

En zonas de apoyo de estructuras de las obras públicas

El método de la Tomografía sísmica *cross-hole* para el estudio detallado del subsuelo

Ángel GRANDA SANZ y José Carlos CAMBERO CALZADA. Ingenieros de Minas. IGT, S.L.

Palabras clave: HUECO, INVERSIÓN, KARSTIFICACIÓN, SPARKER, TOMOGRAFÍA, TOMOGRAMA, ZONAS DE APOYO DE ESTRUCTURAS.

El presente artículo reivindica el protagonismo del método geofísico de la Tomografía sísmica *cross-hole* para el estudio detallado del subsuelo con el objetivo de detectar accidentes tales como huecos o fallas en puntos concretos especialmente relevantes para las obras públicas, como son las zonas de apoyo de estructuras. Junto con una breve descripción de los aspectos operativos de este método geofísico se presentan varios ejemplos de aplicaciones donde los resultados obtenidos han cubierto los objetivos de forma precisa.

La existencia de discontinuidades o accidentes puntuales del terreno, en el entorno de las zonas de apoyo de diversas estructuras de las obras públicas, representa un grave problema de indudable importancia respecto a la futura estabilidad de tales estructuras. Algunos de estos accidentes, por sus limitadas dimensiones, son muy difíciles de detectar y caracterizar mediante sondeos debido al carácter puntual de los datos obtenidos de la perforación, aún en el caso de que estos sondeos se distribuyan en una malla muy cerrada.

Existen métodos geofísicos, englobados bajo la denominación genérica de **Tomografía *cross-hole***, capaces de estudiar y caracterizar el medio rocoso situado entre dos sondeos, mediante medidas de algún parámetro físico característico del terreno realizadas a lo largo de ellos; identificando accidentes tales como huecos, zonas karstificadas, fallas y contactos entre unidades litológicas con diferentes características geotécnicas.

En este artículo se describen brevemente los fundamentos y el procedimiento de aplicación del método de la *Tomografía sísmica cross-hole*, incluyendo algunos ejemplos de estudios realizados por los autores durante los últimos meses. Consideramos que los referidos ejemplos son suficientemente explí-

tos como para que los lectores puedan valorar objetivamente el interés del método de la Tomografía sísmica *cross-hole*. Dejamos constancia al respecto de que una gran parte de estos resultados han sido contrastados de forma satisfactoria mediante sondeos.

Se pretende dar a este artículo un marcado carácter práctico, esperando que pueda ser de alguna utilidad a los técnicos involucrados de algún modo en los proyectos constructivos y en la propia ejecución de las obras de infraestructura, que se desarrollan actualmente en nuestro país. Es de interés que conozcan las posibilidades y conveniencia de empleo de esta herramienta geofísica, y nada mejor para ello que poder dar un vistazo a los resultados de estudios reales, algunos de los cuales pudieran presentar semejanzas con los problemas a los que ellos se enfrentan.

Desde esta idea se reducirán al mínimo las explicaciones de los aspectos teóricos del método, señalando con mayor detalle los aspectos operativos y aumentando el número de ejemplos.

El método de la tomografía sísmica *Cross-Hole*

En su sentido más amplio, un estudio tomográfico *cross-hole* consiste en determinar

de forma detallada la distribución de un determinado parámetro del terreno en el espacio comprendido entre dos sondeos situados relativamente próximos entre sí. Entre los diversos parámetros físicos del terreno uno de los más significativos en el ámbito de las aplicaciones geotécnicas es la velocidad de transmisión de las ondas de compresión (V_p) a través del mismo. Su importancia en relación con los estudios geotécnicos radica en que los valores de este parámetro dependen del grado de compacidad e integridad de los materiales y, por lo tanto, están directamente relacionados con la calidad del macizo rocoso.

La representatividad y significado de la velocidad de transmisión de las ondas de cizalla (V_s) es semejante y, de hecho, también pueden hacerse estudios tomográficos basados en ellas. Por razones de sencillez todos los comentarios en este artículo de referirán exclusivamente a las ondas de compresión.

Las posibles heterogeneidades puntuales del terreno, tales como zona de falla, relleños, cavidades y contactos entre unidades litológicas, representan contrastes notables en la distribución de los valores de V_p del medio rocoso y, por lo tanto, son susceptibles de detección y caracterización a partir de las medidas de V_p convenientemente re-

alizadas entre sondeos, o entre éstos y la superficie del terreno (técnica *down-hole*).

La mayor parte de los problemas en los que resulta inmediata la utilidad del método aquí comentado, se presentan asociados a los procesos de karstificación de los macizos rocosos.

En términos generales, una zona karstificada representa un ámbito puntual o de dimensiones finitas que se caracteriza, entre otras cosas, por una velocidad de propagación de las ondas sísmicas con valores muy inferiores a los de la roca sana, tanto si la karstificación implica la existencia de huecos vacíos o llenos de agua, como si se limita a una red de conductos, incluso colmatados de arcilla.

Ejecución de las medidas

Para la ejecución de un estudio mediante tomografía sísmica *cross-hole* se requiere un mínimo de dos sondeos, si bien, para el reconocimiento detallado de un determinado espacio rocoso es conveniente efectuar las medidas entre diversas parejas de sondeos que definan secciones en las direcciones de mayor interés para cada caso.

En esencia, la ejecución de estas medidas requiere emplazar en uno de los sondeos una serie de sensores (hidrófonos) regularmente espaciados y cubriendo en exceso todo el rango de profundidad que se pretende reconocer. Mediante estos sensores, se registra la señal sísmica producida en un determinado punto del segundo sondeo empleando sistemas capaces de generar específicamente ondas de compresión, o de cizalla si el estudio se hiciera determinando la distribución de V_p .

Una vez registrada la señal sísmica para una determinada posición del punto de señal localizado en uno de los sondeos y de los sensores que se mantienen fijos en el segundo sondeo durante todo el proceso, se desplaza aquél a lo largo del primer sondeo hasta una nueva posición y se repite el proceso de registro con todos los sensores que permanecen en la misma posición, hasta que el punto de señal recorre completamente el sondeo donde se sitúa.

Dependiendo del grado de resolución requerido en cada caso se establece el espaciado entre sensores y entre puntos de señal que suele ser el mismo en ambos sondeos. Es habitual operar con espaciados del orden de un metro o a veces inferior cuando se requiere obtener resultados con el mayor grado de detalle posible. De la simple observación de los esquemas relativos a esta forma de realizar las medidas, tal como se presentan en la **Fig. 1**, se deducen dos aspectos básicos de este método geofísico.

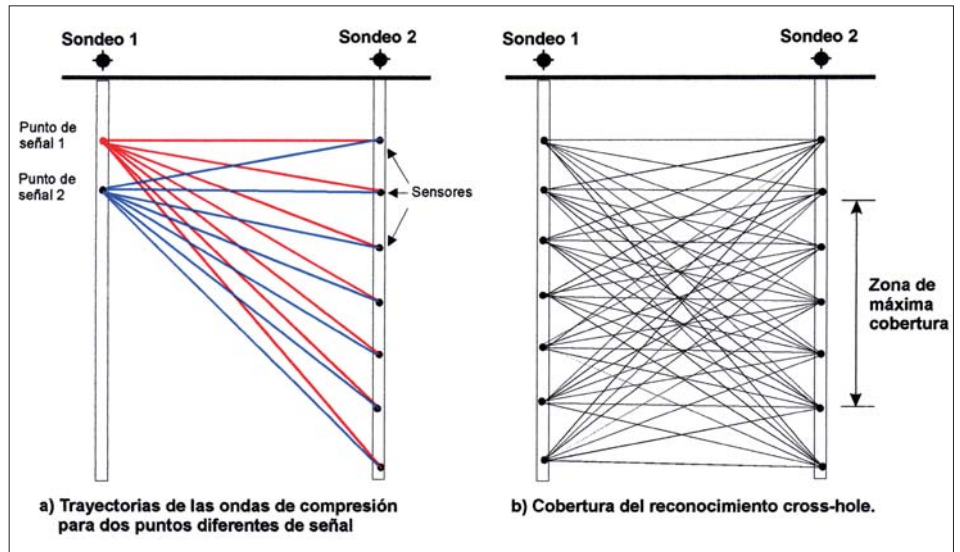


Fig. 1.- Esquema explicativo de las medidas de Tomografía sísmica *cross-hole*.

- La multiplicidad de las posibles trayectorias definidas por las diversas combinaciones punto de tiro-sensor que atraviesan cada elemento puntual del espacio comprendido entre los dos sondeos hace que el muestreo de tal espacio sea exhaustivo.
- La reducción de la cobertura de datos hacia los extremos superior e inferior de la sección definida por los dos sondeos aconseja que éstos se perforen hasta una profundidad que sobrepase convenientemente la zona de estudio propiamente dicha.

La bondad y representatividad de los resultados de estos estudios depende de la precisa determinación de la distancia punto de tiro-sensor para todas sus múltiples combinaciones, y también de la exactitud con que se calculen los tiempos de tránsito de las ondas de compresión entre ellos. El primer condicionante implica conocer con detalle la distancia entre sondeos y la posible inclinación de cada uno de ellos.

Por su parte, la determinación precisa de los tiempos de las primeras llegadas para cualquier combinación entre puntos de tiro y sensores requiere como mínimo dos cosas: el empleo de un sismógrafo con alta capacidad de muestreo y un control riguroso del tiempo cero mediante el empleo de un sistema electrónico como fuente de señal.

En este sentido, la fuente de señal más recomendable en nuestra opinión es la que opera mediante una intensa descarga eléctrica (5.000 V, 1.200 A) entre dos electrodos situados en la parte inferior de una sonda especial (*sparker*) conectada a un sistema generador de impulsos eléctricos de alta energía. Esta fuerte descarga produce una

vaporización instantánea del agua entre los dos electrodos citados generando una burbuja de vapor que se expande a alta presión, dando lugar así a una onda de compresión que se transmite por el macizo rocoso.

Este procedimiento exige que los sondeos estén llenos de agua durante las medidas, lo cual requiere entubarlos y cementarlos correctamente con PVC cuando la sección a estudiar se localiza por encima del nivel estático. La cementación de la tubería de PVC es un factor determinante de la calidad de los registros que se ven muy afectados por la existencia de posibles huecos entre la tubería y la pared del sondeo cuando la cementación de la tubería de PVC es deficiente.

Procesado de los datos.

El procesado de los datos se ilustra de forma esquemática mediante la **Fig. 2**. La primera parte del proceso consiste en la identificación en los registros sísmicos de las primeras llegadas de las ondas de compresión a cada sensor y para cada punto de señal, determinando el tiempo invertido en cada caso. Para el cálculo de la velocidad de transmisión de la señal sísmica a partir de estos tiempos, hay que determinar también de forma precisa las distancias entre cada punto de señal y cada sensor. La precisión de estas distancias es un factor importante del proceso que requiere, cuando los sondeos son de cierta longitud, la realización previa de medidas de verticalidad/desviación en cada uno de ellos.

Téngase en cuenta que habitualmente las distancias entre sondeos son relativamente pequeñas, y cualquier error en la determinación de las distancias punto de señal-sen-

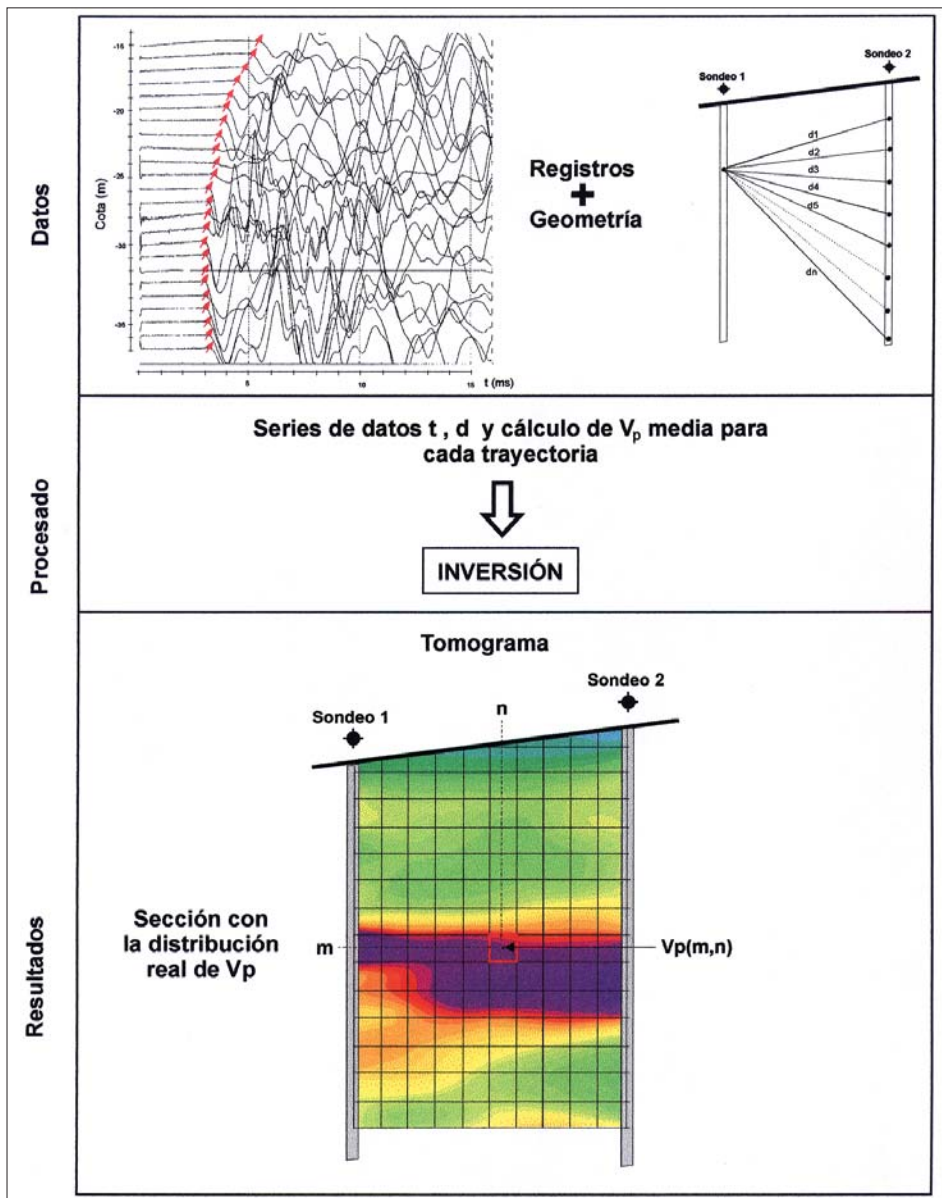


Fig. 2.- Explicación del procesado de los datos de un estudio mediante Tomografía sísmica cross-hole.

sor puede llevar a errores en los valores medios de V_p calculados a partir de estos datos, aunque ello no llegaría a producir en ningún caso anomalías puntuales que pudieran confundirse con las originadas por posibles accidentes kársticos.

Una vez cubierta la etapa de identificación de las primeras llegadas de las ondas P , determinando los tiempos y las distancias entre cada punto de tiro y cada sensor, la fase fundamental del proceso es la inversión de estos datos para determinar el valor de V_p en cada celdilla de la sección del terreno comprendida entre los dos sondeos. Se trata de un proceso complejo en términos matemáticos que se considera innecesario describir aquí.

El resultado final del estudio es una sección

definida entre los dos sondeos empleados para las medidas, con la distribución detallada de los valores de V_p . En esta sección, resulta inmediata la identificación de accidentes puntuales del terreno que, en el caso de zonas de falla o zonas karstificadas, se caracterizarán por valores de V_p notablemente más bajos que los correspondientes a las zonas sanas del macizo rocoso.

Es importante dejar constancia en este punto de que los tomogramas así obtenidos, constituyen un documento muy representativo de las características geotécnicas del macizo rocoso estudiado, porque son el resultado de un proceso en el que interviene un elevado número de datos interrelacionados entre sí, de modo tal que la solución del proceso de inversión es la mejor de las po-

sibles para todos los condicionantes que implican los datos correspondientes a las múltiples combinaciones señal/sensor consideradas.

Algunos ejemplos representativos

Generalmente los estudios mediante *Tomografía sísmica cross-hole* se plantean para el reconocimiento de zonas concretas, tales como, por ejemplo, el terreno localizado en el entorno bajo la zapata de una pila de un viaducto. Esta es una de las aplicaciones más habituales de este método geofísico, pero sin olvidar sus posibilidades de empleo en cualquier reconocimiento detallado de zonas concretas de los macizos rocosos, especialmente interesantes respecto a las obras que en ellos pueden realizarse.

En estas circunstancias, la distancia entre los sondeos de cada pareja empleados para las medidas suele oscilar entre 10 y 20 metros. El límite superior no viene impuesto por la instrumentación, ya que la señal generada por el *sparker* puede registrarse fiablemente a distancias de varias decenas de metros, sino por el hecho de que la capacidad resolutive del método se reduce al aumentar la separación entre sondeos.

En otros casos, más que para detectar accidentes puntuales del subsuelo, estos estudios se realizan para obtener una información general respecto a las condiciones geotécnicas del macizo rocoso y, en consecuencia, la distancia entre sondeos se amplía considerablemente y puede llegar a ser del orden de 100 m o incluso mayor.

Ejemplo nº 1. Identificación de una zona de falla y una probable cavidad kárstica en la zona de apoyo de la zapata de un viaducto

La decisión de llevar a cabo este reconocimiento vino motivada por el hecho de que uno de los sondeos perforados para el reconocimiento del terreno en la zona de la zapata en cuestión intersectó un hueco de dimensiones métricas a unos 10-12 metros de profundidad, mientras que en otros sondeos próximos solamente atravesaron calizas sanas. Obviamente, con este estudio se trataba de determinar la entidad del hueco y su probable continuidad lateral.

El reconocimiento detallado de esta zona se llevó a cabo perforando cuatro sondeos, distribuidos en la proximidad de cada esquina de la zapata, y midiendo entre los dos situados en los extremos de cada diagonal. Como ejemplo de los resultados obtenidos, se presenta el tomograma de la Fig. 3, en el

que claramente puede observarse, no solamente una zona de fractura que recorre diagonalmente la sección definida por los dos sondeos, sino también una probable oquedad localizada entre 10-12 m de profundidad, asociada a la fractura antes mencionada.

Otros tomogramas obtenidos mediante medidas realizadas en otros sondeos perforados en el entorno de la zapata, han permitido determinar la continuidad de la zona karstificada. Nos limitaremos a presentar el ejemplo de la Fig. 3, porque es uno de los tomogramas más representativos del estudio, excusándonos de dejar aquí constancia detallada del conjunto de los resultados.

Ejemplo n° 2. Estudio de la karstificación en un substrato carbonatado situado bajo un potente recubrimiento aluvial

En este caso, el problema surgió cuando se intersectó una zona con oquedades kársticas al construir los pilotes donde apoyarán las zapatas de un viaducto de doble tablero. Estos pilotes se apoyan, a su vez, en una formación de calizas karstificadas localizada a una profundidad variable entre 10 y 30 metros en el ámbito de la obra. Las referidas calizas se sitúan bajo un tramo margoso con una potencia media de 10 metros recubierto a su vez por una formación aluvial que llega a sobrepasar los 20 metros de espesor en algunos puntos.

En la Fig. 4 se presentan algunos resultados parciales de este reconocimiento en forma de un bloque tridimensional, conformado al agrupar convenientemente los tomogramas de varias parejas de sondeos. Esta forma de presentación de los resultados permite una fácil visualización de las zonas karstificadas dentro del sustrato calizo situado en la proximidad de las zonas de apoyo de dos de las pilas. Frente a la roca sana, caracterizada por valores de V_p superiores a 4.000 m/s, las zonas karstificadas presentan valores de V_p inferiores a 2.500 m/s, o incluso a 2.000 m/s.

Al margen de este aspecto principal de los resultados del estudio, llamamos la atención respecto a la forma en que se diferencian en los tomogramas tanto el aluvial como la formación margosa situada al techo de las calizas karstificadas, debido al diferente grado de consolidación de ambas unidades geológicas respecto a las calizas sanas. El aluvial queda caracterizado por va-

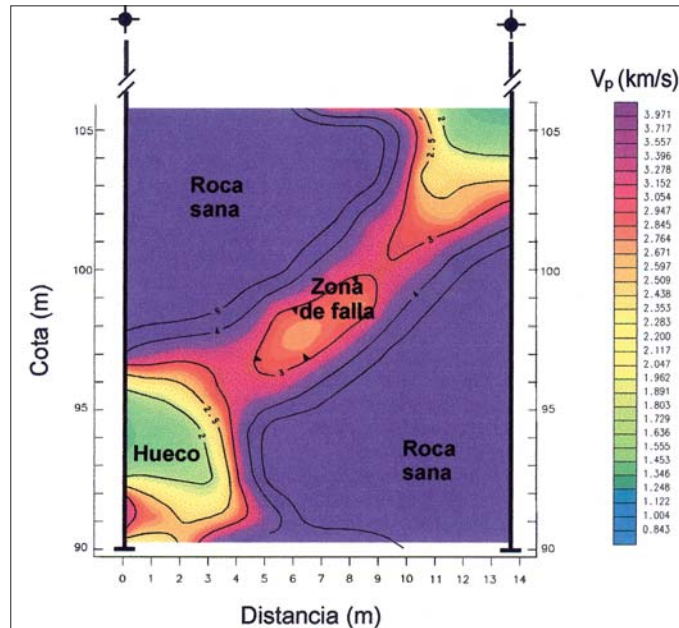


Fig. 3.- Ejemplo n° 1. Detección y caracterización de una zona de falla y una oquedad kárstica en calizas.

lores de V_p menores de 2.000 m/s, mientras que la formación margosa presenta valores variables entre 2.000 y 3.000 m/s.

Ejemplo n° 3. Reconocimiento de la traza de un túnel entre dos sondeos situados a una distancia de 100 metros.

El macizo rocoso correspondiente a este ejemplo está constituido por cuarcitas y esquistos con características geotécnicas muy diferentes, ya que las cuarcitas presentan bajo grado de fracturación y los esquistos están notablemente alterados.

En la zona comprendida entre los dos sondeos A y B, resultaba muy problemático completar el reconocimiento geotécnico de la traza mediante sondeos por tratarse de una zona urbana. Con el objetivo de determinar, con la mayor precisión posible, el tipo de materiales en que se habría de excavar el túnel se decidió efectuar

un estudio mediante Tomografía sísmica cross-hole entre los dos sondeos mencionados, obteniéndose los resultados que se presentan en la Fig. 5.

En este tomograma puede apreciarse como los primeros 50 m del trazado son pro-

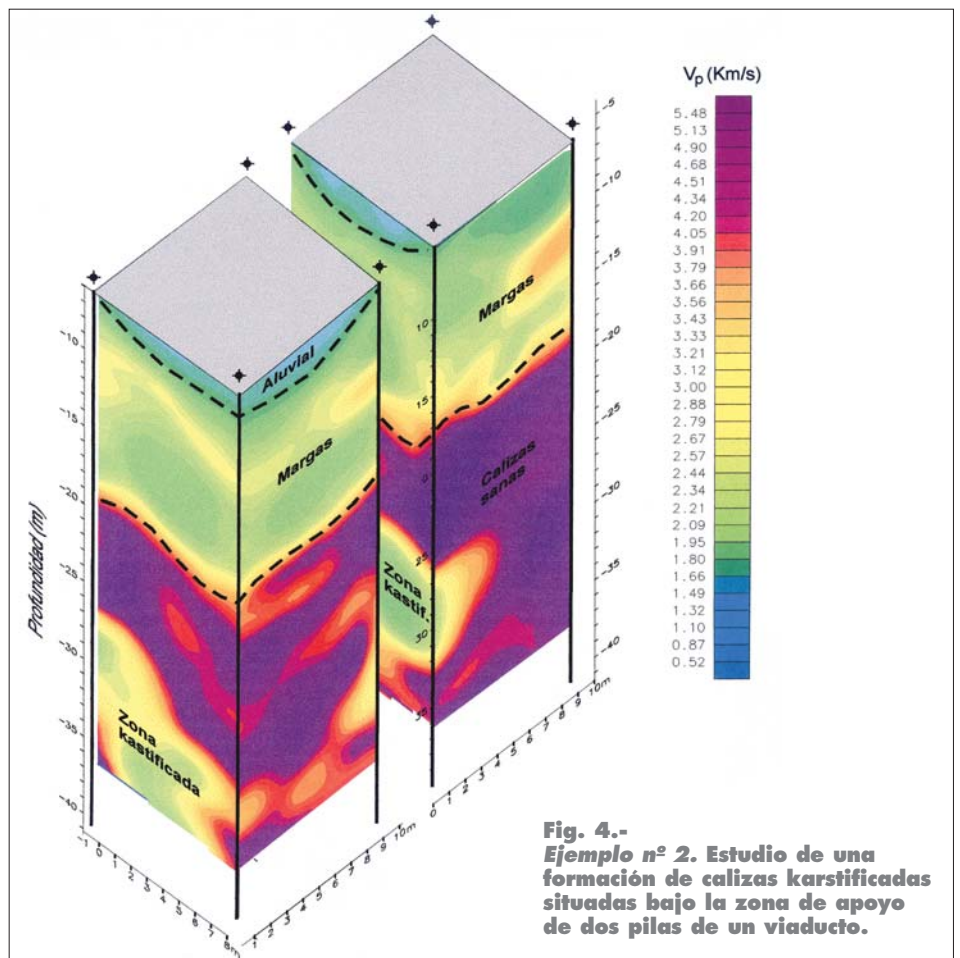


Fig. 4.- Ejemplo n° 2. Estudio de una formación de calizas karstificadas situadas bajo la zona de apoyo de dos pilas de un viaducto.

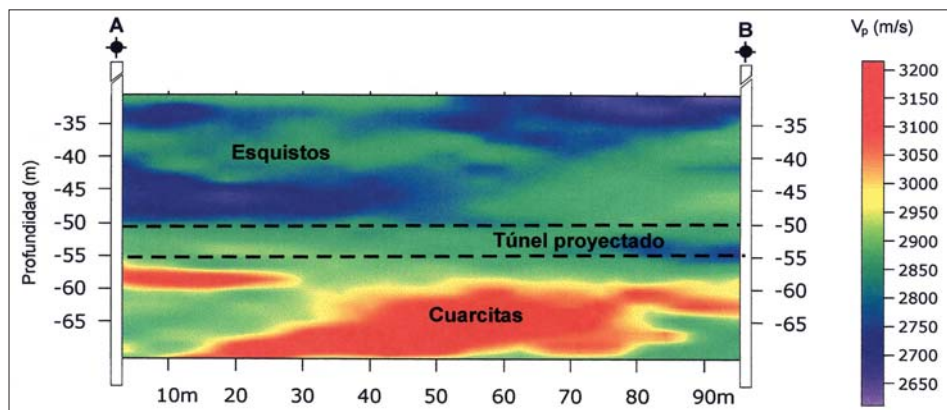


Fig.5.- Ejemplo nº 3.- Estudio de la traza de un túnel.

blemáticos porque la clave del túnel se sitúa muy próxima a un nivel de esquistos que, por sus bajos valores de V_p , pueden considerarse de características geotécnicas mediocres.

Es evidente el interés de la información obtenida de este estudio geofísico, porque permite una correcta planificación de los trabajos de excavación del túnel, mejor en todo caso que si únicamente se hubiera contado con los datos de los dos sondeos entre los que se han hecho las medidas sísmicas.

Conclusión

Por el escaso tiempo disponible para la preparación de este artículo, y por la necesaria limitación que a su extensión impone el hecho de que este número de *INGEOPRES* estaba prácticamente en proceso de impresión cuando se decidió su elaboración, es natural que algunos aspectos no se hayan tratado con el detalle que el tema requiere. Sin que esta disculpa excuse todas

las carencias de este trabajo, esperamos no obstante que hayamos cubierto nuestro objetivo principal, que es suscitar en algunos lectores interés por el método geofísico de la *Tomografía sísmica cross-hole*, que indudablemente lo tiene, contribuyendo en todo caso a su divulgación.

Bibliografía

- KAK A.C. AND SLENAY M. (1988). *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. IEEE Press New York.
- ROELOF VERSTEEG (1997). *An Introduction to Near Surface an Environmental Geophysical Methods an Applications*. SAGE-EP. Reno 1997.
- SANTAMARINA J.C. AND RIX G.J. (1997). *Near Surface Geophysical Inversion, Surface Waves and Geotomography*. SAGE-EP. Reno 1997.

