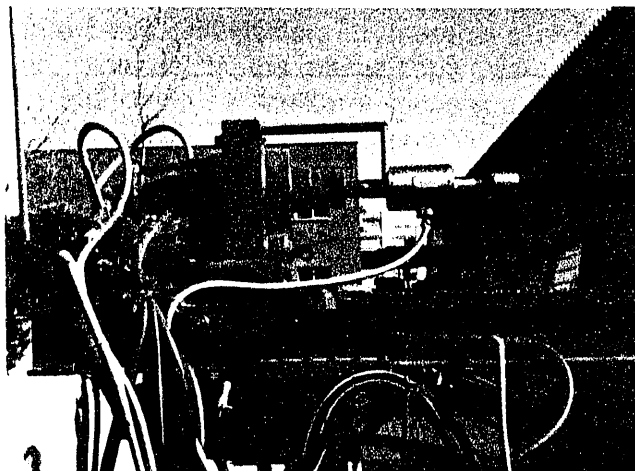


Foto 2.—Detalle de los sensores para registro de cinco parámetros (velocidad avance y rotación, empuje, par y presión de agua) del Diagrason 5c de GEOCISA.

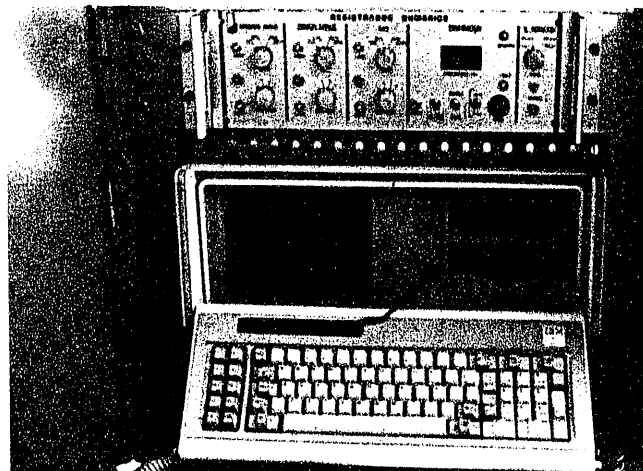


Foto 3.—Detalle del registrador digital del Diagrason 5c de GEOCISA.

rios sondeos, las peculiaridades, o anomalías, puestas de manifiesto por los registros, efectuando una zonificación del terreno.

Asimismo, se puede realizar una interpretación de los materiales atravesados y de la variación de su naturaleza y características, teniendo en cuenta criterios tales como:

- La velocidad de avance acusa las variaciones de dureza en las rocas y los cambios de compacidad o consistencia en los suelos, y pone en evidencia zonas fracturadas y posibles huecos, rellenos o no.
- El empuje sobre el útil es proporcional a la dureza y compacidad de los materiales.
- Los incrementos de presión en el fluido están ligados con formaciones plásticas o niveles artesianos. La presión tendrá a mantenerse constantes en rocas compactas con fracturas poco abiertas; en rocas con fracturas rellenas de arcilla, tendrá subidas en pico; en formaciones intensamente fracturadas y muy permeables, la presión tenderá a perderse.
- El par motor será más elevado en rocas margosas plásticas, que en rocas duras como el granito, calizas o areniscas.
- La energía de percusión reflejada caracteriza la calidad de una roca y manifiesta sus discontinuidades. Una roca blanda y plástica casi no reflejará energía.

b) Interpretación semicuantitativa

Pueden establecerse correlaciones cuantitativas entre los parámetros registrados y las propiedades geotécnicas de los terrenos atravesados.

Un primer camino es la relación semiempírica a partir de la teoría y los experimentos y ensayos en laboratorio. Este es el caso de las expresiones obtenidas por Paone y Bruce (1963), Tsoutrelis (1969) y Choquin (1970) entre otros, en las que se relaciona la resistencia a compresión simple y la fricción del terreno con las velocidades de avance y rotación, el empuje sobre el útil y coeficientes que dependen del tipo y desgaste del útil y del fluido de perforación (agua, aire o lodo). No obstante, dada la gran cantidad de variables a tener en cuenta, estas expresiones sólo pueden considerarse como el inicio de un futuro prometedor.

El otro camino, de buenos resultados hoy día, es la correlación por medio de índices numéricos que se obtienen combinando adecuadamente entre sí los parámetros registrados. Este procedimiento que presenta la clara ventaja de admitir un análisis informático para buscar las combinaciones de parámetros mejor adaptadas a cada caso, permite entre otras las siguientes posibilidades:

- Cuantificar alteraciones o peculiaridades locales dentro de un mismo sondeo o de una misma capa (véase fig. 8).

- Correlacionar cuantitativamente los índices numéricos con los resultados de ensayos «in situ» y/o en laboratorio.
- Efectuar un análisis estadístico de una gran población de datos, a fin de conseguir la distribución y dispersión de las propiedades geotécnicas de suelos o rocas.
- Controlar la marcha y resultados de posibles tratamientos para mejora del terreno por medio de inyecciones, compactación, etcétera (véase fig. 9).

3.2. Diagramas de testificación o diferidas

Se trata del registro continuo, en función de la profundidad y una vez finalizado el taladro del sondeo, de alguna característica física de los suelos y/o rocas. Procedentes todas ellas de los mundos del petróleo y la minería, aquí sólo se van a considerar las de mayor interés en los reconocimientos «in situ» para presas.

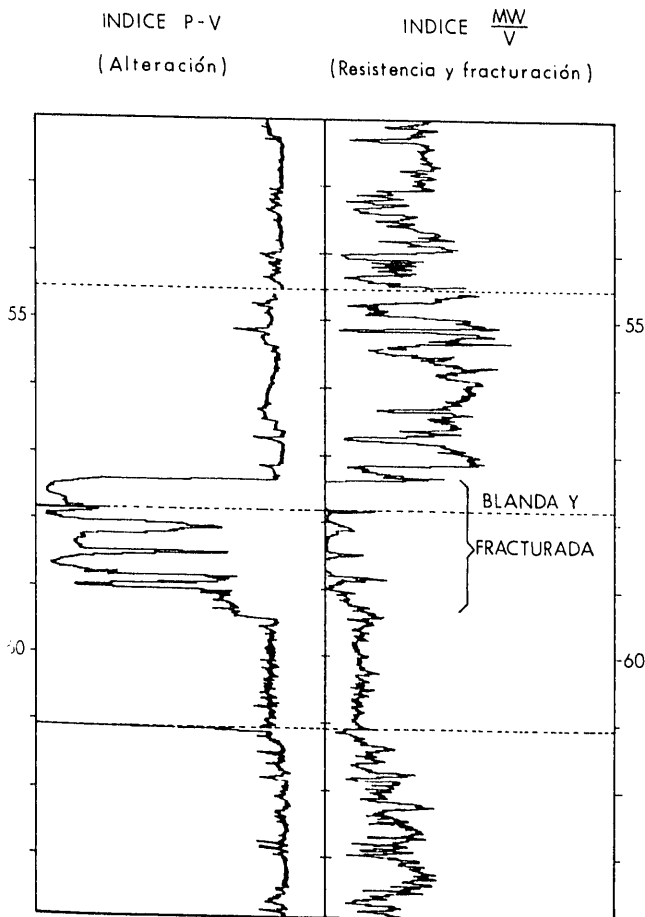
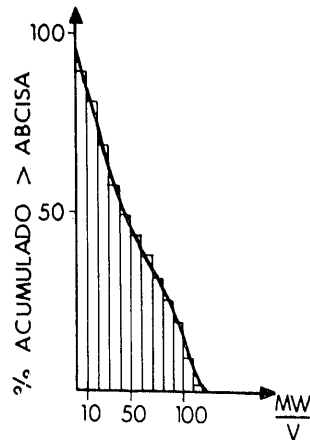
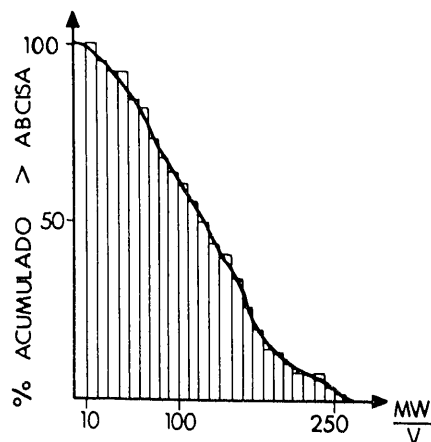


Figura 8. — Índice a partir de parámetros de perforación en un sondeo en Dolomia (según Aiello et al., 1984).

a) Antes de la inyección.



b) Después 1.ª fase de la inyección.



c) Después 2.ª fase de la inyección.

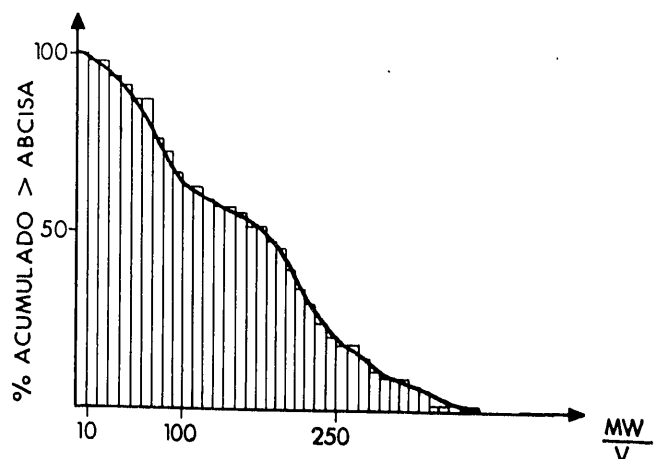


Figura 9. — Control de tratamiento con inyecciones a partir del histograma de reparto del índice MW/V (según Aiello et al., 1984).

3.2.1. **Diagrafías de radioactividad natural**

Consisten en medir la radiación gamma emitida por el terreno, que es debida a cantidades ínfimas de tres elementos radioactivos: Potasio 40, Uranio 238 y Torio 232.

La medida se realiza con sondas que se izan desde el fondo del taladro, y con un contador que suma los impulsos durante un periodo que se define como la constante de tiempo. Es preciso llegar a un compromiso entre esa constante y la velocidad de elevación de la sonda; en general, se adopta una velocidad de 1 m/m para una constante de tiempo de 4 a 8 s, lo que permite detectar capas radiactivas de unos 0,3 m de espesor. Dado el gran poder de penetración de las radiaciones gamma, la medida es poco sensible al diámetro del taladro, y este último puede estar entubado, vacío o lleno de agua.

Estas diagrafías son muy utilizadas, en la actualidad, con fines diversos:

- Precisar los límites geométricos de las capas de suelos o rocas, y facilitar así las interpretaciones y las correlaciones entre sondeos (veánse figs. 10 y 11).

En este sentido es preciso señalar que las arcillas que absorben Potasio 40 presentan una radioactividad elevada, frente a arenas del mismo origen, o rocas como calizas, dolomías, yesos y anhidritas. En general, las arcillas y arenas debidas a la disgregación de rocas primarias, son netamente más radioactivas que las de otro origen.

- Controlar el resultado del tratamiento con algunos tipos de inyecciones (véase figura 12).

3.2.2. *Diagrafías de radiación gamma-gamma*

Se basan en la dispersión de los rayos gamma por la materia para obtener la densidad aparente, o húmeda, del terreno.

La diagrafía consiste en irradiar las paredes del taladro con una fuente de radiación gamma, y en medir, con dos receptores colocados a diferente distancia del emisor, la parte de esa radiación no absorbida. La densidad aparente

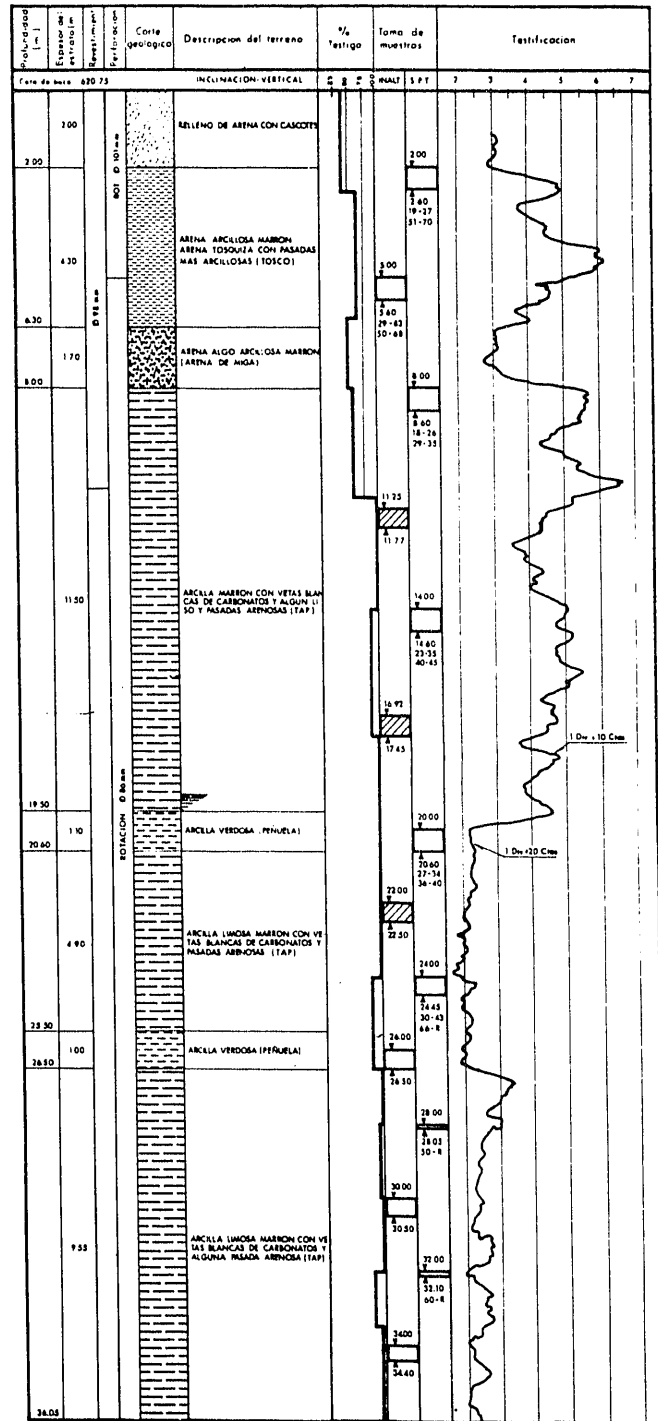


Figura 10.—Registro de radioactividad natural para distinguir capas y formaciones en Madrid.

puede ser obtenida, puesto que existe una relación asimilable a una exponencial entre ella y el número de impulsos medido.

Dado que es difícil el calibrado de la fuente y tener en cuenta la influencia de las condiciones del taladro (diámetro, entubación, vacío c

LOS NUEVOS METODOS SISMICOS Y LAS DIAGRAFIAS DE SONDEOS MECANICOS

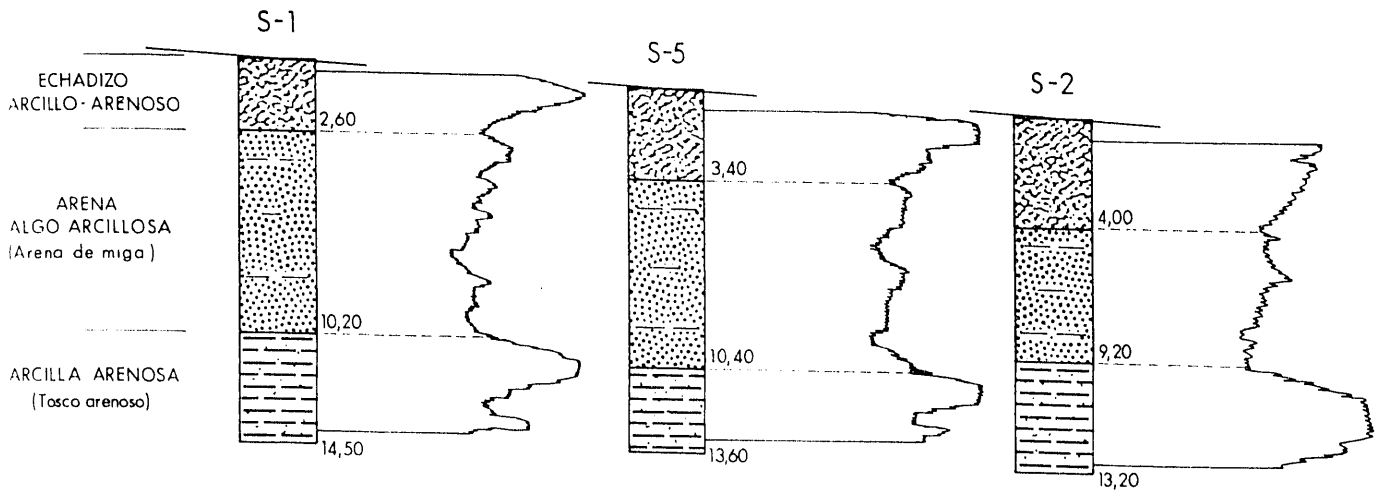
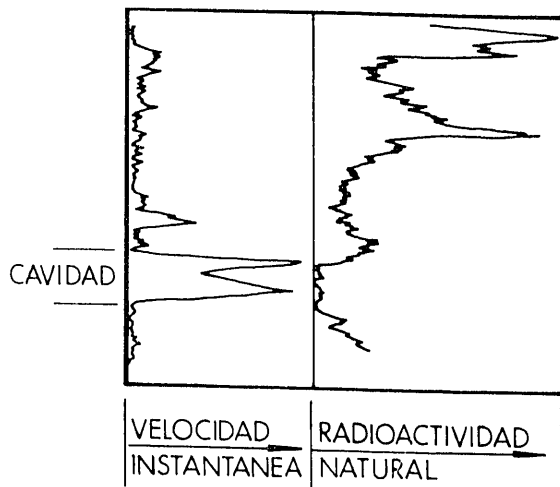


Figura 11.—Registros de radioactividad natural para correlacionar capas en sondeos efectuados en Madrid.

a) Antes de inyección.



b) Después de inyección.

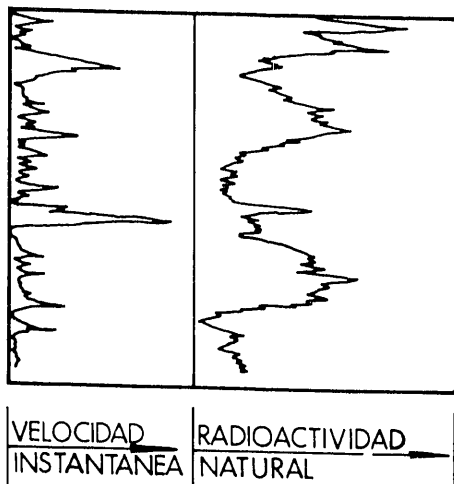


Figura 12.—Control del relleno con cemento-cenizas volantes de una cavidad kárstica mediante diagrfias de velocidad de perforación y radioactividad natural (según Cailleux y Toulemon, 1983).

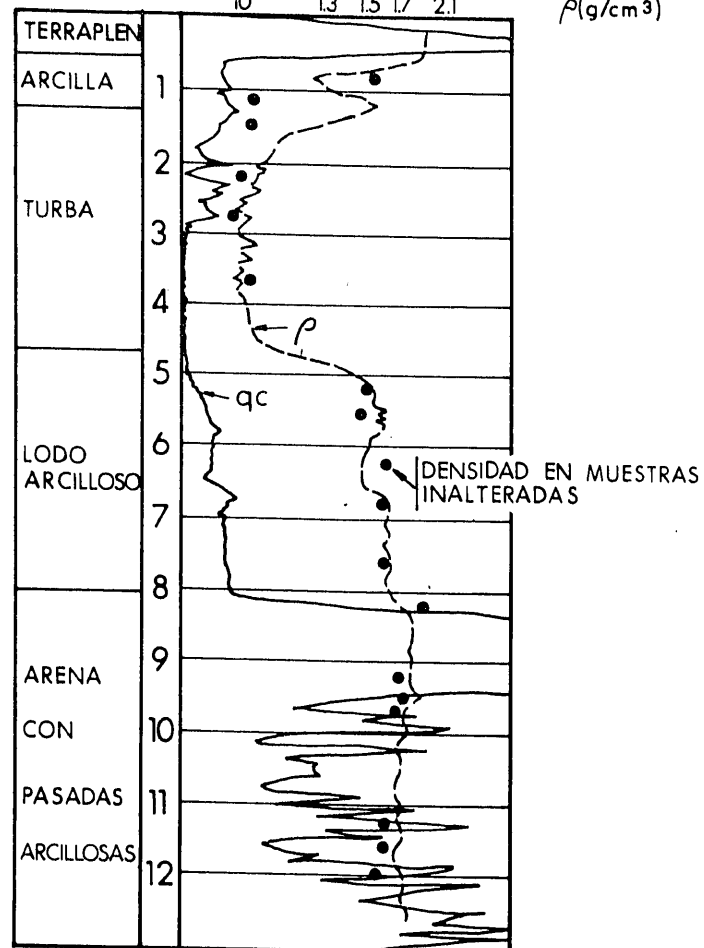
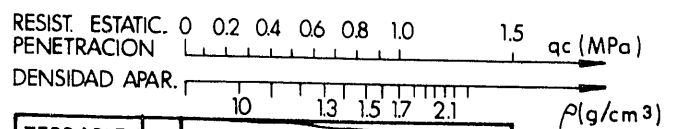


Figura 13.—Correlación densidad resistencia estática a la obtenida con un penetro-gamma-densímetro (según Bru et al., 1983).

con agua, etc.), estas diagrfias se emplean siempre en combinaci3n con otras o con ensayos, tanto para precisar la geometrfa de las capas, como para diferenciar las heterogeneidades locales aut3nticas, de las ocasionadas por problemas en la perforaci3n, o en los ensayos (v3se fig. 13).

3.2.3. *Diagrfias neutr3n-neutr3n*

Tradicionalmente estas diagrfias se han utilizado para obtener el contenido total de agua (de constituci3n, retenida y libre) y la porosidad del terreno, a partir de la disminuci3n de velocidad que los 3tomos de hidr3geno producen en los neutrones r3pidos de la fuente que incorpora la sonda. Adem3s de las correcciones se3aladas para las diagrfias gamma-gamma, es preciso considerar la influencia en las medidas de la composici3n qufmica de la roca.

Con estas limitaciones, el inter3s de esta testificaci3n para la Ingenierfa Civil ha sido muy re-

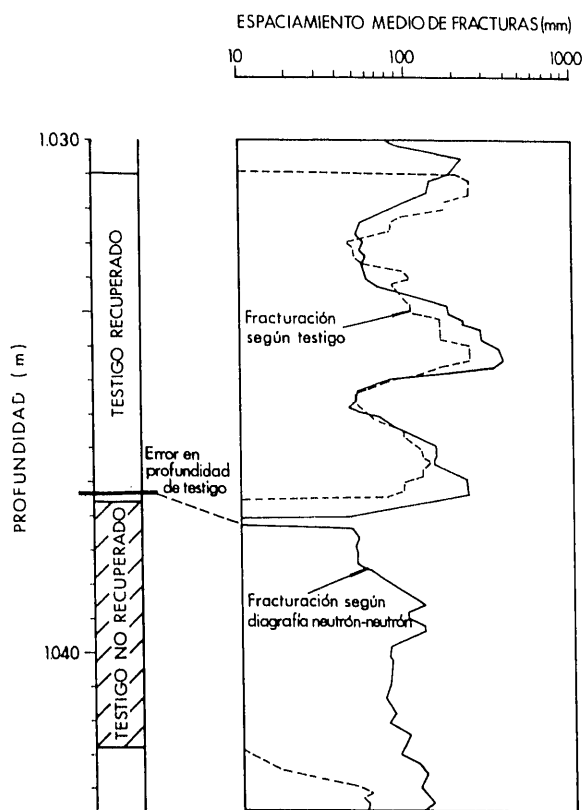
ducido, hasta que en los 3ltimos a3os, los trabajos de Whitworth (1979) y Halker et al (1982) han abierto un nuevo campo muy diferente.

Esta nueva aplicaci3n est3 basada en la relaci3n inversa que parece existir entre la densidad de fracturas de un macizo rocoso y las diagrfias neutr3n-neutr3n.

A partir de una correlaci3n empfrica obtenida entre la fracturaci3n dada por testigos de sondeos y las diagrfias de sus taladros, la National Coal Board ha desarrollado un programa de computador, llamado ROCTEC, que calcula la densidad de fracturaci3n a partir de los registros de este tipo de diagrfias, introduciendo sendas correcciones por litologfa y por di3metro del taladro. Los resultados son excelentes, tal como indican las figs. 14a y 14b.

Si bien, actualmente no existe experiencia fuera de la minerfa, todo hace suponer que en los pr3ximos a3os, esta nueva t3cnica tendr3

a) Comparaci3n entre las fracturaciones de la roca seg3n testigo recuperado y a partir de diagrfia neutr3n-neutr3n.



b) Tratamiento estadfstico de la fracturaci3n sintetizada a partir de la diagrfia neutr3n neutr3n.

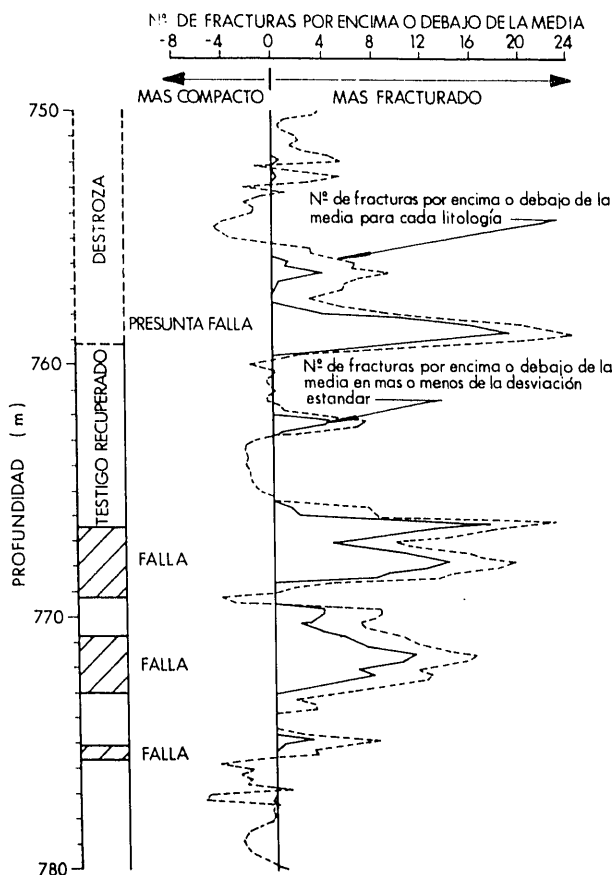


Figura 14. — Seg3n Whitworth y Kusznr, 1983.

un lugar importante dentro de los reconocimientos «in situ» de los macizos rocosos.

3.2.4. *Diagrafías sónicas*

Estas diagrafías, conocidas también por su denominación inglesa SONIC LOG, suministran las velocidades de un sondeo. En general sólo se obtiene la velocidad de las ondas de compresión, pero bajo ciertas condiciones se puede medir también la velocidad de las ondas de corte, y las características de atenuación de ambos tipos de ondas.

Una limitación importante viene de que para efectuar estas diagrafías, el taladro no podrá estar revestidos, y deberá estar lleno de agua o lodo, a fin de asegurar el acoplamiento acústico del terreno con la sonda.

A pesar de todo, las diagrafías sónicas ofrecen amplias posibilidades en la investigación «in situ» de macizos rocosos:

- Variaciones en la velocidad de las ondas

sónicas corresponden a cambios en litología y porosidad de las rocas.

- Las velocidades de las ondas de presión y de corte junto con la densidad, permiten establecer las propiedades elásticas dinámicas de la formación, y ciertas estimaciones de las estáticas.
- La atenuación de las ondas sónicas puede ser correlacionada con las propiedades mecánicas y el grado de fracturación de las rocas (véase fig. 15).
- Los resultados de estas diagrafías son de especial interés en el reconocimiento de canteras, tanto para determinar la calidad del material, como para la ripabilidad. En efecto, las tablas convencionales para estudio de esta última, sólo consideran la velocidad sónica sin tener en cuenta la estructura de la formación, mientras que estas diagrafías dan información acerca de las dos.

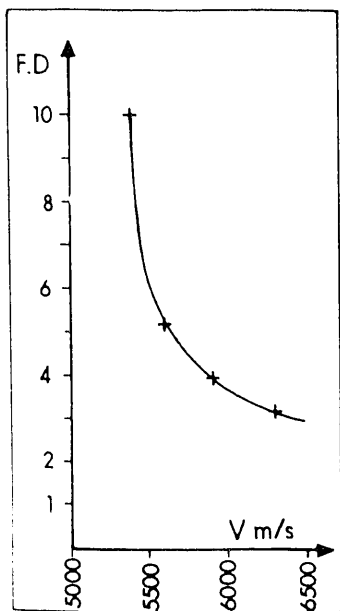


Figura 15.—Variación del R.Q.D. y de la frecuencia de discontinuidades con la velocidad medida en diagrafías sónicas (según Allard, 1978).

3.2.5. *Otras diagrafías*

El calibre, o CALIPER LOG en inglés, proporciona una medida del diámetro del taladro en función de la profundidad, y actualmente es imprescindible en toda testificación de sondeos, pues ya se ha señalado, que es un dato básico en las tablas de calibración, o corrección, de las demás diagrafías. Además constituye una buena indicación cualitativa sobre las litologías atravesadas, dada la tendencia a aumentar el diámetro del taladro en tramos incompetentes (blandos, muy fracturados, etc.).

Las diagrafías de temperatura miden, en función de la profundidad, el valor de esta magnitud física en el fluido de perforación en reposo, mientras que las de diferencia de tempera-

PROF. EN SONDEO	DIAGRAF. VELOCID.		ESPAC. DISCONT. (cm)	R.Q.D.				F.D.	
	V (2 m) m/s	\bar{V}		Lo = 10 cm		Lo = 30 cm		BASE 1 m	MEDIA
				BASE 1 m	MEDIA	BASE 1 m	MEDIA		
0- 5 m	< 1.500		0-20	0- 75 %	10 %	0 %	0 %	60- 100	86
5- 9 m	4.600-6.400	5.400	0-60	42- 100	80	20- 80	55	3- 40	10
9- 14 m	5.500-6.200	5.900	7-60	93- 100	95	60- 100	65	2 a 5	4
14- 22 m	5.800-6.500	6.300	10-60	100 %	100	23- 100	70	2 a 5	3,2
22- 30 m	5.100-6.200	5.600	0-50	90- 100	95	0- 80	47	3 a 8	5,2

tura, suministran la variación de ésta entre dos puntos del fluido. Se fundamentan en la tendencia de este último a adquirir la temperatura del terreno, si no existen perturbaciones como la entrada de filtraciones de agua. Se emplean en el campo de la hidrogeología, y en el control de los tratamientos con inyecciones o cementaciones de entubaciones.

Finalmente, es preciso mencionar las diagrfias geoelectricas, como potencial espontáneo y resistividades normal y localizada entre otras, que miden en función de la profundidad, las diferencias de potencial y las resistividades aparente o verdadera del terreno atravesado. Se utilizan en hidrogeología, tanto para correlaciones litológicas y establecer los límites de capas o lechos, como para detectar tramos permeables y medir la resistividad del agua freática.

4. CONCLUSIONES

La base de los reconocimientos geotécnicos «in situ» para una presa viene estando tradicionalmente en técnicas como los sondeos mecánicos con testigo, las zanjas y galerías para inspección y pruebas, y los ensayos a corte de discontinuidades y de carga en grandes superficies; medios y ensayos, todos ellos, lentos, puntuales y onerosos, claramente específicos para estudios locales y detallados.

Sin embargo, esa campaña de investigaciones geotécnicas debe consistir, cada vez más, en una secuencia lógica y temporal de trabajos, donde no cabe descuidar las primeras fases en las que se ha de reunir la información necesaria para una comparación técnica y económica de las soluciones alternativas posibles.

Para que este análisis comparativo no sea pu-

ramente formal, y posteriormente no surjan sorpresas indeseables en el momento del proyecto definitivo o iniciada la construcción, es preciso que el ingeniero disponga de medios de reconocimiento «in situ» suficientemente fiables, rápidos y versátiles, que le permitan obtener una base geotécnica válida, tanto para la ubicación y proyecto de la presa, como respecto de las canteras o préstamos necesarios para su construcción.

En la última década, la situación ha mejorado notablemente en este sentido, al incorporarse a la ingeniería civil de los países avanzados, gracias a los progresos en el campo teórico y al desarrollo de la electrónica y la informática, un conjunto de nuevas técnicas que procedentes, en buena parte, de las industrias del petróleo y la minería, se fundamentan en diversos principios geofísicos, tales como propagación sónica, propiedades geoelectricas, radioactivas y nucleares, difusión de ondas electromagnéticas (georradar), registros de parámetros de perforación de taladros, etc.

De entre esas técnicas, en las páginas anteriores se han expuesto los principios, posibilidades y limitaciones de los nuevos métodos sísmicos y las radiografías de sondeos mecánicos, en la seguridad de que ese conocimiento es la mejor garantía de éxito en su utilización.

Aunque estas nuevas técnicas no resuelven, o resolverán, todos los problemas geotécnicos planteados por las presas, no deja de ser cierto también que empleadas con fines específicos y en combinación con los demás métodos de exploración y ensayo, constituyen unos medios potentes y cada vez más fiables, de necesaria consideración en las campañas de reconocimientos «in situ».