

2. PERFORACION DE SONDEOS DE INVESTIGACION

2.1. Programas de Investigación y tipos de sondeos característicos

2.2. Técnicas de perforación

2.2.1. Generalidades

2.2.2. Tipos de sondeos

2.3. Métodos de perforación de sondeos de investigación

2.3.1. Perforación con recuperación de testigo

2.3.2. Perforación a rotopercusión con aire a baja presión

2.3.3. Perforación con aire a alta presión (Booster Drilling)

2.3.4. Perforación rotary con triconos

2.4. Evolución futura. Problemas a solucionar

2.1.- PROGRAMAS DE INVESTIGACION Y TIPOS DE SONDEOS CARACTERISTICOS

Puesto que el objetivo final de la investigación es la caracterización de un volumen de roca representativo dentro de un área seleccionada, **se** suele plantear la misma en varias etapas, de manera que progresivamente se vaya profundizando en el conocimiento deseado, con la posibilidad de suspender la investigación si los datos obtenidos en un sondeo así lo aconsejan. Factores que pueden obligar al abandono de una zona son: espaciamiento pequeño entre fracturas, condiciones geoquímicas anómalas, altos valores de la conductividad hidráulica, etc.

Esta fase de investigación se suele comenzar con la perforación de un sondeo de reconocimiento profundo que atraviese la masa de la roca seleccionada llegando a los estratos infrayacentes. Este sondeo suele hacerse a testigo continuo y permite llevar a cabo los siguientes puntos:

- Descripción y estudio detallado del testigo.
- Ensayos sobre los mismos.
- Testificación geofísica del sondeo.
- Ensayos hidráulicos en diferentes zonas.
- Medidas de esfuerzos y deformabilidad de la roca.

Con estos ensayos y estudios es posible ya tener un criterio de abandono. En caso de continuar la investigación, se suelen acometer ya la realización de diferentes tipos de sondeos con finalidad también distinta. Así, se perforan diversos sondeos, similares al descrito anteriormente, para evaluar la extensión y homogeneidad de la masa de roca. Por otra parte se perforan 1 ó 2 sondeos de 500-700 metros empleando técnicas de rotoperCUSión con aire para llevar a cabo la toma de muestras no

contaminadas de aguas de las distintas zonas y fracturas.

Con vistas a estudiar la piezometría y su variación en profundidad se realiza un conjunto de sondeos de 50 a 100 metros, mediante técnicas de rotopercusión. A dichos sondeos se les instala un control continuo de piezometría de diferentes zonas en profundidad.

En estos sondeos se llevan a cabo ensayos hidráulicos detallados con estudio de interferencia entre diferentes sondeos.

2.2.- TECNICAS DE PERFORACION

2.2.1.- GENERALIDADES

En estos tipos de sondeos, enumerados suscintamente, se emplean técnicas diferentes de perforación, que se adaptan al fin perseguido por los mismos.

Así, en la perforación de sondeos para la obtención de testigo continuo se utiliza la técnica de rotación con corona de testigo que a su vez puede ser de dos tipos ó modelos, según el sistema de recogida del testigo: wireline o batería de doble tubo. La elección del modelo de recogida de testigo, depende a su vez de múltiples factores relacionados con la litología atravesada, diámetros del testigo deseado, rendimiento de coronas, velocidad de avance, etc. La mayoría de las veces es la experiencia la que dicta qué método se elige como más apropiado.

En la perforación de sondeos profundos, para caracterización geoquímica, con muestreos de agua sin contaminar el método más apropiado es el de rotopercusión con aire a alta presión. Este método similar al de rotopercusión tradicional se caracteriza por la ausencia de fluidos o espumas acompañando al aire. El problema de columna de agua es salvado mediante el uso de aire a muy alta presión ($60-80 \text{ Kg/cm}^2$), que se consigue mediante el empleo de "booster" conectado a la salida de los compresores.

Para la perforación de sondeos piezométricos y de ensayos hidráulicos se usa habitualmente el método de perforación a rotopercusión a baja presión. En áreas con niveles piezométricos de poca profundidad, la profundidad máxima que se puede alcanzar suele ser de 200 metros.

Como se ve, cada sondeo exige la elección de un método de perforación adecuado a su finalidad y diseño. A veces es necesario utilizar métodos mixtos, casi siempre, por imperativos de características de formación. Es el ejemplo de estudio de formaciones arcillosas tendentes al hinchamiento en que es muy difícil obtener testigo continuo. En estos casos se suele perforar por el método rotary con lodos adecuados que sostienen las paredes; y, eventual y periódicamente extraer testigos con la incorporación de una batería de doble tubo.

2.2.2.- TIPOS DE SONDEOS

En general, los sondeos se pueden clasificar en diversos tipos según la finalidad para la que se construyen. Se tienen así:

- Sondeos de reconocimiento o investigación en general.
- Sondeos piezométricos.
- Sondeos de monitoring o vigilancia de calidad de agua.
- Sondeos geotécnicos.
- Sondeos de inyección de cemento o pilotes.
- Sondeos de explotación de agua.
- Sondeos petrolíferos, que a su vez pueden ser de investigación o de desarrollo de campo.
- Sondeos de inyección de residuos en formaciones permeables.
- Sondeos para la creación de cavidades salinas,
- Sondeos geotérmicos.
- Etc.

Como se ve la variedad es grande, y en cada uno de

ellos se emplean métodos de operación específicos.

En el presente informe se trata especialmente el primer tipo de los enumerados, es decir, los sondeos de investigación y reconocimiento.

Estos sondeos tienen por objeto hacer las exploraciones necesarias para el estudio de un determinado terreno o formación, proporcionando entre otros los siguientes datos:

- Litología, mediante el estudio del ripio, testigos y registros o diagrafías.
- Presiones de formación y niveles piezométricos de los distintos acuíferos cortados.
- Propiedades físicas de las rocas tales como porosidad, permeabilidad, temperatura, existencia de fluidos, características mecánicas, etc.
- Propiedades químicas de los fluidos contenidos en la roca, salinidades, efectos corrosivos o incrustantes, concentraciones de diferentes elementos, composición isotópica, etc.

2.3.- MÉTODOS DE PERFORACION DE SONDEOS DE INVESTIGACION

Para la realización de los diferentes tipos de sondeos enumerados en el capítulo anterior existen diversos métodos de perforación, que se adaptarán de distintas maneras a las condiciones de cada caso, Básicamente todos los métodos se pueden incluir en dos grupos, diferenciados por el sistema de trabajo de la herramienta de corte, que *son* percusión y rotación. En el primer grupo se pueden incluir los siguientes métodos:

- Procedimientos manuales.
- Martillos de percusión con aire comprimido.
- Martillos en fondo. (Rotopercusión).
- Hinca de tubos.
- Métodos de percusión con cable.

Dentro del grupo de rotación se pueden incluir:

- Procedimientos manuales.
- Sondeos con granalla.
- Perforación con hélice.
- Rotación con obtención de testigo.
- Método Rotary.
- Procedimientos especiales.

Cada uno de estos métodos tiene a su vez variantes ligadas al funcionamiento y dimensiones de los diferentes mecanismos de acción o transmisión.

Puesto que no es el objetivo del presente informe exponer un manual de métodos de perforación, sólo se hará referencia a los más usados en sondeos de investigación aplicados al estudio de las características **más** importantes de las formaciones impermeables que se trata de evaluar con el sondeo. Para un estudio **más** detallado de cada uno de los métodos se

recomienda en particular el texto titulado: "Procedimientos de sondeos", de Jesús Puy Huarte (1981), editado por la Junta de Energía Nuclear. Se trata de un compendio muy claro y sobre todo muy práctico, de los métodos de perforación. Por supuesto existen otros tratados, ya más específicos para determinados tipos de sondeos, como pueden ser los Cursos del Instituto Francés del Petróleo para Perforación Rotary o para Perforación con Diamantes, así como algunas publicaciones de Christensen Diamond Products sobre "Útiles de diamantes en sondeos poco profundos", "El Wire Line en la Investigación Minera", etc., que tratan en detalle aspectos muy específicos.

Otra obra muy interesante, pero más enfocada a sondeos de explotación de agua es la titulada "Ground water and well" de F.G. Driscoll (1986), editada por Johnson Filtration Sistem Inc., en la que en los capítulos dedicados a métodos de perforación se describen ventajas e inconvenientes de los diferentes sistemas con presentación de gráficos explicativos muy claros.

No obstante el texto citado en primer lugar puede ser tomado como manual de uso diario para quien se dedique a estos aspectos de la investigación de subsuelo.

Volviendo a la investigación de rocas poco permeables, empleadas como barreras geológicas, existen ciertos condicionantes que es necesario tener en cuenta a la hora de considerar los diferentes métodos de perforación. A continuación se presentan algunos comentarios sobre estos condicionantes, basados en la experiencia sueca en este tipo de investigación.

Los sondeos perforados durante las fases de investigación regional y local deben atender a diferentes propósitos, ya comentados en apartados anteriores. Cada uno de ellos exige diferentes especificaciones en cuanto a situación, orientación, profundidad, diámetro y tipos de muestras que han de

de recogerse. La selección del método de perforación y ensayos ha de adaptarse a las necesidades de cada caso particular.

Los ensayos, testificación y muestreo se realizan para determinar las condiciones naturales del agua subterránea y del sistema que las contiene. Sin embargo, la propia perforación altera las condiciones naturales originales por acción de los fluidos de perforación y de los ripios generados. Ambos contaminan el agua subterránea y alteran las propiedades hidráulicas del sistema. Es también frecuente que el sondeo perforado sirva de conexión entre sistemas hidráulicos con diferentes niveles piezométricos, provocando movimientos de agua subterránea entre unidades diferentes.

Deben conocerse y cuantificarse los efectos de estas perturbaciones, a la vez que se desarrollan metodologías y sistemas de perforación que minimicen la alteración del estado natural.

Los métodos más frecuentemente utilizados en la perforación de rocas poco permeables son:

- * Perforación con recuperación de testigo.
 - Testiguera convencional en sarta de perforación.
 - Testificación mediante wire-line.
 - Barrenas de testificación especiales.
- * Perforación a destrucción (sección total).
 - Rotopercusión con aire a baja presión.
 - Rotopercusión con aire a alta presión (booster).
 - Perforación rotary con triconos.

2.3.1.- PERFORACION CON RECUPERACION DE TESTIGO

La toma de testigos suele ser necesaria durante las

fases de investigación regional y caracterización de emplazamiento. De este modo pueden realizarse descripciones y ensayos de laboratorio sobre los testigos, a la vez que se emplea el sondeo para ensayos hidráulicos y muestreo geoquímico.

La evolución de las técnicas de toma de testigos ha seguido dos tendencias. La convencional con empleo de testigueras de doble tubo, acoplada al varillaje de perforación y la de wire line o extracción de testigo con cable (Figuras 1 y 2).

En la primera la batería de testigo se instala directamente sobre la sarta de perforación. Constan de dos tubos: la barra exterior y el tubo portatestigos, que van montados mediante una cabeza que permite que el portatestigos permanezca estático durante la rotación de la barra exterior, alojando y protegiendo el testigo de los esfuerzos surgidos durante la perforación. Las barras pueden ser extraídas relativamente rápido si se emplean sistemas avanzados de manejo del varillaje. La proporción de testigo recogido frente a roca perforada es alta; por ejemplo, una barra convencional de 72 mmØ permite obtener testigos de 62 mmØ. Se puede utilizar como fluido de perforación lodo o mejor agua con algún producto lubricante, tipo taladrina. Como es lógico, se debe sacar la sarta cada vez que la testiguera ha penetrado toda su longitud en la formación.

En la perforación mediante wire-line, la tubería interior es independiente de la herramienta y puede extraerse mediante un cable. Por ello no es necesario sacar toda la maniobra cada vez que se completa la batería de testigo. Sus dimensiones deben ser suficientemente pequeñas para poder pasar por el interior del tubo de perforación que sustituye al varillaje.

En el mercado hay dos sistemas principales: la serie Q y el sistema métrico estándar. La serie Q es más adecuada a

Cobera poro tubo testigo tipo 'T'

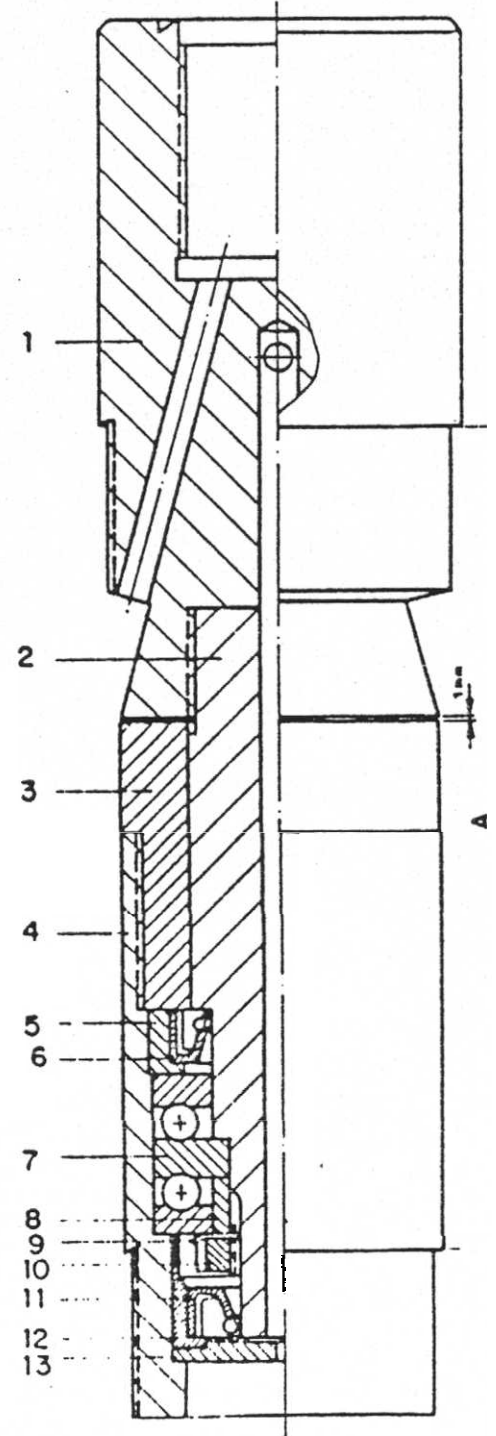
●	A	Diferencia de longitud entre tubos
86	167,6	211
76	167,6	211
66	148,6	192
56	170,1	214
46	132,5	177
36		110

Medidas de los tubos		
Ø	Exterior	Interior
86	85,2 x 79	77 x 73
76	75,2 x 69	67 x 63
66	65,2 x 59	57 x 53
56	55,2 x 49	47 x 43
46	45,2 x 39,8	38 x 33
36	35,2 x 29	27 x 23

Roscas de los tubos 6 h"		
	Exterior	Interior
06	81,5 x 80	74,5 x 73
76	71,5 x 70	64,5 x 63
66	61,5 x 60	54,5 x 53
56	51,5 x 50	44,5 x 43
46	41,5 x 40	34,5 x 33
36	31,5 x 30	24,5 x 23

Rodamientos	
86	52306
76	52306
66	52205
56	52204
46	51103
36	51102

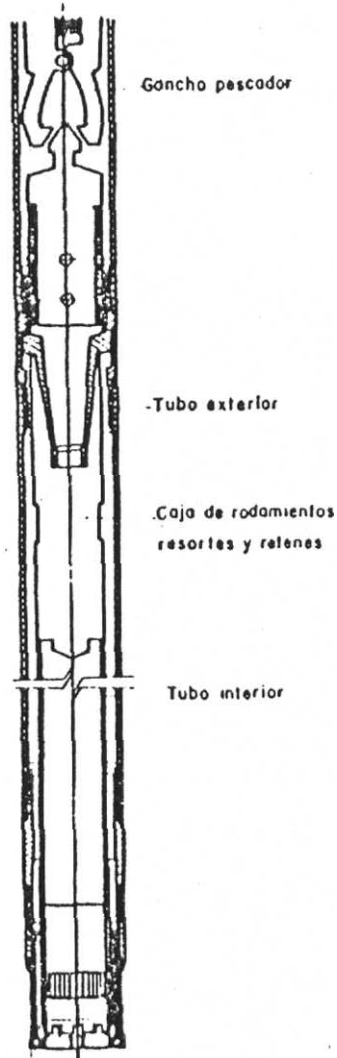
Relenes		
86	}	{ 30 x 50 x 10
76		
66	}	{ 17 x 35 x 10
		{ 25 x 40 x 10
56	}	{ 12 x 30 x 8
		{ 20 x 35 x 7
46	}	{ 17 x 28 x 7
		{ 8 x 22 x 8
36	}	{ 15 x 24 x 7
		{ 8 x 22 x 8



DESPIECE - 1-Cuerpo cabeza, 2-Eje, 3-Pieza intermedia, 4-Buje, sujeción tubo Interior, 5-Porta-retén, 6-Retén, 7-Rodamiento axial, 8-Casquillo separador, 9-Arandela de seguridad, 10-Tuerca de seguridad, 11-Retén, 12-Porta-retén, 13-Arandela de bronce.-

FIGURA 1
TESTIGUERA CONVENCIONAL CON TUBO TIPO T
CUADROS DE MEDIDAS

Tubo testigo de cable (Wire line)



Diámetros de perforación en el tubo testigo con cable

Medidas métricas

Corona Ø E = O agujero Ø I = O testigo	O tren de perforación	O testigo sin cable
86 × 58	82	72
76 × 48	72	62
66 × 40	63	52
56 × 30	53	42
46 × 20	43	32

Medidas americanas

Tipo	Corona Ø E = O agujero Ø I = O testigo	Tubo exterior	Tubo interior	Varillas de perforación		
					Rosca cónica	Peso
AQ	48,0 × 27,0	46,0 × 36,5	32,5 × 28,6	44,5 × 34,9	4 h"	4,6 kg/m
BQ	60,0 × 36,4	57,2 × 46,0	42,9 × 38,1	55,6 × 46,0	3 h"	6,0 kg/m
NQ	75,8 × 47,6	73,0 × 60,3	55,6 × 50,0	69,9 × 60,3	3 h"	7,6 kg/m
HQ	96,0 × 64,3	92,1 × 77,8	73,0 × 66,7	88,9 × 77,8	3 h"	11,5 kg/m
PQ	122,6 × 85,0	117,5 × 103,2	95,2 × 88,9	114,3 × 103,2	3 h"	13,3 kg/m

FIGURA 2

TESTIGUERA WIRELINE Y CUADRO DE MEDIDAS

formaciones blandas que han de perforarse con lodo. Experiencias realizadas en Stripa confirmaron su mala capacidad de penetración en rocas cristalinas duras. El sistema métrico estándar, desarrollado en Escandinavia, utiliza un wire-line de pared delgada. Su penetración es mayor, pero su uso actual está limitado a profundidades máximas de 600-700 m. Una perforación con diámetro nominal de 76 mm produciría un testigo de 47.6 mm con el estándar Q, y uno de 56 mm con el wire-line métrico. La gran ventaja de este método es la velocidad de avance al disminuir los tiempos de maniobra. Otra ventaja estriba en la estabilidad de la sarta. Entre los inconvenientes hay que citar el menor tamaño del testigo, el mayor costo de la corona que es más ancha y, por fin, sus dificultades en perforar terrenos blandos que tiendan a hincharse debido a que funciona mal cuando hay que emplear lodos.

Los tiempos invertidos para perforar sondeos en una roca cristalina dura mediante el sistema convencional y el sistema métrico son prácticamente similares en sondeos del orden de los 500 m.

Se han desarrollado otros tipos de barrenas especiales de toma de testigos para hacer frente a probienas muy concretos. Diseños con tres tubos han sido utilizados para recoger testigos mediante wire-line en formaciones blandas, así como barras presurizadas para mantener la muestra a la misma presión de la formación durante la extracción. Estos tipos de barras de testificación obtienen testigos de menor tamaño y tienen capacidades de penetración notablemente menores que los modelos utilizados habitualmente.

En algunos proyectos de prospección de minerales se han tomado testigos de rocas cristalinas a profundidades que alcanzan los 3000 m. Sin embargo, en trabajos de exploración normales raramente se superan los 1500 m de profundidad.

2.3.2. ■ PERFORACION A ROTOPERCUSION CON AIRE A BAJA PRESION

En perforaciones a percusión se utiliza aire comprimido para accionar un martillo de fondo, así como para extraer los ripios del fondo y refrigerar la herramienta. En lugar del martillo en fondo puede usarse también triconos estándares, y añadir al aire aditivos espumantes, con lo que se amplía el campo de aplicación del método.

Las velocidades de perforación habituales son del orden de los 5 m/hora, alcanzando profundidades máximas en torno a los 150-200 m. Los diámetros de perforación son variables, los costes son bajos y las máquinas tienen fácil movilidad. Empleando este tipo de perforación no pueden tomarse testigos. Estos métodos están limitados casi exclusivamente a la perforación de rocas consolidadas o semiconsolidadas ya que en caso contrario se pueden o bien originar grandes cavidades en el fondo o empastarse la herramienta, perdiendo sus propiedades de corte.

Dentro del programa sueco, este tipo de sondeos tienen una doble finalidad: (1) Comprobar y orientar zonas fracturadas previamente detectadas mediante estudios geológicos y geofísicos de superficie; y (2) Observar el nivel piezométrico del agua subterránea en las zonas altas del cuatrato rocoso.

Entre las ventajas del método cabe citar la velocidad de salida del ripio, el que no dañan las formaciones permeables, no contaminan los fluidos nativos de la formación, las barrenas tienen una larga duración, durante la perforación se puede

estimar la permeabilidad (grosso modo) de las formaciones atravesadas. Entre las desventajas hay que citar sus limitaciones en cuanto a tipo de formación y el elevado costo de compra y mantenimiento de compresores. En la Figura 3 adjunta se presenta un análisis del campo de aplicación del método preparado por una de las casas fabricantes: INGERSOLL-RAND.

2.3.3.- PERFORACION CON AIRE A ALTA PRESION (**Booster Drilling**)

Es una variante de la técnica de percusión en la que se emplean presiones de aire considerablemente superiores. La circulación de agua y ripios se mantiene mediante aire. En Suecia este método ha sido ensayado hasta 500 m de profundidad con diámetros de 165 mm, aunque es posible alcanzar los 1500 m con diámetros mínimos de 140 mm.

Aún se necesitan más ensayos sobre rocas cristalinas. La experiencia hasta el momento indica unos costes del 50% más bajos que la perforación con toma de testigo.

Este método es **de** difícil aplicación a materiales blandos debido a la alta presión de inyección del aire.

Sin embargo es también muy adecuado cuando se planean ensayos de interferencia hidráulica a gran escala. Los grandes diámetros obtenidos en la perforación con aire permiten la instalación de bombas sumergidas de gran capacidad.

Existe abundante información técnica sobre estos métodos a base de inyección de aire preparada por los fabricantes, especialmente: Compair-Holman y la antes Citada Ingersoll-Rand. Puesto que se trata de un método de gran aplicación en el estudio de rocas cristalinas de baja

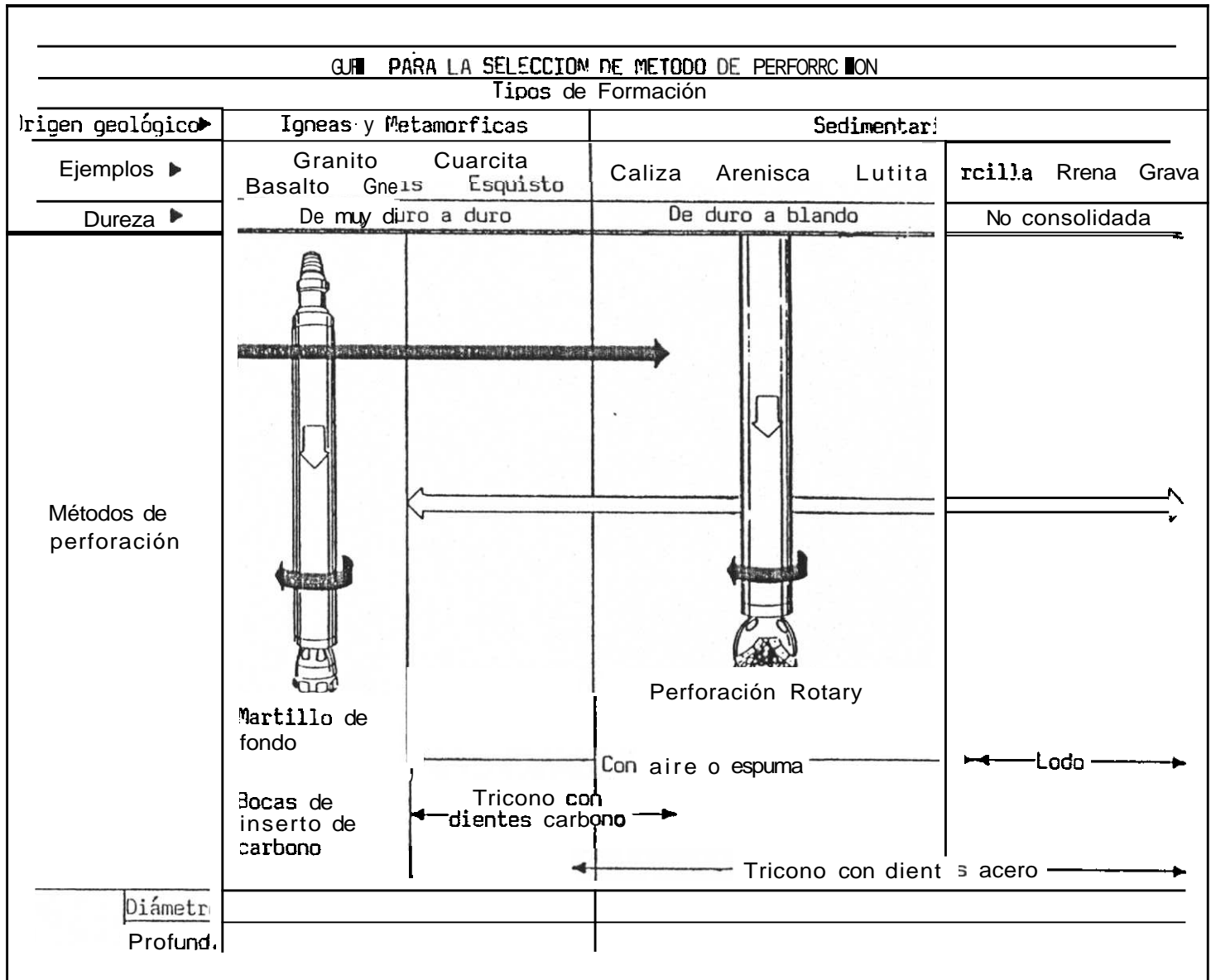


FIGURA 3

CAMPO DE APLICACION DE LA ROTOPERCUSION

permeabilidad, se adjunta como anexo alguna información técnica de interés.

2.3.4.- PERFORACION ROTARY CON TRICONOS

Esta modalidad de perforación a rotación ampliamente conocida en investigación minera y petrolera se utiliza cuando ha de perforarse a grandes profundidades (varios miles de metros). Con ella se alcanzan las mayores velocidades de perforación en sondeos de diámetro grande. En Escandinavia se ha llegado a perforar un sondeo en granito de 311 mm de diámetro, alcanzándose velocidades entre 2,5-4 m/hora a 4000 m de profundidad.

Constituye quizás el método de perforación más utilizado, ofreciendo como principales ventajas las siguientes:

- Velocidad de perforación alta.
- Necesidades de tuberías durante la perforación muy bajas.
- Rapidez de montajes y traslados.
- Rápida instalación de tuberías y acabados.
- Gran profundidad de investigación.

Entre las desventajas cabe citar:

- Las máquinas de perforación pueden ser costosas.
- Se requiere un mantenimiento sofisticado.
- Las máquinas necesitan al menos dos personas.
- La toma de muestras de formación requiere un procedimiento especial.
- El uso de los fluidos de perforación puede dañar las formaciones.

- No pueden trabajar para condiciones extremas de temperatura.
- El manejo de los fluidos de perforación requiere un conocimiento adicional y experiencia.

2.4.- EVOLUCION FUTURA. PROBLEMAS A SOLUCIONAR.

El desarrollo de las técnicas de perforación con toma de testigos corre normalmente a cargo de los fabricantes de material de perforación y de las compañías de sondeos. No es probable que las organizaciones que están interesadas en la investigación del subsuelo realicen programas de desarrollo en este campo. Sin embargo, sí puede ser de utilidad realizar estudios sobre la selección de técnicas de perforación y su mejor adaptación a los diferentes casos así como los efectos de la perforación sobre la contaminación de muestras, etc.

Las labores de perforación suponen una parte importante del coste total de una investigación geológica local. Por ello, parece razonable ensayar diferentes métodos, comparar costes, tiempos de perforación, recuperación en testigos y efectos contaminantes, todo ello a diferentes profundidades de investigación, y realizado con vistas a mejorar los sistemas de Selección.

Durante la perforación se emplea agua para refrigerar la herramienta y circular los ripios hasta superficie. Sus efectos sobre el entorno del sondeo pueden dividirse en dos categorías: contaminación del agua subterránea que se desea posteriormente estudiar y alteración de las propiedades hidráulicas de las rocas.

El agua empleada durante la perforación contamina fuertemente el agua subterránea en las zonas permeables del sondeo. Para minimizar estos efectos deben aplicarse medidas preventivas. Por ejemplo, la perforación de sondeos específicos para suministrar agua de similares características a la de formación, que sin añadirle ningún tipo de aditivos, puede emplearse como fluido de perforación.

También debe llevarse un registro muy exacto y detallado de las pérdidas de fluido de perforación ocurridas en cada tramo permeable a diferentes profundidades. Si el citado fluido es "marcado" con un trazador que no sufra adsorción, será posible posteriormente determinar la proporción de fluido de perforación existente en el agua de la formación muestreada. Para ello es necesario, como se ha dicho, llevar a cabo un exhaustivo control de niveles en balsas, presiones, velocidades de avance, etc.

Las zonas más contaminadas suelen ser como es natural las permeables, en las cuales tiene especial interés la obtención de muestras fiables que permitan determinar las condiciones geoquímicas naturales. Los resultados de estos análisis son muy importantes para obtener buenos resultados en la modelización hidráulica y en la estimación del transporte de nucleidos. Para obtener estos datos es fundamental una buena programación previa de la perforación. Si se va a realizar un sondeo con testificación para toma de muestras de agua, la perforación ha de vigilarse estrechamente de manera que al entrar en una zona permeable, pueda pararse la perforación para realizar la toma de muestras.

La alteración de las propiedades hidráulicas de la roca es más difícil de evitar. El uso de agua de la formación para perforar puede reducir la precipitación causada por fluidos que no están en equilibrio con la formación. Sin embargo, la inyección de ripios generados durante la perforación dentro de las fracturas] puede por si sola alterar las características hidráulicas de la zona.

Una posible solución a los problemas puede ser la utilización de técnicas de perforación con circulación inversa mediante "air lifting" en la cual no se emplea fluido de perforación externa ya que actúa como tal el mismo agua de

formación que se extrae junto al ripio por el interior del varillaje y no por el espacio anular. Esta metodología de perforación es muy usada en E.E.U.U. en sondeos en los que el principal objetivo es estudiar la calidad y composición del agua de formación. Un requerimiento importante es que exista agua en la formación. En la *Figura 4* se presenta un esquema explicativo de este sistema.

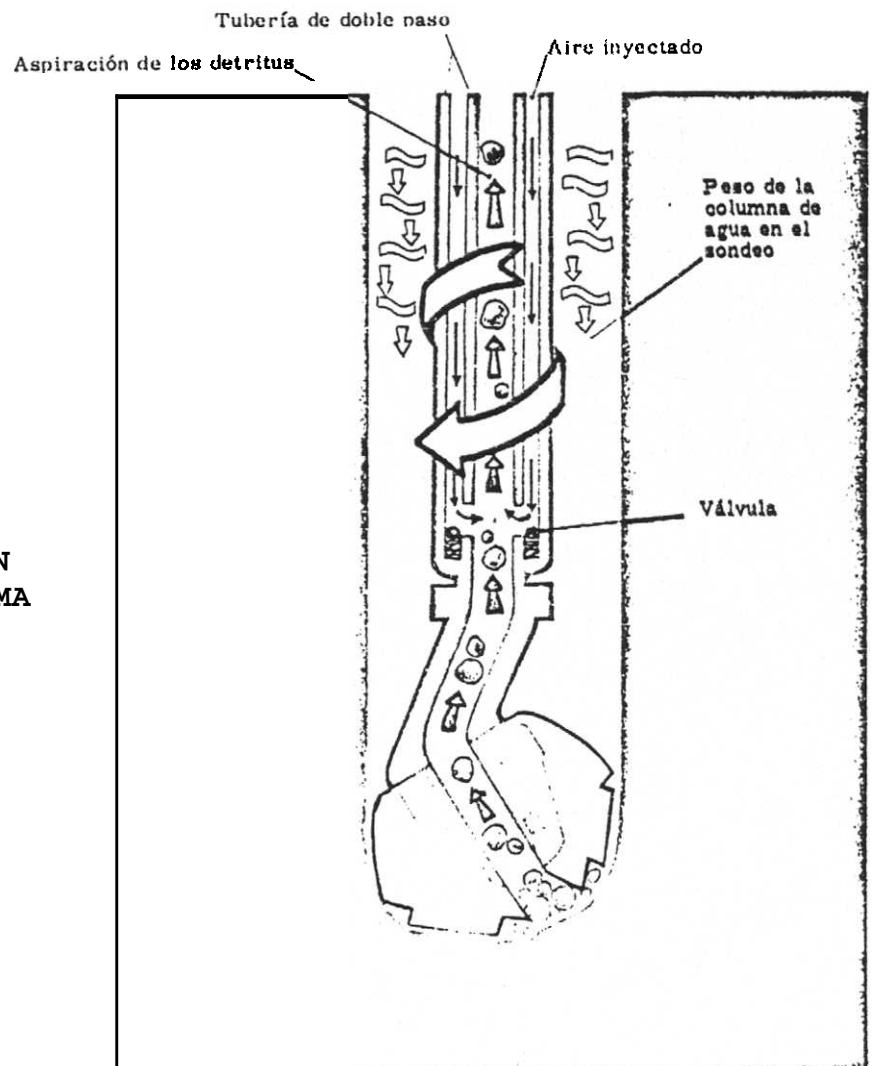
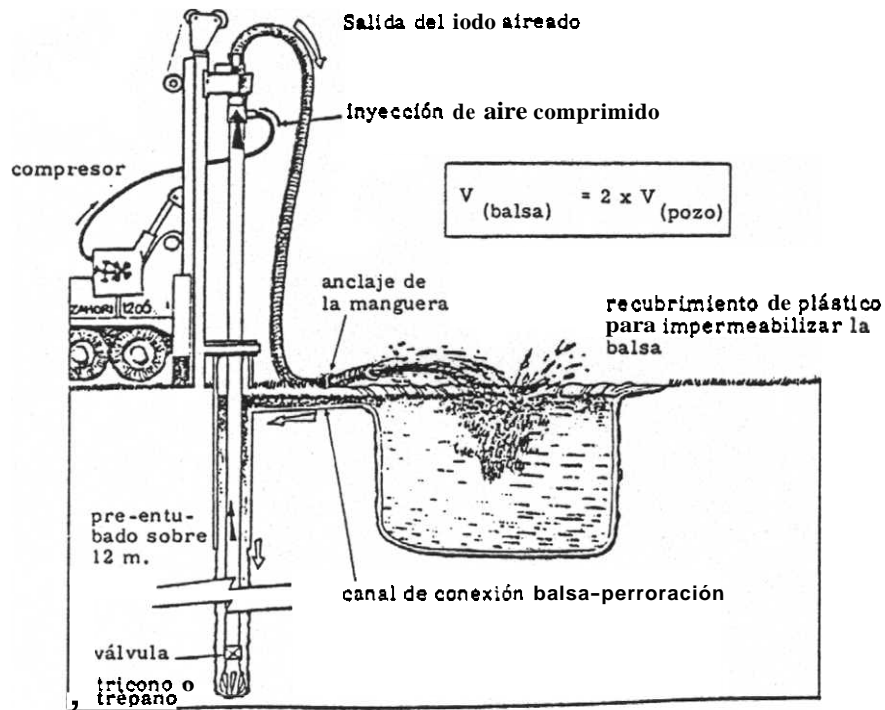


FIGURA 4

PERFORACION A CIRCULACION INVERSA CON AIRE Y ESQUEMA EXPLICATIVO.