



Empleo de las técnicas geofísicas y de los ensayos in situ en los túneles de Guadarrama

José Miguel Galera

Geocontrol, S.A., UPM

Salvador Pescador

In Situ Testing, S.L.

Ángel Rodríguez

In Situ Testing, S.L.

Manuel Torres

In Situ Testing, S.L.



Empleo de las técnicas geofísicas y de los ensayos in situ en los túneles de Guadarrama

José Miguel Galera
Salvador Pescador
Ángel Rodríguez
Manuel Torres

Resumen

Durante la fase de proyecto constructivo y, sobre todo, durante la construcción de los túneles de Guadarrama, se han empleado diferentes técnicas geofísicas que han permitido conocer de forma precisa la estructura geológica de la zona en la que se desarrolla la infraestructura. Así mismo se han realizado ensayos geotécnicos in situ que han permitido la caracterización geomecánica de los terrenos a excavar.

Los trabajos realizados pueden agruparse del modo siguiente:

- en superficie, por delante de la tuneladora, desde la boca Sur.
- en superficie, por delante de la tuneladora, desde la boca Norte.
- en la Falla de La Umbría, donde más métodos han sido empleados tanto desde la superficie, como en sondeo, como entre superficie y sondeo y entre sondeos.

En este artículo se exponen cuales son las características de cada una de las técnicas empleadas, para a continuación describir los trabajos realizados, mostrando ejemplos significativos de los resultados alcanzados.

Abstract

During the design phase, but mostly the construction phase, in Guadarrama several geophysical investigation methods have been applied, in order to allow a good knowledge of the rocky massive. In situ geotechnical tests have been also carried out, yielding important ground geomechanical parameters.

One can divide these tests as follows:

- *surface tests, carried out from the South Portal, previous to the TBM;*
- *surface tests, carried out from the North Portal, previous to the TBM;*
- *La Umbría Fault, where various methods have been applied at the surface, in borehole, surface to borehole or borehole to borehole.*

This paper explains the principle of each method, describes the field campaigns and shows the most significant results of the geophysical investigation in Guadarrama tunnel.

Durante la fase de proyecto constructivo y, sobre todo, durante la construcción de los túneles de Guadarrama, se han empleado diferentes técnicas geofísicas que han permitido conocer de forma precisa la estructura geológica de la zona en la que se desarrolla la infraestructura. Así mismo se han realizado ensayos geotécnicos in situ que han permitido la caracterización geomecánica de los terrenos a excavar.

Los trabajos realizados pueden agruparse del modo siguiente:

- en superficie, por delante de la tuneladora, desde la boca Sur,

- en superficie, por delante de la tuneladora, desde la boca Norte,
- en la Falla de La Umbría, donde más métodos han sido empleados tanto desde la superficie, como en sondeo, como entre superficie y sondeo y entre sondeos.

En este artículo se exponen cuales son las características de cada una de las técnicas empleadas, para a continuación describir los trabajos realizados, mostrando ejemplos significativos de los resultados alcanzados.



1. Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos empleados pueden dividirse, según el principio físico en el que se basan, en métodos sísmicos, métodos eléctricos, y métodos electromagnéticos. Además se describen aparte las técnicas de testificación geofísica de sondeos.

1.1. Métodos sísmicos

Los métodos sísmicos empleados han sido tres: sísmica de refracción, sísmica de reflexión y tomografía sísmica entre sondeos.

1.1.1. Sísmica de refracción

La propagación de la energía sísmica a través de las distintas capas del terreno se describe por las mismas reglas que rigen la propagación de los rayos de luz a través de un medio transparente. La ley fundamental que describe el fenómeno de la refracción de los rayos de luz es la ley de Snell, y ésta, junto con el fenómeno de incidencia crítica, constituyen el fundamento físico de la sísmica de re-

fracción. En la **Figura 1** se muestra un esquema de los distintos elementos que constituyen el fundamento de la refracción.

La sísmica de refracción se basa en la medida de los tiempos de viaje de las ondas compresionales generadas por una fuente de energía determinada. A partir de los valores de los tiempos de llegada de las ondas P y de las distancias existentes entre los elementos que componen el dispositivo (geófonos y puntos de tiro) se obtiene la «dromocrónica» sobre la que se interpreta la estructura geológica existente bajo el perfil estudiado. Para ello, es necesario generar un tren de ondas me-

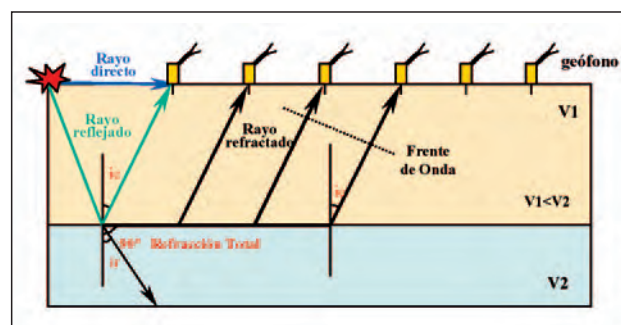


FIGURA 1. Principios de la sísmica de refracción

diente una fuente de energía, normalmente, una pequeña carga explosiva o bien, golpes mediante mazo o martillo. La energía generada es detectada, amplificada y registrada por los distintos elementos que componen el dispositivo de medida (geófonos, sismógrafo y líneas de conexión entre éstos).

En la **Figura 2** se muestra la dromocrónica correspondiente a uno de los perfiles realizados sobre la falla de Pradomonte.

A partir del estudio de la dromocrónica se definen de forma clara y precisa las velocidades de propagación de las ondas P sobre el terreno, permitiendo caracterizar los materiales en cuanto al grado de meteorización y/o alteración, además de permitir definir otros elementos de relevancia.

1.1.2. Sísmica de reflexión

Mediante ésta técnica es posible obtener información de zonas profundas mediante un equipo similar al empleado en sísmica de refracción, pero modificando el modo de adquisición. Para generar un tren de ondas de energía suficiente, se suelen emplear explosivos, aunque, mediante un sistema de toma de datos con múltiples puntos de tiro por perfil y múltiples «stacks» por cada punto de tiro, es posible obtener una sección sísmica de alta resolución mediante el empleo de mazo ó martillo.

Este sistema se ha empleado únicamente en dos zonas del trazado: Falla de La Carrascosa y Valle de la Umbría.

Como en cualquier trabajo de sísmica de reflexión, inicialmente se realizan las pruebas para seleccionar el dispositivo más idóneo para la zona en la que se realizará la toma de datos, seleccionando tanto el dispositivo físico (Puntos de tiro, distancia entre trazas, grado de cobertura, rango frecuencial de los géofonos,...) como los parámetros de adquisición (Tiempo de registro, intervalo de muestro, filtros, AGC,...). Una vez adoptado el dispositivo de medida con la configuración más idónea, comienza la fase de adquisición de datos, que consiste en realizar los puntos de tiro pertenecientes a cada situación o implante de los géofonos receptores. Este proceso se repite desde el inicio hasta el final del perfil.

Posteriormente comienza el procesamiento de los datos adquiridos, primero, con la explotación de la refracción y realizando las correcciones estáticas, y posteriormente, el procesamiento propiamente dicho de la reflexión mediante el software apropiado. Una vez obtenida la sección stack, se la aplican todos los procesos que mejoran los registros y permiten obtener la sección final, sección migrada, sobre la que se realiza la interpretación definitiva.

Sobre ésta sección migrada, y con las velocidades de capa aplicadas, se obtiene la sección en profundidad de los distintos reflectores y accidentes interpretados. Para que el paso de sección tiempo (migrada) a profundidad sea lo más correcto posible, es necesario que se conozca de la forma más precisa la velocidad de los distintos materiales sobre los que se realiza el perfil sísmico, por lo que es fundamental realizar una medida de dicho parámetro en sondeo mediante la técnica apropiada (Down-

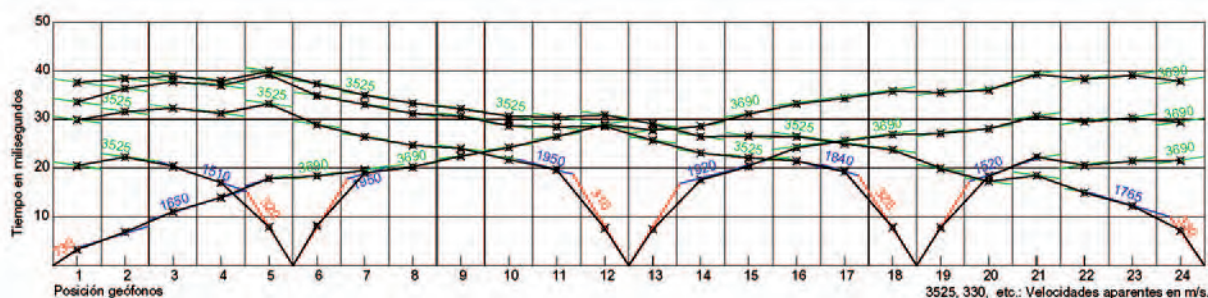


FIGURA 2. Perfil sísmico realizado en la falla de Pradomonte, desde la boca Sur.

hole, Crosshole, Sónico de Onda Completa,...). Una velocidad de capa errónea redundará en una transformación tiempo-profundidad que no se corresponde con la realidad.

La **Figura 3** se muestra el perfil longitudinal realizado en la zona de La Carrascosa.

1.1.3. Tomografía sísmica crosshole

El método de la tomografía sísmica utiliza las ondas elásticas como elemento a partir del cual es posible obtener una imagen con la distribución espacial de las velocidades sísmicas dentro de un volumen de roca, permitiendo definir contactos entre distintas litologías, elementos geológicos de distinta naturaleza (fallas, zonas de fractura, presencia de cavidades...), estado de alteración o meteorización de los materiales, etc. Resulta muy interesante, ya que, a partir de un conjunto de sondeos, con información puntual, es posible obtener un conjunto de tomogramas que definen el macizo rocoso en estudio de forma continua.

Los elementos que definen la resolución de ésta técnica geofísica son:

- La distancia entre los sondeos de emisión y recepción. Cuanto mayor sea la distancia existente entre ellos más general será la información obtenida y por tanto, menos resolutive,
- La distancia entre los geófonos o hidrófonos, y distancia entre los puntos de tiro. Evidentemente, cuanto más pequeña sea la distancia entre los receptores mejor definición tendrá el tomograma obtenido. Cuantos más puntos de tiro existan más combinaciones fuente-receptor se obtendrán y por tanto, más datos para definir una estructura determinada, y
- El posicionamiento de receptores y fuente precisos.

Una vez realizada la adquisición de datos para un dispositivo de medida determinado se realiza el procesamiento de los datos obtenidos. Así, se calculan las velocidades entre nodos de una malla definida utilizando técnicas de reconstrucción simultánea iterativa. La modificación de la velocidad inicial se produce en distintos ciclos que constan de tres estadios: cálculo del modelo de tiempos de viaje, cálculo de las residuales y finalmente aplicación de las correcciones de velocidad. En la **Figura 4** se muestra el raypath que define las distintas combinaciones fuente-receptor para éste tomograma.

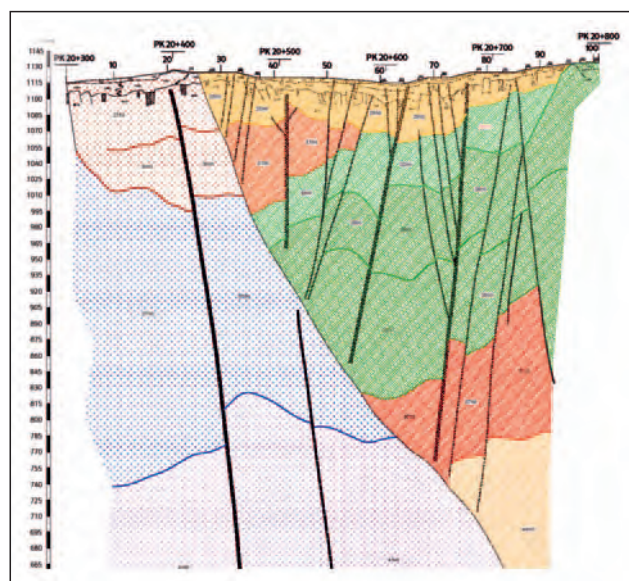


FIGURA 3. Interpretación de un perfil de sísmica de reflexión.

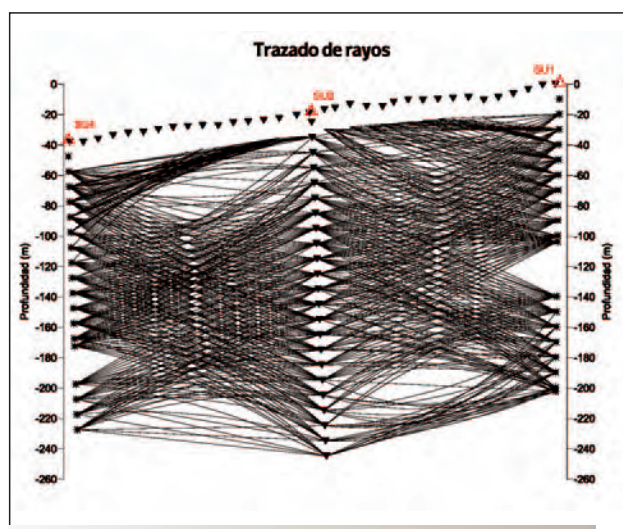


FIGURA 4. Trayectoria de rayos, en una tomografía sísmica entre sondeos, en la falla de La Umbria.

En la **Figura 5** se muestra el tomograma obtenido entre los sondeos SU-4 y SU-1.

1.1.4. Cross-Hole de ondas compresionales

Mediante las medidas entre sondeos, crosshole, se mide la velocidad de propagación de las ondas P y/o S en el macizo rocoso. Para ello, es necesario situar en uno de los sondeos la fuente de energía, que puede ser explosiva, martillo de pozo, sparker... y en el otro sondeo el elemento receptor, geófono o hidrófono.

Para que el ensayo sea efectivo y válido es necesario que ambos elementos se encuentren situados a la misma cota. Una vez emplazados, se genera el tren de ondas mediante la fuente elegida y se mide el tiempo de llegada de la onda P o S al receptor utilizado. Este proceso se repite a lo largo del sondeo o de los puntos de interés en los que se desea conocer la velocidad de propagación de las ondas en un macizo rocoso determinado.

En la **Figura 6** se muestra un ejemplo de las medidas realizadas entre los sondeos SU-4 y SU-2 en la zona del Valle de La Umbría.

1.2. Métodos eléctricos

En los túneles de Guadarrama se ha empleado únicamente la tomografía eléctrica, si bien esta se ha realizado en

perfiles superficiales, entre sondeos y entre sondeo y la superficie.

1.2.1. Tomografía eléctrica de superficie

Mediante la tomografía eléctrica se realizan medidas puntuales de resistividad a distintas profundidades y a lo largo de un perfil de longitud determinada obteniendo una pseudosección de resistividades aparentes que constituirá el punto de partida del proceso de inversión. Para ello, se utiliza un equipo multielectrodo capaz de realizar miles de puntos de medida en un corto periodo de tiempo, permitiendo obtener información del área en estudio rápidamente. En la **Fotografía 1** se muestra uno de los equipos utilizados durante el proceso de toma de datos.

La interpretación consiste en la resolución del problema inverso, es decir, calcular una distribución de resistividades reales a partir de la sección de resistividades aparentes medidas en campo. Para ello el programa informático utilizado sigue un proceso iterativo partiendo de una hipótesis de modelo inicial y calculando la sección de resistividades aparentes que pro-

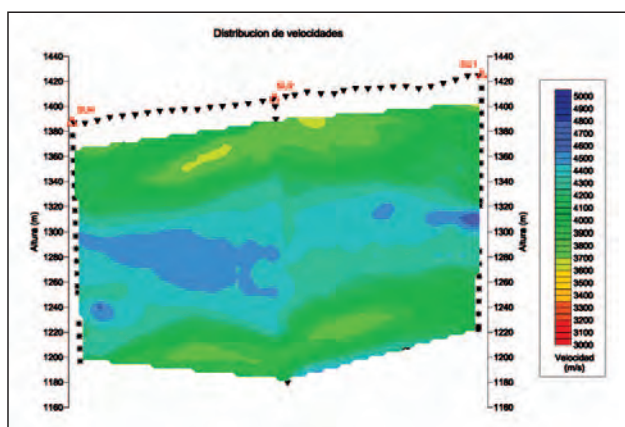


FIGURA 5. Tomograma obtenido entre sondeos en la Falla de La Umbría

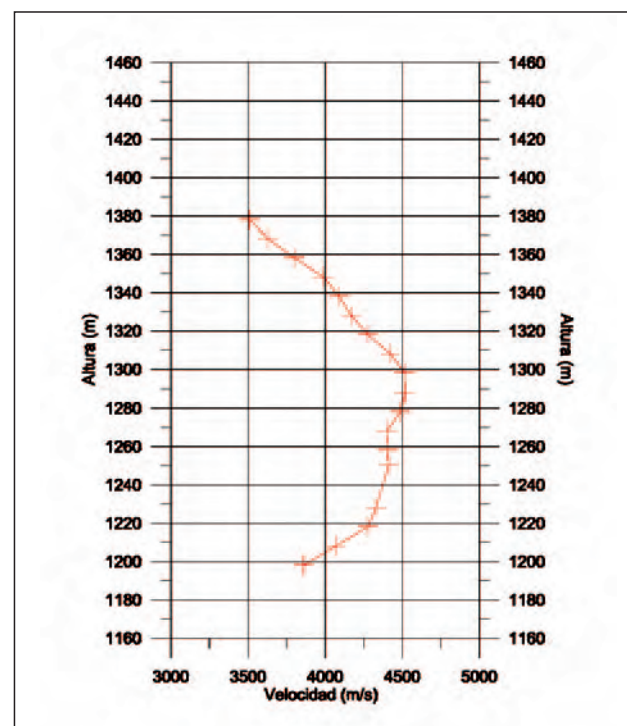


FIGURA 6. Crosshole de ondas V_p entre los sondeos SU-4 y SU-2 en la Falla de La Umbría.

duciría este modelo. El cálculo se realiza mediante algoritmos de diferencias finitas ó elementos finitos, donde, y esta es la característica fundamental de la inversión tomográfica, la variación del valor de cada celda o bloque en el que se ha dividido la pseudosección, está limitado por los valores de resistividad que presentan los bloques adyacentes. Es decir, durante el proceso de inversión no solo se tiene en cuenta el valor de resistividad del punto donde se realiza el cálculo, sino también los valores de resistividad de los bloques próximos a éste.

Al final de una iteración se obtiene un modelo de resistividad y la pseudosección de resistividades aparentes que produciría ese modelo. En función del error entre la sección de resis-

tividad aparente medida y la calculada se modifican los valores de resistividad asociados a los bloques, creando un nuevo modelo. Este proceso se repite iterativamente hasta que se obtiene una sección de resistividades que se ajusta a la estructura geológica de la zona estudiada. A partir de los valores de resistividad obtenidos y estudiando la distribución de zonas que aparecen es posible realizar una atribución geológica, definiendo planos de falla, zonas de fractura, presencia de diques, estado de alteración o meteorización del macizo rocoso, etc. En la **Figura 7** se muestra el perfil correspondiente al Tubo 3 a su paso por el Arroyo Valparaíso.

1.2.2. Tomografía eléctrica sondeo-superficie

En éste tipo de dispositivo los electrodos se sitúan en el sondeo y en superficie. Se crea una secuencia de medida dipolo-dipolo, que es la que mayor resolución ofrece, aunque, es más susceptible a los ruidos eléctricos que puedan existir en la zona como tomas de tierra, corrientes vagabundas. Para ésta secuencia, se emplean todos los electrodos disponibles, generando un número muy elevado de combinaciones emisor-receptor. Para cada cuadripolo de medida se realiza una lectura de voltaje e intensidad, a partir de la cual se obtiene la resistencia. Posteriormente se realiza el procesamiento de los datos obtenidos de forma similar al pro-



FOTOGRAFÍA 1. Momento de ejecución de un perfil de tomografía eléctrica en la boca Norte.

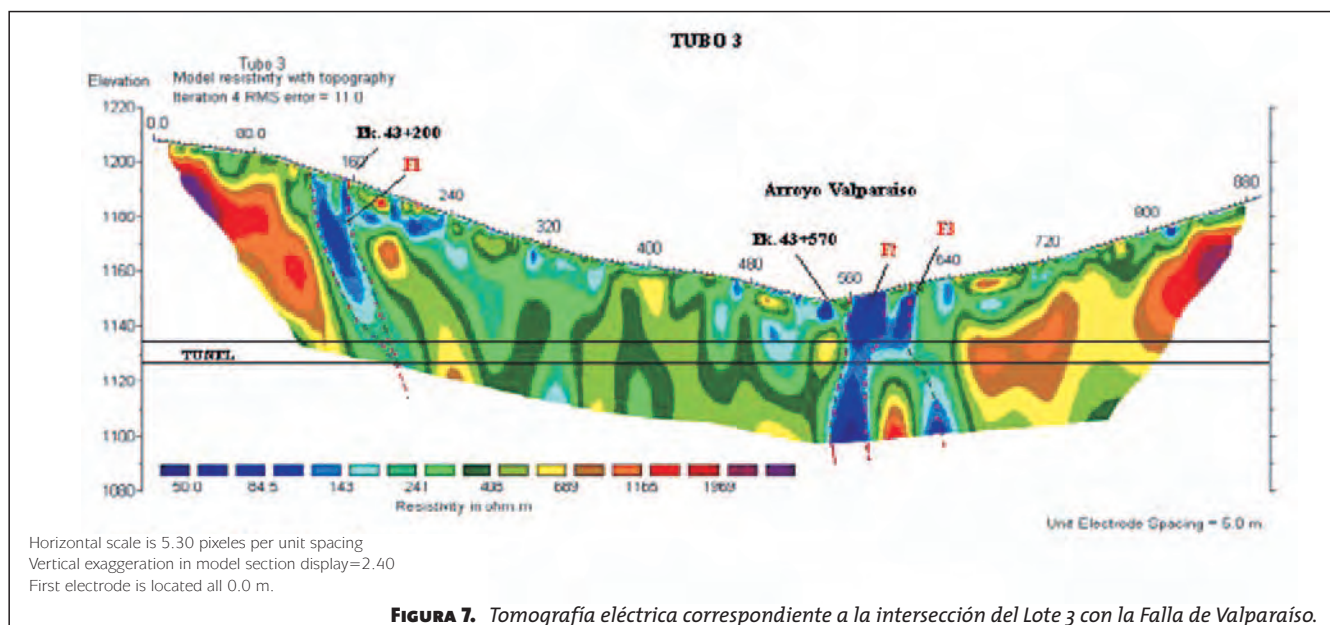


FIGURA 7. Tomografía eléctrica correspondiente a la intersección del Lote 3 con la Falla de Valparaíso.

cesado de datos de superficie, generando finalmente una sección que muestra la distribución de resistividades existente en el volumen rocoso delimitado por la situación a la que llegan los electrodos de superficie y los del sondeo.

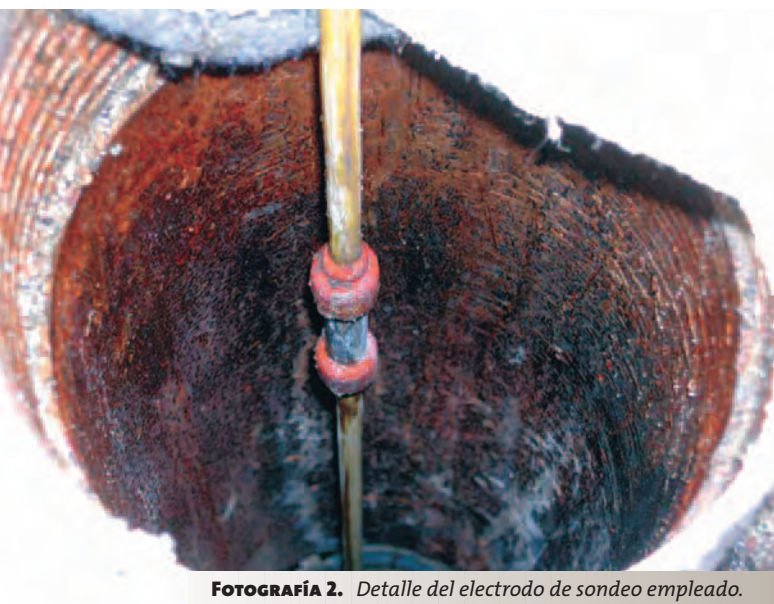
Un elemento fundamental al realizar dispositivos de éste tipo es que el sondeo tenga agua, bien gracias a que el nivel freático está situado cerca de la superficie, o bien, rellenándolo de forma artificial, ya que el fluido constituye el elemento a través del cual se transmite el campo eléctrico generado por los electrodos de corriente, o bien, permite la lectura entre los electrodos de potencial. En la **Fotografía 2** se muestra una imagen del tipo de electrodo utilizado mediante ésta técnica.

Los electrodos se disponen a partir de la zona entubada del sondeo, ya que la presencia de la tubería genera lecturas erróneas que afectan a la sección final procesada. Por ello, dependiendo de la situación de cada sondeo, se realiza una configuración determinada definiendo el número de electrodos activos y cotas a las que se sitúan. En la **Figura 8** siguiente se muestra una imagen de la sección obtenida tras procesar los datos correspondientes al sondeo SU-1 y la línea de superficie en dirección SU-6.

1.2.3. Tomografía eléctrica crosshole

Mediante la tomografía crosshole, se obtienen datos acerca de la distribución de las resistividades existentes

entre un volumen de roca delimitado por la situación de dos sondeos. Para que el sistema sea operativo se deben cumplir las condiciones explicadas en el punto anterior en cuanto a las características que debe presentar el sondeo. La secuencia creada para realizar el tomograma utiliza todas las combinaciones posibles entre emisores-receptores, generando un número de combi-



FOTOGRAFÍA 2. Detalle del electrodo de sondeo empleado.

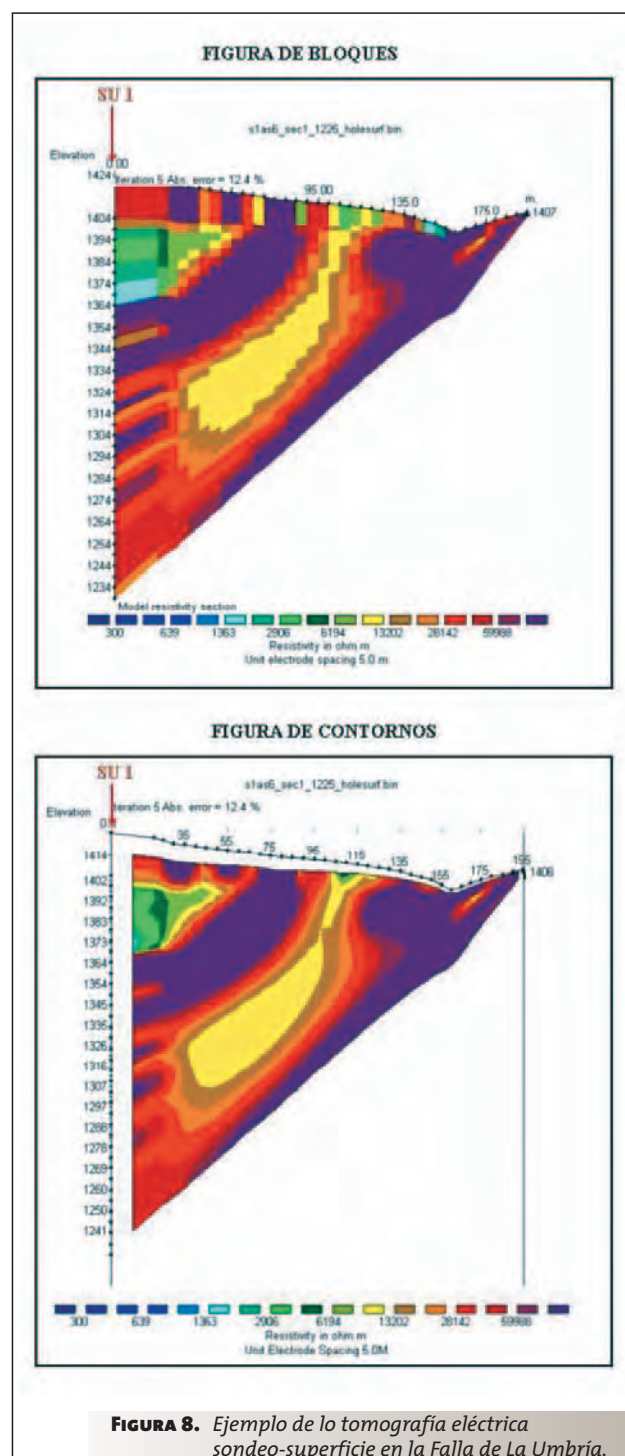


FIGURA 8. Ejemplo de lo tomografía eléctrica sondeo-superficie en la Falla de La Umbria.

naciones de 896 y 1119 puntos de medida entre los sondeos SU-6 y SU-2, y SU-2 y SU-5. Mediante un software adecuado se realiza el proceso de inversión, generando una sección con la distribución de resistividades en el macizo rocoso comprendido entre los sondeos en estudio. A partir de los datos geológicos aportados por los sondeos se realiza la atribución geológica, definiendo zonas de fractura, cambios en la calidad del macizo rocoso, cambios litológicos, etc. En la **Figura 9** se muestran los tomogramas obtenidos entre los sondeos SU-6, SU-2 y SU-5.

1.2.4. Interpretación 3D de la tomografía eléctrica

En la zona de La Umbría, donde se han realizado cuatro perfiles tomográficos longitudinales, cinco tomografías entre sondeos, seis tomografías sondeo-superficie; se ha realizado una compleja interpretación tomográfica en tres dimensiones de la Falla de La Umbría.

En la **Figura 10** se muestra un corte tridimensional por el Lote 3, de esta interpretación, donde se aprecian las dos anomalías de baja resistividad principales existentes.

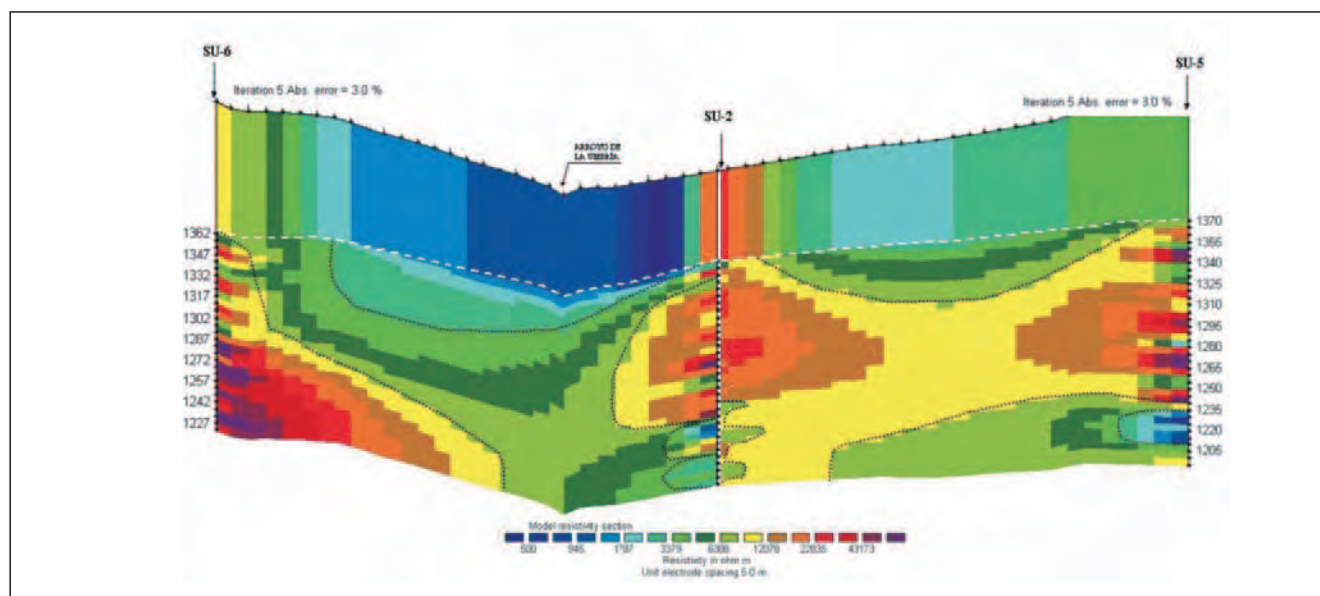


FIGURA 9. Tomografía eléctrica realizada entre los sondeos SU-6 y SU-5 en la Falla de La Umbría.

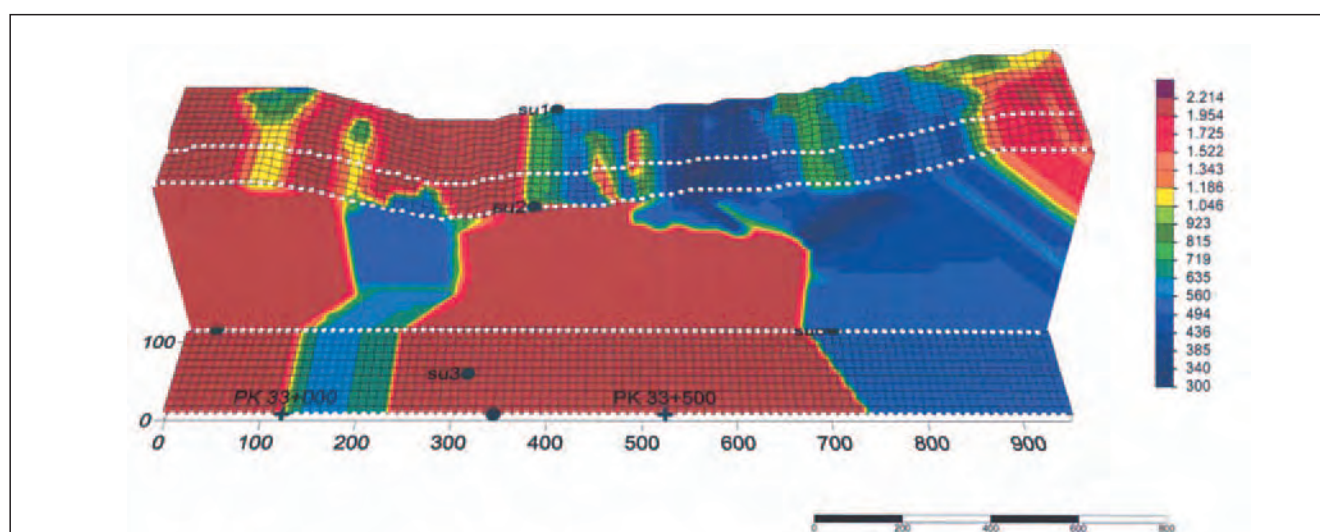


FIGURA 10. Interpretación tridimensional de resistividades en la zona de La Umbría. El bloque diagrama muestra, en primer término el Lote 4.

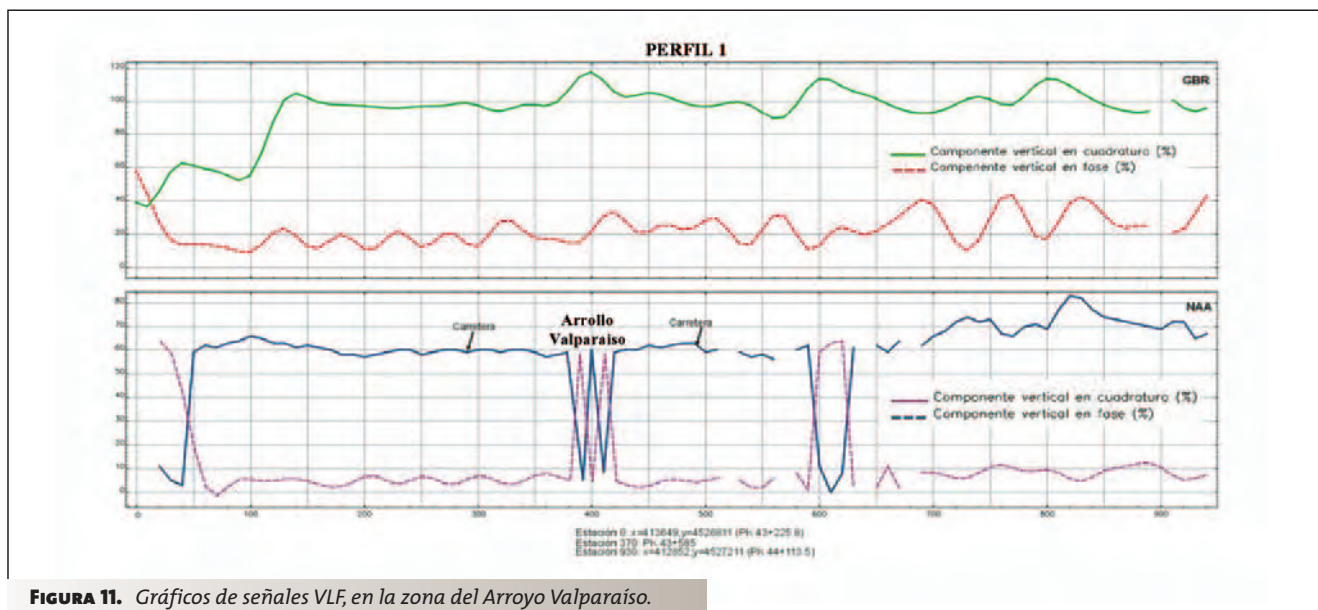


FIGURA 11. Gráficos de señales VLF, en la zona del Arroyo Valparaíso.

1.2.5. VLF (very low frequency)

Mediante éste método se miden las modificaciones de amplitud e inclinación que sufren las componentes en fase y en cuadratura de una señal electromagnética de muy baja frecuencia cuando en su transmisión por el terreno atraviesan elementos conductores, como son las zonas de falla. Esta señal es capaz de transmitirse a miles de kilómetros a lo largo de la corteza terrestre. Existe una red de emisoras distribuidas por todo el mundo y su señal, seleccionando la emisora más adecuada para cada zona de trabajo y para cada objetivo, se registra con los equipos geofísicos pertinentes.

Con objeto de obtener la mayor información posible se han utilizado de forma simultánea la señal de dos antenas emisoras desfasadas 90° respecto al área estudiada: ME (USA) y GBR(UK). Se realizaron medidas de la componente en fase y componente en cuadratura. En la **Figura 11** se muestra la anomalía registrada por efecto de la falla del arrollo Valparaíso.

1.3. Testificación geofísica en sondeos (Diagrafías)

Una de las técnicas geofísicas de gran utilidad para medir determinadas propiedades físicas de las formaciones geológicas atravesadas por sondeos es la testificación geofísica.

La principal diferencia respecto a las técnicas empleadas en superficie radica en que, en este caso receptor y emisor (a veces sólo receptor) se sitúan en una sonda que, mediante un cable de acero es desplazada, en general en sentido ascendente, a lo largo de un sondeo previamente perforado. Como resultado se obtiene lo que se denomina «log» o «diagrafía».

Las propiedades físicas medidas en sondeo son prácticamente las mismas que las utilizadas en superficie, como el potencial espontáneo, resistividad eléctrica, radiactividad natural, velocidad de las ondas mecánicas, densidad, susceptibilidad magnética, etc.

Dependiendo de la litología existente en la zona de estudio es posible emplear una sonda que defina claramente alternancias litológicas, presencia de niveles guía, variaciones en la calidad de la roca, aportes de agua, zonas de fractura, datos estructurales, hidrogeología, etc., obteniéndose una idea clara y precisa de la estructura geológica existente en el área de estudio y en muchos casos de los parámetros geotécnicos del terreno.

Existen multitud de sondas diferentes dependiendo del fabricante y del principio físico en el que se basan las medidas realizadas. La descripción particularizada de cada una de ellas desborda claramente el alcance de este documento.

En los túneles de Guadarrama esta técnica se ha empleado allí donde se han perforado sondeos adicionales de re-



FOTOGRAFÍA 3. Sonda 2SAA1000.

conocimiento y esto ha sucedido, básicamente en la zona de La Angostura y en la Falla de la Umbría.

En el **Cuadro I** se muestra las distintas herramientas con las que se ha realizado la testificación de los sondeos perforados, que se han realizado con dos equipos diferentes.

Analizando los datos aportados por cada una de ellas es posible conocer y definir de forma clara y precisa la situación del macizo rocoso, estado de alteración, presencia de-

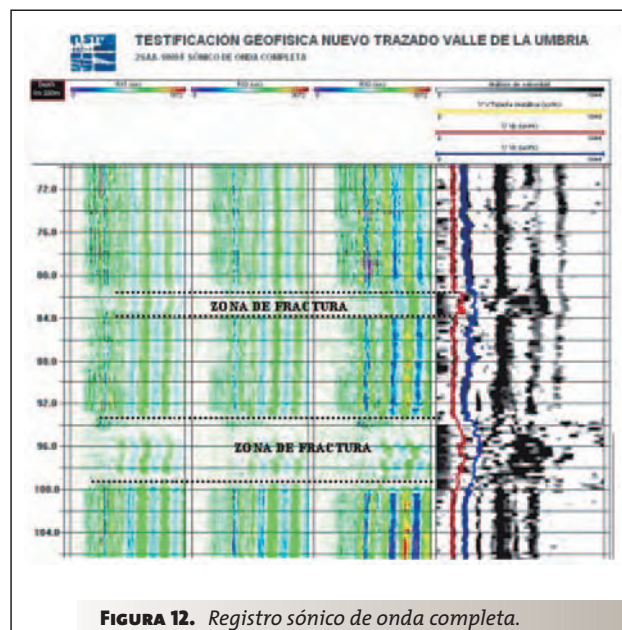


FIGURA 12. Registro sínico de onda completa.

fallas, propiedades eléctricas, módulos de deformación de gneises y granitos, información estructural, flujo de agua en los sondeos, todo ello, junto con los datos geofísicos, testificación geológica y la cartografía geológica, permite definir la estructura y el modelo geológico de la zona estudiada.

● Sónico de onda completa

En la **Figura 12** se muestra la imagen obtenida tras el procesamiento del registro sínico de onda completa en uno de los sondeos realizados, mientras que en la **Fotografía 3** se muestra la sonda utilizada para la obtención de ese registro.

Cuadro I. Herramienta de testificación empleadas en los sondeos de la Falla de La Umbría

Equipo de testificación	Sondas de registro
SCHLUMBERGER	HALS-PEX-Laterolog-Plataform Express Logs HNGS-Espectrometría Gamma Nuclear FMI-Fullbore Fm. Microimager DSI-Dipolo Shear Imager GR-Gamma Ray
MOUNT SOPRIS	Caliper Acoustic Televiwer Sónico de Onda Completa Temperatura Gamma natural Conductividad de fluido Resistencia puntual Potencial espontáneo

Mediante esta diagráfia, además de poder realizar una interpretación cualitativa de las zonas de falla y/o fractura; es posible estimar, a través de la medición de las velocidades V_p y V_s , los módulos dinámicos de deformación del macizo rocoso.

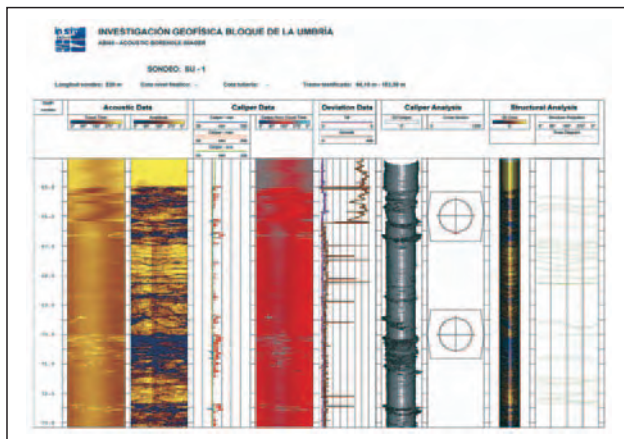


FIGURA 13. Registro realizado con el Televiwer en el Sondeo SU-1, de la falla de La Umría.

● Acoustic Televiwer

El acoustic Televiwer genera una imagen de las paredes del sondeo registrando la amplitud y el tiempo de viaje de las ondas acústicas reflejadas en la interfaz fluido de perforación y paredes de sondeo. La calidad de las imágenes registradas depende del contraste de las impedancias características del fluido en el sondeo y el terreno atravesado en la perforación. Las imágenes obtenidas se orientan mediante magnetómetros y acelerómetros, referenciándolas habitualmente respecto al Norte magnético. A partir de los datos obtenidos y tras un proceso de análisis de datos, definiendo las familias de juntas y fracturas que aparecen en el log, junto con los datos de desviación del sondeo y orientación aportan los datos necesarios para conocer el estado tensional del macizo rocoso. En la **Figura 13** se muestra una imagen del registro correspondiente al sondeo SU-1.

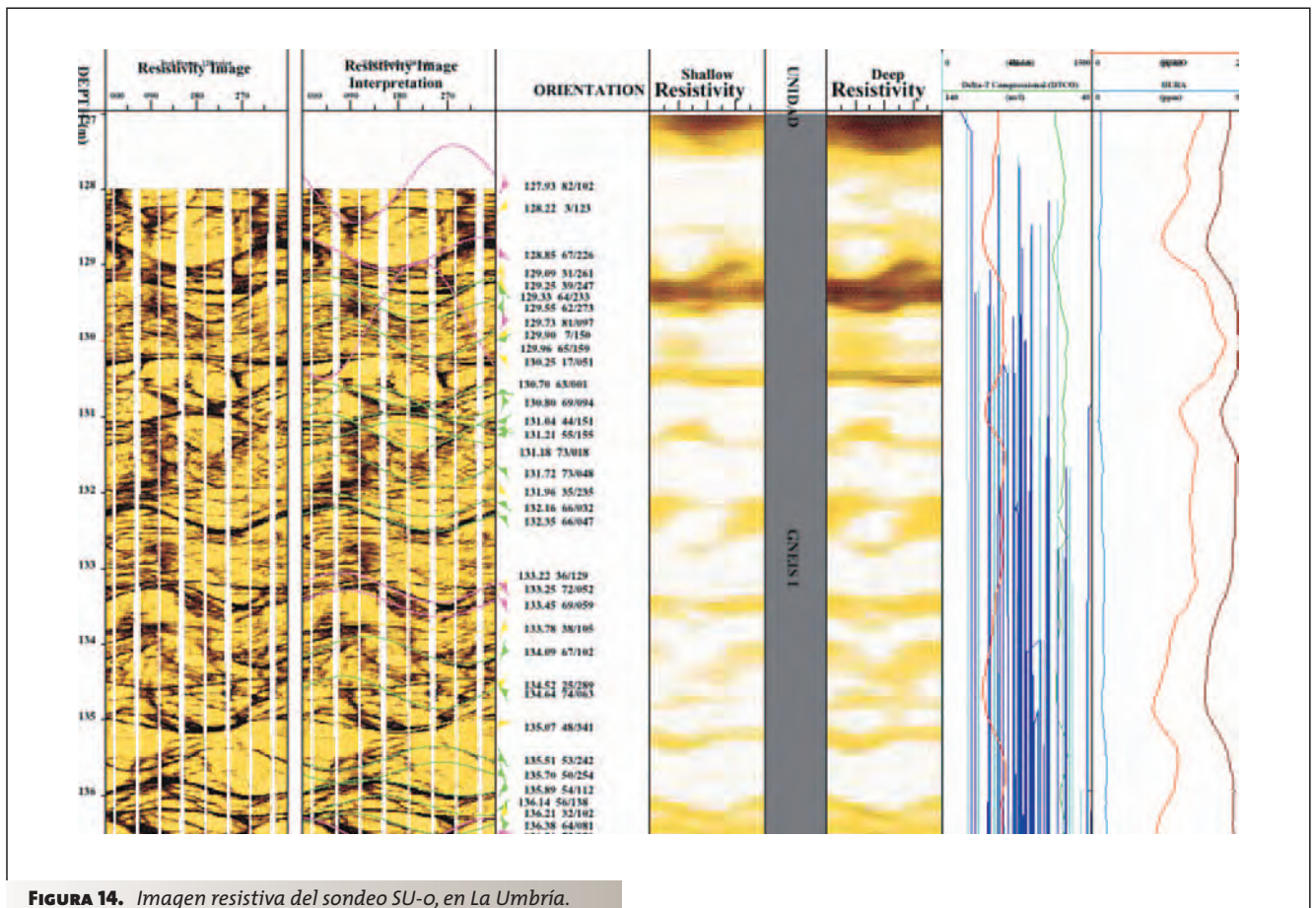


FIGURA 14. Imagen resistiva del sondeo SU-0, en La Umría.

● Fullbore Formation microimager / High Resolution Azimuthal laterolog

Mediante las sondas FMI y HALS-HNGS creadas por Schlumberger, se obtienen imágenes orientadas de micro-resistividad de las paredes del sondeo y resistividad-conductividad somera y profunda respectivamente, a partir de las cuales es posible realizar un análisis estructural del macizo rocoso, conociendo las distintas familias de fracturas (dirección y buzamiento), grado de fracturación, ROD, etc lo que permite caracterizar los distintos materiales que aparecen en la zona. Los datos obtenidos son muy similares a los que se consiguen mediante la sonda acoustic televiewer.

En la **Figura 14** se muestra una imagen de los datos obtenidos en el sondeo SU-0 situado en el Valle de La Umbría.

● Otras diagráfias

Otras sondas utilizadas que han permitido completar la información referente al estado del macizo rocoso comprendido entre los sondeos utilizados han sido el Cáliper, Gamma natural, Potencial espontaneo, Resistencia puntual, Conductividad y temperatura del fluido, Flowmeter, etc.



2. Ensayos in situ

Los principales ensayos in situ realizados han sido los ensayos de hidrofracturación, para determinar el estado tensional natural; y los ensayos presio-dilatométricos, para evaluar la deformabilidad del terreno.

2.1. Ensayos de hidrofracturación

El objetivo de la fracturación hidráulica es medir el estado de tensiones «in situ» en el interior de un sondeo, proporcionando las magnitudes y las direcciones de las tensiones máximas y mínimas existentes.

El ensayo consiste en inyectar un fluido a presión en un tramo de sondeo previamente aislado por un doble obturador especial hasta conseguir inducir una fractura o estimular una preexistente en la roca. Se mide la presión de fluido necesaria para generar, mantener y reabrir la fractura, mediante ciclos posteriores de presurización, a caudales variables, reabriéndose las fracturas producidas.

En la **Fotografía 4** se muestra el equipo de hidrofracturación, mientras que en la **Figura 15** se muestra un esquema simplificado del equipo empleado.



FOTOGRAFÍA 4. Emplazamiento de sondeo ST-21 realizado en Guadarrama.

La **Figura 16**, muestra la evolución del ensayo en tres ciclos donde se distinguen las siguientes partes:

- P_i : Corresponde a la presión de pico más alta donde se produce la apertura de una fractura.
- P_s : Presión de cierre.
- P_r : Presión de reapertura.

Para la interpretación del ensayo se realizan las siguientes simplificaciones:

- Que la tensión vertical es igual a la carga litostática ($\rho \cdot g \cdot z$).

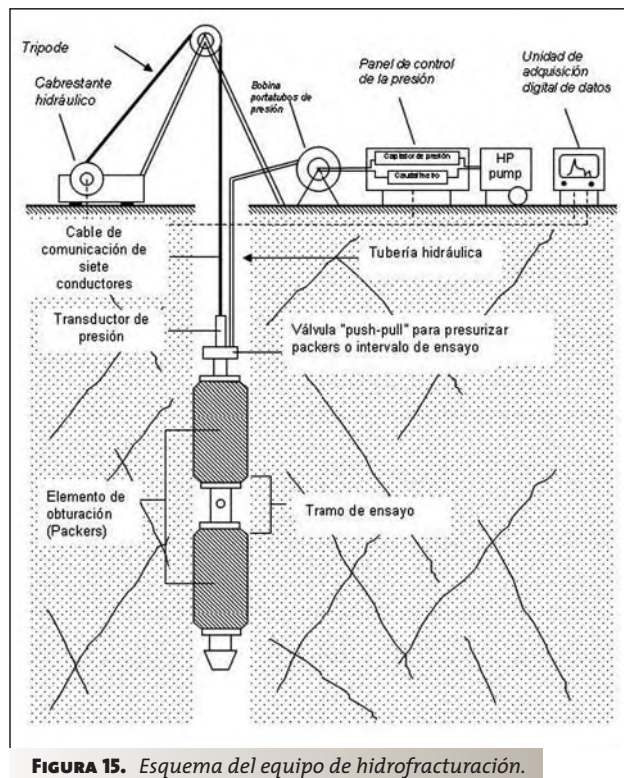


FIGURA 15. Esquema del equipo de hidrofracturación.

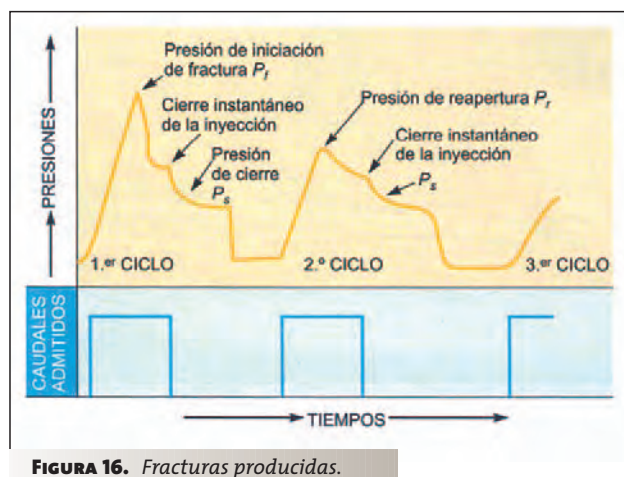


FIGURA 16. Fracturas producidas.

- Que la roca es homogénea, isótropa e inicialmente impermeable.
- Que las fracturas generadas tienen orientación perpendicular a la tensión principal horizontal menor, σ_h .

En este caso la presión de cierre es la presión hasta la cual la fractura se mantiene abierta una vez que se deja de aplicar presión al fluido. Al emplear la aproximación lineal anterior, las tensiones existentes en el terreno pueden expresarse mediante las relaciones:

- $\sigma_h = P_s$
- $\sigma_H = 3 P_s - P_r - u$
- $\sigma_v = \rho \cdot g \cdot z$
- $P_r = P_c - P_{co}$

En ensayos realizados a diferentes profundidades se obtiene un perfil de tensiones que refleja la sollicitación tensional existente en el macizo rocoso. En la **Figura 17** se muestra el perfil de tensiones del sondeo ST-21, donde se aprecia el elevado estado tensional existente en el terreno con tensiones horizontales muy superiores a las verticales.

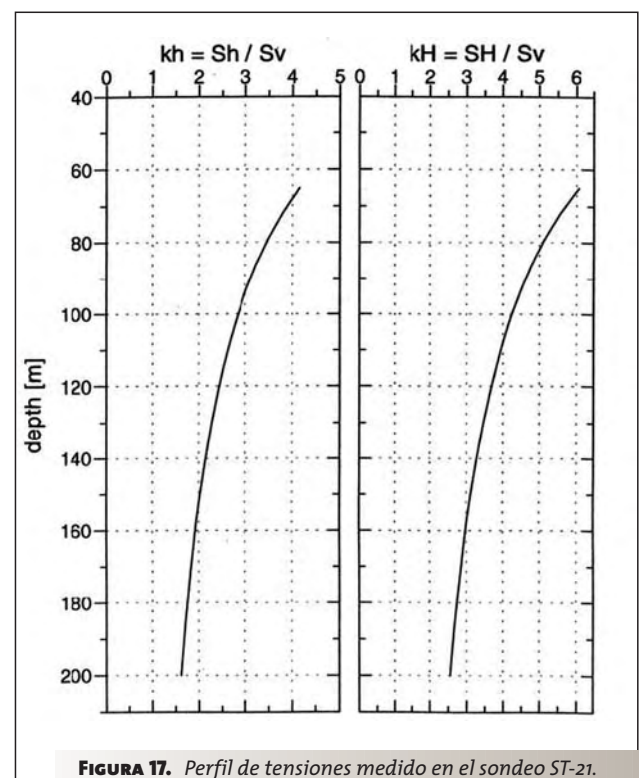


FIGURA 17. Perfil de tensiones medido en el sondeo ST-21.

2.2. Ensayos presio-dilatométricos

El objetivo básico de un ensayo presio-dilatométrico es obtener una respuesta esfuerzo-deformación del terreno «in situ», de modo que podamos calcular el módulo de deformación del terreno.

Un macizo rocoso es un medio inhomogéneo y sobre todo discontinuo, cuyas propiedades resistentes y deformacionales medidas directamente en laboratorio difieren notablemente de las obtenidas mediante ensayos «in situ». Esta diferencia depende fundamentalmente del efecto escala y las condiciones de contorno.

Este ensayo consiste en aplicar presiones crecientes al terreno a través de una camisa elástica alojada en el interior del sondeo, obteniéndose a tiempo real, la curva desplazamiento-carga.

Como resultado se obtiene una curva desplazamiento-carga como la que se muestra en la **Figura 18**, obtenida de un ensayo dilatométrico efectuado para el túnel de Guadarrama, en las que se puede distinguir las siguientes partes:

- Adaptación de la camisa al sondeo
- Deformación elástica
- Dos ciclos de descarga y carga
- Deformación Plástica

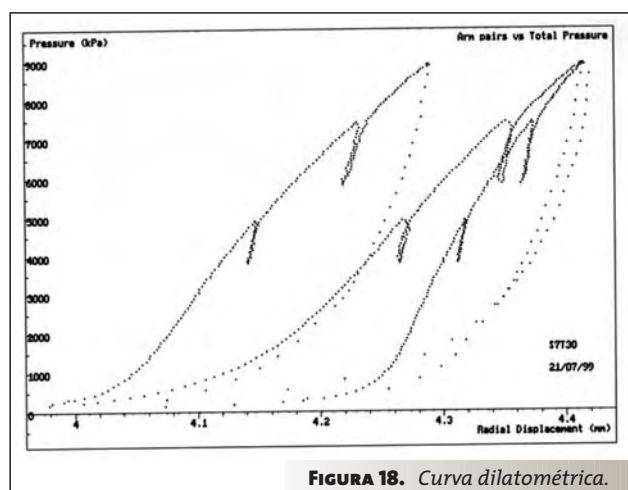


FIGURA 18. Curva dilatométrica.

En la **Figura 19** se muestra un ejemplo de un análisis anisotrópico del terreno donde se observan claramente las deformaciones máximas en la dirección de los brazos 2&5.

En condiciones de elasticidad las variaciones de radio de la cavidad cilíndrica al incrementar la presión están dadas por la expresión:

$$\Delta r = \frac{1 + \nu}{E_d} \cdot \Delta P \cdot r$$

Siendo ν el coeficiente de Poisson y E_d el módulo de deformación dilatométrico del terreno. Obteniéndose como resultado la Expresión básica de la elasticidad.

2.3. Otros ensayos in situ

Otros ensayos realizados en los sondeos perforados han sido de tipo permeabilidad, realizándose sistemáticamente, ensayos Lugeon y en la zona de La Umbría, ensayos de inyección a sondeo único (pulse, slugs, ...), en tramos aislados mediante obturadores, y ensayos de bombeo a caudal constante.

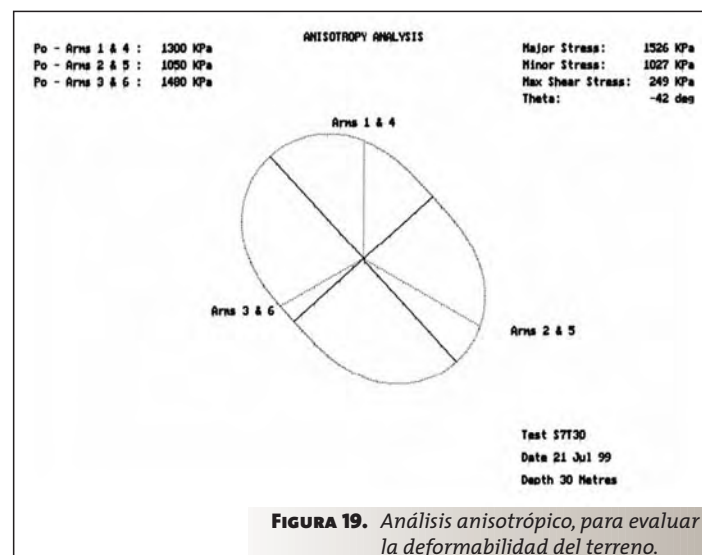


FIGURA 19. Análisis anisotrópico, para evaluar la deformabilidad del terreno.

3. Trabajos realizados

Los trabajos realizados han sido encargados por las empresas constructoras, coordinados por el GIF, a través de INECO, de forma independiente en la boca Sur y en la boca Norte.

Además para el tema específico de La Umbría se creó un grupo de trabajo en el que participaron todas las empresas involucradas.

3.1. Boca Sur

Los trabajos geofísicos realizados desde la boca Sur que comprenden desde este emboquille hasta la zona de La Angostura fueron realizados directamente por la empresa Orellana Consultores S.A. (OCSA), empresa de prospección

geofísica, que realizó básicamente trabajos de sísmica de refracción y reflexión, tomografía eléctrica de superficie, VLF y de testificación geofísica en el sondeo BS-9.

En el **Cuadro II** se muestra, ordenada para cada accidente geológico (Pradomontero, Ensanche, La Carrascosa y La Angostura) los trabajos realizados.

Las cifras totales son las siguientes:

- Sísmica de refracción : 4 perfiles, 480 m
- Sísmica de reflexión: 1 perfil, 500 m
- Tomografía eléctrica: 12 perfiles, 7170 m
- VLF: 2 perfiles, 1400 m
- Testificación geofísica: BS-9

Cuadro II. Trabajos realizados desde la boca Sur

Trabajos Realizados Falla de Pradomontero	N.º de unidades
Sísmica de refracción	240 m (2 perfiles)
Tomografía eléctrica	240 m (2 perfiles)
Estudio mediante VLF	550 m
Trabajos Realizados Falla del Ensanche	N.º de unidades
Sísmica de refracción	240 m (2 perfiles)
Tomografía eléctrica	240 m (2 perfiles)
Estudio mediante VLF	500 m
Trabajos Realizados Falla de La Carrascosa	N.º de unidades
Sísmica de reflexión	500 m (1 perfil)
Tomografía eléctrica	1.570 m (2 perfiles)
Estudio mediante VLF	900 m (1 perfil)
Trabajos Realizados Falla de La Angostura	N.º de unidades
Tomografía eléctrica	5.120 m (6 perfiles)
	Sónico de Onda Completa
T. geofísica en el sondeo BS-9	Gamma Ray
	Registro de temperatura

3.2. Boca Norte

Los trabajos geofísicos realizados desde la boca Norte, que comprenden desde el emboquille hasta Peñalara, fueron encomendados a la empresa In Situ Testing S.L. (IN SITU), empresa de prospección geotécnica y geofísica, que realizó trabajos de sísmica de refracción, tomografía eléctrica de superficie y VLF.

En el **Cuadro III** se muestran, considerada para cada accidente geológico (emboquille, Valparaíso, Dique de cuarzo – vía Eresma y Salto del Corzo), los trabajos realizados.

Las cifras totales son las siguientes:

- Sísmica de refracción: 9 perfiles, 495 ml
- Tomografía eléctrica: 19 perfiles, 11.980 ml
- VLF: 2 perfiles, 2.460 ml

3.3. Falla de la Umbría

Los trabajos geofísicos y ensayos in situ realizados para el reconocimiento de la Falla de La Umbría, fueron realizados tras la ejecución de las cartografías geológicas a escala 1/5000 y 1/2000.

Para ello se creó un grupo multidisciplinar de trabajo que tuvo como objetivo la elaboración del modelo geológico y geomecánico más plausible de la zona comprendida entre Cabezo Mediano y la falda sur del macizo de Peñalara.

En la ejecución de los trabajos de geofísica y ensayos in situ que se realizaron en la Falla de La Umbría, participaron las empresas CGG, CGS, IN SITU, OCSA y SCHLUMBERGER; aplicando la totalidad de los métodos geofísicos descritos en el apartado 1.

Estos trabajos se realizaron en dos fases. En una primera fase, hasta marzo de 2003, se realizaron:

- 4.600 m de tomografía eléctrica de superficie.
- 5 uds tomogramas eléctricos sondeo-sondeo.
- 6 uds tomogramas eléctricos sondeo-superficie.
- 9 uds tomogramas sísmicos sondeo-sondeo.
- 5.790 ml diagrfías geofísicas en 9 sondeos (1.404 ml sísmico, 1.141 ml. temperatura y conductividad, 125 ml flowmeter, 1.139 ml GR, 201 ml SP, 851 ml acoustic televiwer, 929 ml orientación-desviación).
- 5 uds ensayos presio-dilatométricos

Cuadro III. Trabajos realizados desde la boca Norte

Trabajos Realizados Emboquille	N.º de unidades
Tomografía eléctrica	2120 m (4 perfiles)
VLF	810 m (1 perfil)
Trabajos Realizados Falla de Valparaíso	N.º de unidades
Sísmica de refracción	275 m (5 perfiles)
Tomografía eléctrica	2.515 m (6 perfiles)
VLF	1.650 m (1 perfil)
Trabajos Realizados Dique de cuarzo-Río Eresma	N.º de unidades
Sísmica de refracción	220 m (4 perfil)
Tomografía eléctrica	5.365 m (9 perfiles)
Trabajos Realizados Salto del Corzo	N.º de unidades
Tomografía eléctrica	1.980 m (2 perfiles)

En una segunda fase, tras la modificación del trazado en septiembre de 2004, se realizaron los siguientes trabajos adicionales:

- 1.120 ml de tomografía eléctrica de superficie.
- 2.026 ml de sísmica de reflexión.
- 9 tomogramas sísmicos sondeo-sondeo.
- 5.229,56 ml diagrfías geofísicas (237 ml de diagrfías Schlumberger, 960,69 ml sónico, 1.006,35 ml tempera-

tura y conductividad, 1.111,14 ml GR, 824,73 ml SP y 820 ml flowmeter).

- 20 ud de ensayos presiodilatométricos (en los sondeos SU-7, SU-8, SU-9 y SU-10).

En los **Cuadros IV y V** se detallan los trabajos realizados para el reconocimiento de la Falla de Umbría.

Cuadro IV. Trabajos geofísicos realizados en el Valle de la Umbría

Trabajos Realizados Falla de la Umbría 1.ª fase	N.º de unidades/metros	Observaciones
Tomografía eléctrica	4 perf. / 4600 m	2 perfiles sobre trazado túneles; 2 perfiles separados 50 y 100 m del tubo 1-3 y 2-4, respectivamente
Técnica Geofísica aplicadas en sondeos mecánicos 9 / 5790 ml		Sónico de Onda Completa: Acoustic Televiwer: Registro de Temperatura y Conductividad; Gamma Natural; Resistividad Puntual (SPR); Potencial Espontáneo (SP); Registro Caliper
Tomografía eléctricas inducidas entre dos sondeos y sondeo-superficie	11 paneles	SU1-SU2 (Tomograma 1); SU1-SU5 (T2); SU2-SU3 (T3) y SU2-SU5 (T4) y entre sondeo-superficie
Tomografía Sísmica	9 paneles	SU1: -SU2; -SU-5; -SU-6. SU4: -SU2; -SU5; -SU6. SU5: -SU2; -SU6. SU6: -SU2

Cuadro V. Trabajos geofísicos realizados en el Valle de la Umbría (2.ª fase)

Trabajos Realizados Falla de la Umbría 1.ª fase	N.º de unidades/metros	Observaciones
Sísmica de reflexión	2 perf./2026 m	1 perfil sobre eje de trazado antiguo 1 perfil sobre eje trazado nuevo
Tomografía eléctrica	1 perf. / 1.120 m	perfil sobre eje trazado nuevo
Técnica Geofísica aplicadas en sondeos mecánicos	6 / 1361 ml	Sónico de Onda Completa: Flowmeter Registro de Temperatura y Conductividad; Gamma Natural; Resistividad Puntual; Potencial Espontáneo (SP)
Tomografía sísmica sondeosondeo	9 paneles	SU10: -SU2; -SU7; -SU9; SU2: -SU9; -SU8; -SU7; -SU10; SU8: -SU7; -SU2; SU7
Testificación geofísica sondeo SU-0	5/237	Sondeo de investigación geotécnica; Registro de parámetros de máquina; Testificación mediante sondas; Schlumberger: HALS-PEX; HNGS; FMI; DSI y GR



4. Conclusiones

Los trabajos de geofísica y ensayos in situ realizados han contribuido eficazmente a definir los modelos geológico y geotécnico de los túneles de Guadarrama.

Ello ha permitido predecir con la suficiente antelación los problemas derivados de la dificultad constructiva de los terrenos a excavar por las cuatro tuneladoras.

El esfuerzo realizado se concreta en:

- 3.501 ml de perfiles sísmicos.
- 24.870 ml de tomografía eléctrica de superficie.
- 3.860 ml de VLF.
- 11.019 ml de diagrfías geofísicas.
- 18 tomogramas sísmicos sondeo-sondeo.
- 5 tomogramas eléctricos sondeo-sondeo.
- 6 tomogramas eléctricos sondeo-superficie.
- 25 ensayos presio-dilatométricos.

La tomografía eléctrica de superficie ha mostrado ser una herramienta muy eficaz en medios cristalinos, neises y gra-

nitos, para la detección de zonas de falla y/o fractura; habiéndose empleado con éxito, a pesar de su limitada penetración, hasta los 250 m de recubrimiento.

Para recubrimientos superiores, macizos de Najarra y Peñalara, no se ha empleado ningún método geofísico pues las pruebas realizadas, con estos y otros métodos, no aportaron definición suficiente.

En el Valle de La Umbría las tomografías eléctrica y sísmica realizadas entre sondeos, han contribuido de forma decisiva a la definición del modelo geológico que es de gran complejidad.

Las diagrfías geofísicas realizadas en sondeo y los ensayos presio-dilatométricos han permitido, junto con los ensayos de laboratorio y la propia testificación geotécnica de los sondeos, a la elaboración del modelo geotécnico de la Falla de La Umbría. ■