

## **2. CLASIFICACION Y CARACTERISTICAS DE LOS MEDIOS DE BAJA PERMEABILIDAD**

***2.1. Propiedades físicas de las rocas***

***2.2. Evaluación de la porosidad***

***2.3. La detección de la fracturación***

## **2. CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS DE BAJA PERMEABILIDAD.-**

Como primer paso en la explicación del porque de los registros geofísicos en sondeos, hemos de realizar un mínimo análisis de las características del medio rocoso que pueden influenciar las determinaciones geofísicas.

Para ello nos apoyaremos en la clasificación establecida en el Capítulo 1:

- Medios sedimentarios no consolidados; refiriéndonos como tal a las cuencas Terciarias con predominio de materiales arcillosos en su composición.
  
- Medios metamórficos y cristalinos.

Los medios sedimentarios no consolidados se pueden subdividir en detríticos y químicos. Sin embargo los segundos son básicamente impermeables y por tanto no los consideraremos en este capítulo.

Las rocas no compactas están compuestas por una amplia variedad de minerales, que dependen de su historia y del

lugar donde se han formado. Para nuestros objetivos su característica más destacable es la existencia de espacios porales entre los agregados minerales que las constituyen. Decisivas respecto a su comportamiento físico y sobre todo mecánico son las fuerzas que mantienen la estructura de esta materia. Pueden ser fuerzas de fricción (rocas no cohesivas) o electro-químicas (rocas cohesivas).

La cualidad de mayor influencia también sobre el tipo de interconexión es el tamaño (en realidad son varios, porque participan diferentes minerales en la composición) de los granos que componen el sedimento. La forma en que interconexionan entre sí los diversos componente minerales en las rocas sedimentarias condicionan el establecimiento de vías interporales, es decir condiciona su permeabilidad.

En todo caso esta permeabilidad depende de la porosidad primaria de la formación y esta va ligada de forma dominante a los niveles detríticos (arenas, gravas y conglomerados).

En la categoría de rocas consolidadas se incluye una gran variedad de rocas ígneas y metamórficas. Aunque en sentido estricto puede considerarselas como homogéneas, tienen porosidad secundaria debido a las fracturaciones y alteraciones que sufren y que permiten el almacenamiento y flujo de líquidos subterráneos. Durante algunos años se ha denominado a estas rocas ígneas y metamórficas "rocas duras". Las más comunes son los granitos y gneises. Un caso especial son las rocas volcánicas y carbonatados aunque las últimas se pueden considerar como pertenecientes a una clase particular de permeabilidad media a alta, fuera de los objetivos de este Estudio. Se excluye este tipo de rocas porque pueden tener porosidad primaria, que generalmente no se da en las rocas ígneas y metamórficas.

Las rocas duras se han definido a veces en publicaciones como "rocas compactas, no carbónicas, no volcánicas" (Unesco 1985).

La permeabilidad de las rocas compactas inalteradas depende del sistema de fracturas, las diaclasas y fisuras interconectadas de las rocas. Estas aberturas son el resultado, principalmente, de los fenómenos tectónicos en la corteza terrestre. La solidez de la roca o su resistencia a las fracturas es un proceso muy complicado. Influyen parámetros petrográficos como dimensión granular, grado de metamorfismo, estructura de plegamientos y dirección de sus ejes. Dado que son sistemas de una composición de varios minerales, su comportamiento físico depende de las características y la cantidad de los componentes individuales.

Los procesos de alteración tienen una influencia considerable en la permeabilidad de estas rocas. Se agrupan generalmente en tres categorías principales que, por supuesto, pueden actuar simultáneamente: la desintegración física o mecánica, la disolución química y los efectos alteradores biológicos del clima y la vegetación. Estas acciones pueden suponer un aumento o una disminución de la porosidad de la roca original y de la asociada con sus fracturas o fisuras.

La mayoría de los procesos de alteración de las rocas o bien los resultados de los mismos pueden manifestarse en las medidas geofísicas.

Así pues uno de los objetivos principales de la testificación geofísica en el ámbito que nos ocupa es la identificación de tramos porosos y permeables en la sección atravesada por el sondeo.

La porosidad se define como ratio respecto al volumen global de la roca ocupado por los poros y se expresa en valores porcentuales. Por ejemplo un valor entre 10 y 30 por cientos significaría que se trata de una formación de muy alta porosidad mientras que valores inferiores se refieren a formaciones de media ó baja porosidad.

Los poros por su parte pueden llevar líquidos, gases ó simplemente estar "vacíos"

Estrechamente relacionada con la porosidad está la permeabilidad de una formación, que expresa hasta que grado están interconectados los poros lo que posibilita el flujo de líquidos a través de la formación. La permeabilidad se expresa en **darcs**: Un darcy es la permeabilidad que permite el flujo de un mililitro de líquido por segundo y un centipoisie de viscosidad por un centímetro cuadrado baja la presión de una atmósfera por centímetro. Los valores típicos de acuíferos detríticos se encuentran en el orden de un darcy hasta pocos milidarcys.

La permeabilidad puede, en ciertos casos, evaluarse con los datos de la testificación utilizando ecuaciones empíricas. Los resultados en general tienen significación solamente en su orden de magnitud. La determinación objetiva de la permeabilidad se efectúa a través de ensayos de bombeo.

La correlación entre pozos y la identificación de formaciones tiene muchas veces tanta importancia como la determinación de la porosidad y permeabilidad misma.

En conjunto, partiendo de un modelo geológico de la zona de estudio, la testificación permite llegar a conclusiones sobre los detalles de la estratigrafía, observando cambios sistemáticos en

las características de los diagramas. Por supuesto se llegará siempre a conclusiones más exactas en una zona, cuanto mayor sea el número de sondeos involucrados en el estudio.

### 2.1. Propiedades físicas de las rocas.-

Las técnicas de testificación geofísica se orientan generalmente a la medida de algunas propiedades características de las rocas. Las más significativas son:

- El comportamiento eléctrico frente al paso de la corriente eléctrica.
- su elasticidad
- propiedades radioactivas.

La determinación de estas características específicas para las capas geológicas, proporciona de una forma indirecta, información sobre su porosidad, fracturación y permeabilidad.

Son varias las propiedades que tienen significado en el comportamiento eléctrico de una roca y de los minerales que la componen. Las medidas más comunes en este ámbito son las siguientes:

- El potencial eléctrico natural.
- La resistividad eléctrica ó su inversa la conductividad.
- La constante dieléctrica.

De todas ellas se puede considerar a la resistividad eléctrica como la de mayor importancia y significado.

Aunque cada mineral tiene una resistividad caracterís-

tica, que puede variar notablemente entre los conductores, semiconductores y los no conductores, la resistividad eléctrica de las rocas está condicionada principalmente por el agua contenida en sus poros. Esto se refiere al caso normal, cuando no se trata de zonas de alta mineralización como puede ocurrir en las fallas.

La dependencia de la resistividad eléctrica respecto al agua que rellena los espacios porales está condicionada a su vez por un doble aspecto: Porosidad y salinidad del agua.

En general, las formaciones ígneas muestran los valores de resistividad más altos, seguidas por las rocas metamórficas. Los sedimentos no consolidados figuran con los valores más bajos.

El tamaño y la forma de un cuerpo pueden alterarse aplicando fuerzas externas. Las fuerzas internas resisten a las externas y como consecuencia el cuerpo tiene la tendencia a volver a su condición inicial al cesar el efecto de las fuerzas externas. Un cuerpo que se considera como perfectamente elástico, recupera totalmente su forma inicial. Si no se pasa un límite crítico en que se rompe el material, las rocas tienen características perfectamente elásticas. El concepto de stress and strain describe las relaciones entre fuerzas aplicadas y las deformaciones; siendo las constantes de elasticidad los parámetros que describen el comportamiento del material en cuestión.

Estrechamente relacionada con la elasticidad está la velocidad a la que una onda elástica emitida por una fuente puede viajar dentro de un medio rocoso. La velocidad de las ondas compresionales es exclusivamente una función de las constantes elásticas y de la densidad, y consecuentemente de la porosidad de la formación.

Así pues, a partir de las medidas de la velocidad de transmisión de las ondas compresionales se puede obtener información relativa a la porosidad de las formaciones.

Por convenio, en los registros geofísicos de este grupo, se utiliza el concepto "travel time" en lugar de la velocidad. Se trata del tiempo invertido por la señal en atrevesar una longitud unitaria a través de la formación.

La radioactividad natural de las formaciones rocosas está directamente relacionado con el contenido en los elementos radioactivos, U, Th y K, presente en una gran parte de las rocas sedimentarias.

En medios sedimentarios no consolidados es el contenido de K el factor condicionante. En este caso el registro de radiación gamma natural es un indicador directamente relacionado con el contenido arcilloso de la formación.

## 2.2. Evaluación de la porosidad.-

Las técnicas analíticas para determinar la porosidad se refieren a condiciones en que los poros se hallan saturados con líquidos. Los datos utilizados en general provienen de la testificación geofísica con los métodos estándar:

- gamma-gamma log (density log)
- neutrón-neutrón
- velocidad acústica (sonic)
- resistividad.



El registro de densidad se ve influenciado por la densidad global de la formación que será tanto menor cuanto mayor sea la porosidad.

La relación entre la porosidad y la resistividad de las formaciones viene definida por la ley de Archy:

$$R_t = C \cdot R_w \cdot \Phi^{1/m}$$

con:

$R_t$ : valor real de la resistividad

$R_w$ : resistividad del fluido (en general agua con minerales disueltos) que funcionan como electrólitos

$C$ : una constante (factor de formación)

$m$ : una constante (factor de cementación)

$\Phi$ : porosidad

Por su parte la fórmula que relaciona la porosidad y la velocidad acústica es la siguiente:

$$1/V = \Phi/V_f + (1-\Phi)/V_m$$

con:

$\Phi$ : porosidad.

$V$ : velocidad medida.

$V_f$ : velocidad del fluido de los poros

$V_m$ : velocidad de la matriz rocosa.

Una tercera ecuación permite establecer una relación entre la radiación detectada con el método de la testificación Neutrón-Neutrón y la porosidad:

$$ND = C + D * \ln(\Phi)$$

con:

ND : número de cuentas por segundo

C y D: constantes

$\Phi$  : porosidad

ln : logaritmo natural.

Las ecuaciones se pueden sustituir entre si y correlacionar los distintos métodos para acercarse analíticamente a un valor de porosidad, que aproximadamente corresponde a la realidad.

En base a las mismas fórmulas fueron elaborados por los técnicos de exploración de hidrocarburos, métodos gráficos que son aptos para evaluaciones in situ. Las técnicas asumen la combinación de cualquier pareja de resultados de la testificación; resistividad, velocidad acústica, neutrón-neutrón y gamma-gamma.

Sin embargo hay que tener en cuenta que todos los métodos de evaluación de la porosidad se basan en las hipótesis siguientes:

- Presencia de un fluido único en los poros.

- La variación de los resultados de las testificaciones individuales, efectivamente están provocadas por cambios de la porosidad.
- Uniformidad de la matriz rocosa.

Se ha abordado de muchas maneras la determinación de los parámetros necesarios para la evaluación de la porosidad de formaciones a partir de los datos obtenidos con métodos de testificación geofísica. Sin embargo ninguna técnica analítica ha superado el problema fundamental que es la influencia de la presencia de arcillas. Su presencia en las formaciones reduce significativamente la fiabilidad de los resultados obtenidos.

### **2.3. La detección de la fracturación.-**

Por definición una fractura simplemente es una discontinuidad de origen tectónico ó mecánico. En la práctica de la geología se describen así desde fisuras finas hasta fallas de gran escala. El orden de magnitud de tal tipo de accidentes presenta una amplia variedad y también sus propiedades químicas y físicas.

Las herramientas utilizadas en la testificación responden a cambios litológicos, a cambios de densidad o de los parámetros mecánicos de la formación rocosa, y otras al contenido de fluidos. Sin embargo ninguna responde directamente a la presencia de fracturas (Schlumberger 1987). Por lo tanto el estudio de zonas de fracturas se enfoca a través de las características particulares que se reflejan en los resultados de los métodos convencionales. El reconocimiento de discontinuidades se complica bastante por una serie de hechos:

En primer lugar la roca reacciona al deterioro mecánico

causado por la perforación. No se puede excluir un cambio en algunos parámetros característicos de la roca por un alivio de tensión provocado por la perforación. En segundo término, porque en general las fisuras ó fracturas fueron sometidas a alteraciones químicas, producidas por la circulación de fluidos durante la perforación. Otra vez la presencia de minerales arcillosos complica la interpretación, dado el hecho que la mayoría de las herramientas estandar de la testificación responden a tal presencia sin poder cuantificar un efecto.

El tipo de fracturas que han sido cerradas por presión ó precipitados de minerales, en muchos aspectos son las más importantes. Afectan a rocas que son básicamente impermeables y les confieren una permeabilidad que aunque sea reducida puede ser significativa. Estas fracturas son difíciles de identificar y analizar. En algunos casos una serie de fisuras muy finas pero densas pueden alterar la porosidad global de la formación y dar respuestas útiles en logs de densidad y resistividad. También cabe la posibilidad, para fracturas mineralizadas, de que sean detectadas mediante registros de radioactividad, densidad ó resistividad eléctrica, por las características de los precipitados de minerales existentes en ellas. Sin embargo en general el método más seguro y fiable en estos casos son las técnicas especiales.

Aunque los medios compactos son problemáticos, la combinación de los adecuados métodos de testificación ayuda definitivamente a reconocer con mucha seguridad las discontinuidades significativas en la roca. Los registros que cabe considerar como más resolutivos al respecto son los siguientes:

- caliper.
- gamma natural.
- gamma-gamma.
- neutrón-neutrón
- sónico
- resistividad.
- temperatura.
- microflowmeter.