

Aplicación de técnicas de Geo-Radar para el estudio del tapón de jet-grouting inyectado en los túneles del metro

Jet-grouting determination in a subway metropolitan tunnel by using ground penetrating radar analysis

F. García (**), J.A. Canas (*), J. Clapés (*), R. Osorio (*), L.G. Pujades (*), V. Pérez (*) y O. Caselles (*)

(*) Servei de Geofísica, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, Spain.

(**) Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. ETSIGCT. Universidad Politècnica de Valencia. Valencia, Spain.

ABSTRACT

Several kilometers of tunnel have been excavated to extend a metropolitan underground system. In some places, where the subsurface is mainly composed by gravel and sands, water can easily penetrate causing problems to the tunnel and the stations.

In order to avoid such problems, a jet-grouting injection was carried out. To check the continuity of the jet-grouting a Ground Penetrating Radar analysis was applied.

The radar used is a SIR 10 of Geophysical Survey Systems Inc., with a center frequency antenna of 100 Mz, prepared for urban jobs.

A good determination of the variation of the thickness of the jet-grouting layer was obtained, although several difficulties, specially the irregular topography, were to be solved.

Three boreholes to determine the quality and thickness of the jet-grouting in three different places provided the right calibration of the involved radargrams.

During the processing of the data, several filters had to be applied to discriminate the radar signals from noise, coming mainly from the electrical system of the tunnel.

Key Words: georadar, ground penetrating radar, jet-grouting, metropolitan tunnel.

Geogaceta, 20 (6) (1996), 1365-1368
ISSN:0213683X

Introducción

Desde los años setenta, las técnicas de prospección geofísica más resolutivas son solicitadas por Ingeniería Civil, especialmente en grandes proyectos tales como túneles, puentes, presas, etc (Matthews y Tsui, 1993) y como métodos de control de calidad (Gary, 1992).

Entre estas técnicas de prospección, el georadar o radar del subsuelo es una de las más adecuadas tanto para determinar las estructuras del terreno como para la detección de gran variedad de patologías que pueden presentar las estructuras en Ingeniería Civil. Esto es debido a la gran capacidad de resolución del método en las profundidades habituales en las obras de ingeniería y si su adaptabilidad a las diferentes problemáticas.

Una de las aplicaciones del geo-radar es el control de calidad de los tratamientos efectuados en el terreno que tienen por objeto acondicionarlo para determinadas obras civiles.

Este trabajo pretende evaluar mediante la utilización del geo-radar como método de control, la inyección de cemento («jet-grouting») realizada en el subsuelo de un tramo de túnel del ferrocarril metropolitano de Valencia. La técnica del «jet-grouting» aprovecha la existencia de un estrato de gruesos (arenas y gravas) para impermeabilizar mediante la inyección de cemento, el subsuelo del tramo del túnel situado por debajo del nivel freático.

El control del «jet-grouting» se realiza utilizando las mismas técnicas que en el estudio de estructuras de suelos, donde la capa de material inyectado se manifiesta como un reflector en el terreno. Los reflectores que se esperan observar definen claramente la existencia del «jet-grouting» pues se corresponden con el inicio y final de éste, definiendo el grueso de inyección o terreno tratado

Durante este estudio se plantearon diversos problemas, que afectan al método de georadar: topografía accidentada de la superficie del suelo, imposibilidad de un deslizamiento regular de la antena en algunos tramos, existencia de zonas obstaculizadas para el paso de la misma y presencia de instalaciones eléctricas que inducen parásitos en la señal de geo-radar.

El Ferrocarril Metropolitano de Valencia está construido, en mucho tramos, en un terreno arenoso (aluvial del río Turia) con un nivel freático muy alto (entre siete y ocho metros de profundidad). Los materiales más superficiales, los dos primeros metros, son rellenos, seguidos de limos intercalados con diferentes capas de arcillas, arenas y gravas de distinta granulometría (figura 1).

La alta permeabilidad de las arenas y gravas del subsuelo de esta zona de la ciudad de Valencia puede ocasionar filtraciones de agua en obras subterráneas. Para evitarlas se efectuó el tratamiento de «jet-grouting».

La densidad de la malla de inyecciones realizadas en el terreno objeto de estudio y que forma-

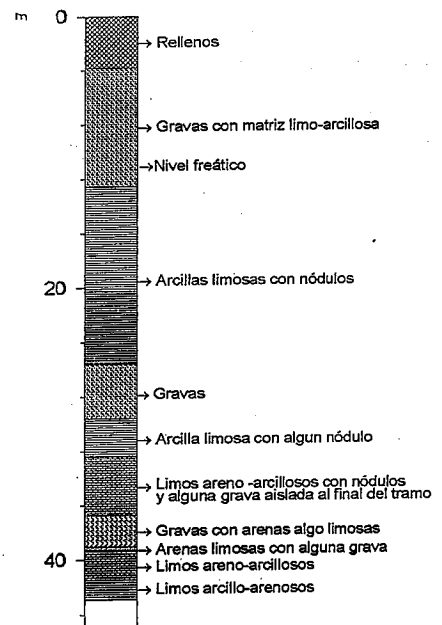


Fig. 1.- Columna estratigráfica según el sondeo 217 efectuado en la zona de la estación.

Fig. 1.- Stratigraphic column corresponding to the 1-borehole number 217, carried out near the station.

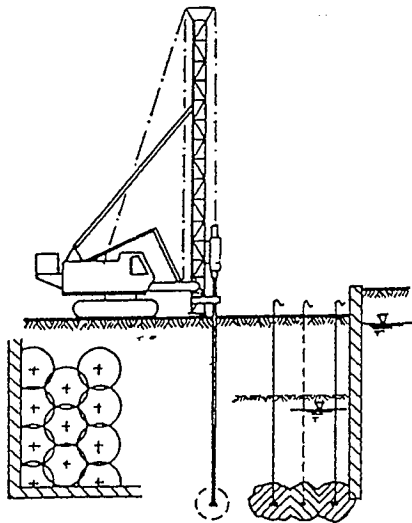


Fig. 2.- Esquema donde se aprecia el método de inyección utilizado, la colocación del jetgrouting verticalmente, el muro de contención que separa la zona tratada de la no tratada y un esquema superficial de la distribución de puntos tratados.

Fig. 2.- Scheme of the jet-grouting method showing the vertical injection, the wall to isolate the ground treated with jet-grouting and the superficial distribution of the injections.

ban el «jet-grouting» es de una inyección cada 1.20 metros. Esta malla garantiza la impermeabilidad del subsuelo tratado. Para ello es importante que el cemento haya quedado distribuido homogéneamente, sin formación de oquedades y con un grosor suficiente. El control de calidad se ha efectuado desde el interior de una estación de este ferrocarril en construcción y ha permitido conocer el resultado del tratamiento.

El proyecto constructivo preveía una capa de «jet-grouting» aproximadamente de cinco metros de espesor y su parte superior se situó a una profundidad entre once y trece metros, dependiendo de la estratificación. Estos valores están dentro del rango de profundidades en el que el geo-radar ofrece una buena resolución y permite el seguimiento de la capa a lo largo del túnel.

La existencia de tres columnas de sondeo efectuadas en la zona de la estación permiten conocer la estratigrafía. La comparación de los radargramas obtenidos durante el estudio con la estratigrafía aportada por los sondeos es importante para obtener una buena interpretación. Los resultados de la prospección mediante empleo de geo-radar nos permiten definir con precisión la existencia del tratamiento de «jet-grouting».

Estratigrafía de la zona

En la interpretación de los datos obtenidos mediante el empleo del geo-radar es importante definir previamente las constantes dieléctricas de los materiales del subsuelo a investigar (Rupert *et al.*, 1992; Maijala, 1992). Estas constantes se pueden asignar a priori conociendo los materiales de la columna estratigráfica. Esto permite asociar a cada formación un determinado rango de valores de su constante dieléctrica. Si además

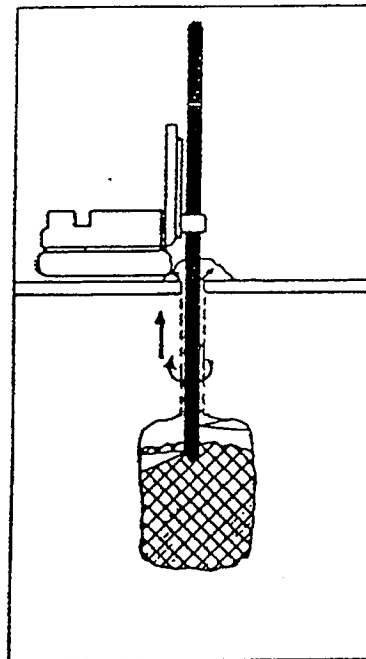
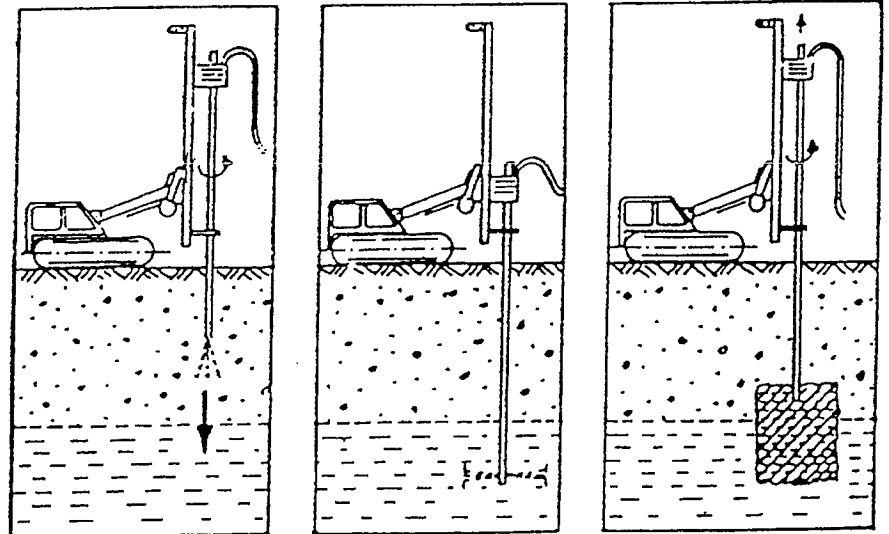


Fig. 3.- Dos de los mecanismos de realización de una columna de «jet-grouting». En la figura superior se observa el proceso de mezclando del «grouting» con los materiales del suelo. En la figura inferior la sustitución en parte los materiales del suelo por el «grouting».

Fig. 3.- Two ways to perform a jet-grouting column: the mixture with the ground materials and the substitution of the ground materials ~y the grouting.

conocemos la potencia exacta en un punto (sondeo), podemos determinar exactamente la constante dieléctricas de cada formación.

En el presente estudio, las tres columnas de sondeo efectuadas previamente en la zona de la estación, han permitido fijar en los perfiles obtenidos con geo-radar las constantes dieléctricas de los materiales de la zona para con ellas ajustar perfectamente los valores de la profundidad y el potencia de cada estrato. Los sondeos alcanzan una profundidad de hasta cincuenta metros.

Se aprecia que la geología de la zona está

compuesta por una primera capa de rellenos de entre 2 y 3 metros de potencia, seguida de una de gravas con matriz limoarcillosa de potencia entre 4 y 8.5 metros. Intercaladas entre estas dos primeras capas, aparecen, en dos de los sondeos, diversos estratos de un grosor total inferior a los dos metros. Por debajo de las gravas se encuentra una capa de arcillas limosas cuya potencia varía entre 10 y 17 metros. La cuarta capa importante presenta gravas de espesor entre 3 y 6 metros, existiendo arcillas por debajo de ellas. Como ejemplo de columna estratigráfica se presenta en

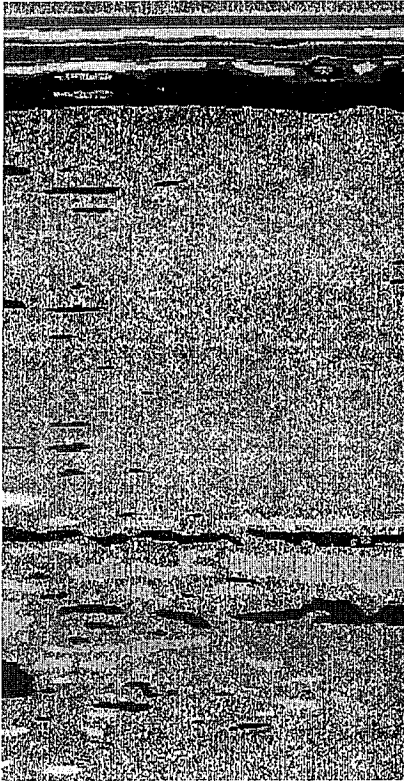


Fig. 4.- Ejemplo de uno de los registros efectuados con geo-radar. Puede observarse la continuidad del tratamiento, tanto en espesor como longitudinalmente.

Fig. 4.- Example of the radar images showing the continuity of the jet-grouting treatment in thickness and along the profile.

la figura 1 el sondeo número 217.

Puede resumirse que principalmente los materiales que componen el subsuelo donde se proyecta la construcción del ferrocarril metropolitano subterráneo son arenas, gravas, arcillas y limos. Las propias columnas de sondeo nos dan una profundidad aproximadamente de 7.5 metros para el nivel freático.

Técnicas de impermeabilizado por «jet-grouting»

Las técnicas denominadas de «grouting» son generalmente una inyección de suspensiones, soluciones o emulsiones en los poros de un material del subsuelo para mejorar sus características geotécnicas. A menudo se utiliza para disminuir la permeabilidad de un determinado estrato o bien para aumentar la cohesión del mismo. La técnica de «jetgrouting» es un método para crear una barrera impermeable o bien para preparar el subsuelo para soportar determinadas estructuras. Se utiliza en todo tipo de suelos, siendo necesario predecir adecuadamente el tamaño del tratamiento. Es necesario efectuar un seguimiento del tratamiento y un control exhaustivo del mismo.

Básicamente, el tratamiento de «jet-grouting» consiste en introducir un conducto en el subsuelo hasta la profundidad adecuada, por donde se realizará la inyección de materiales. Por el conducto se aplica una inyección de agua a presión, que hace que parte del suelo de la zona

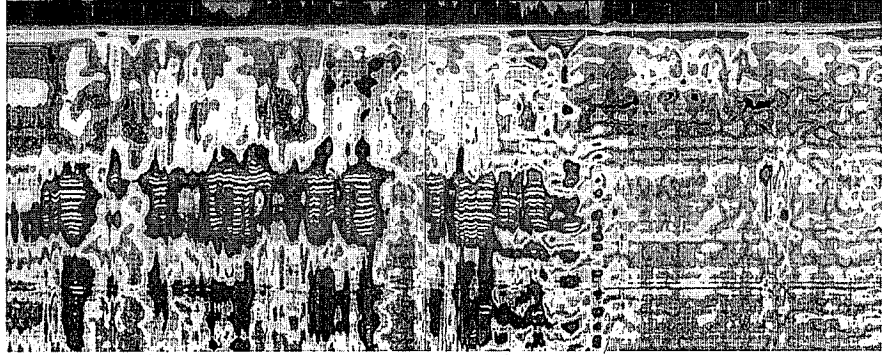


Fig. 5.- Detalle ampliando la reflexión generada por la capa inyectada de «jet-grouting». Entre las dos líneas que marcan la capa de tratamiento se aprecia la forma irregular de las columnas cilíndricas de cada una de las inyecciones.

Fig. 5.- This detail of the radar data provides an image of the jet-grouting columns form. The two continuous lines mark the ground place where the treatment took place.

afectada por la inyección salgan a la superficie. Simultáneamente se procede a la inyección de «grout», cemento o bien cemento con otro compuesto, que se mezcla con las partículas del suelo que no han sido arrastradas por el agua. Esta inyección se realiza a menudo mediante aire a presión. La simultaneidad de los dos procesos (el vaciado con agua a presión y la inyección de los materiales de «grout») se aplica para que el suelo no pierda firmeza, como podría suceder si se realizara un hueco sin relleno (Bell, 1993) El tratamiento debe finalizar a una determinada profundidad, y se efectúa en una red de puntos, tal como se observa en la figura 2, para que el cubrimiento de la superficie sea completo. El material inyectado en cada uno de los puntos deberá superponerse con el inyectado en los adyacentes.

El material inyectado debe ser de baja viscosidad para que el tratamiento se efectúe adecuadamente y pueda inyectarse en la proporción adecuada. Para compactarlo debe añadirse arena. Los demás componentes de la mezcla dependen del problema y del tipo de suelo a tratar.

En la estación de metro estudiada, esta técnica fué aplicada para disminuir la permeabilidad del terreno, para lo cual se inyectó una solución de cemento en una capa de arenas, justo por encima del nivel freático. Las arenas de este estrato, al mezclarse con la mezcla de cemento de baja viscosidad, contribuirán a compactarlo, formando de este modo una pantalla de un cierto grosor a una profundidad que permitirá impermeabilizar el suelo.

Las inyecciones de «grout» se realizaron formando una malla de puntos separados entre sí 1.20 metros aproximadamente, cubriendo cada una de las inyecciones una superficie aproximadamente circular de 1.50 metros de diámetro. Cada una de las columnas de «jetgrouting» se formaron por rotación, como se aprecia en la figura 3. Para delimitar la zona a impermeabilizar, se colocó una pantalla de hormigón que en los registros de geo-radar (figuras 4 y 5) se aprecia como una discontinuidad de la señal vertical a partir de la cual deja de existir la señal debida al «jet-grouting».

El control de calidad del tratamiento comentado se efectúa con geo-radar. En los registros obtenidos puede determinarse el grosor del mismo y su continuidad. Este método de control tiene como ventaja frente a los sondeos mecánicos

que ofrece datos de forma continua en cada uno de los perfiles efectuados.

Equipo de geo-radar utilizado y planteamiento de las medidas

Para el presente estudio se utilizó un georadar digital SIR10 de GSSI con una antena apantallada de frecuencia central 100 Mz. Este tipo de antena es usual para prospección geofísica en zonas urbanas ya que evita en gran medida el ruido que puedan introducir otros reflectores situados por encima de la antena: farolas, redes eléctricas, etc. En concreto, en el caso del túnel estudiado se ha utilizado con el propósito de minimizar el reflector que supone la bóveda del túnel. Además, esta antena muestra con suficiente detalle y resolución el rango comprendido entre 7 y 20 metros, profundidad donde se localiza el tratamiento de «jet-grouting».

Uno de los principales problemas que se planteaban en este estudio era la presencia en algunos tramos de una parrilla metálica de las losas de hormigón sobre las que se pasaba la antena. La potencia de este modelo permite que la energía del pulso que atraviesa la parrilla sea suficiente para que las reflexiones en profundidad sean detectadas. Para la visualización el equipo SIR10 tiene la posibilidad de ajustar las ganancias en función del tiempo, permitiendo minimizar el potente reflector inicial.

Los perfiles realizados en la estación, han sido planificados para obtener registros de geo-radar continuos en distancia (200 adquisiciones por metro) y profundidad (tiempo de muestreo 500 ns). Se ha podido realizar la exploración en 145 metros de una longitud total de la estación de 184 metros, quedando el resto de su extensión sin analizar al no ser accesibles debido a obstáculos diversos. Se realizaron trece perfiles longitudinales en la zona de la estación.

Para el análisis en laboratorio de los datos obtenidos en la estación se ha empleado el software RADAN III de GSSI. Este programa permite el tratamiento de las señales mediante diversos filtros (p.e. filtros IIR) para resaltar los reflectores de interés y minimizar otros.

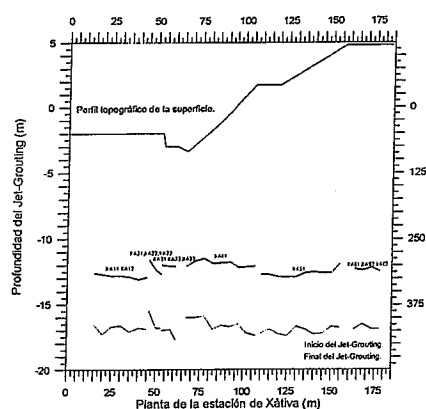


Fig. 6.- Esquema del perfil topográfico de la estación y de la capa de «jet-grouting» situada entre los -12 y -17 metros. Se especifican los perfiles efectuados para estudiar cada uno de los tramos.

Fig. 6.- Topographic profiles of the station and the jet-grouting layer placed between -12 and -17 meters.

Tratamiento de los datos en laboratorio

En todo trabajo de prospección por geo-radar una importante fase es el detallado análisis y tratamiento de los datos previamente obtenidos en el campo. Esta labor depende totalmente de la problemática en cuestión. En nuestro caso, la importante irregularidad del suelo impedía en algunas ocasiones un deslizamiento suave de la antena por la superficie del túnel. Esto provoca oscilaciones en la señal registrada que en laboratorio se han eliminado utilizando filtros pasobanda horizontales de respuesta infinita (filtro de 5 puntos).

Otra dificultad presente en este estudio ha sido la presencia de una importante red de instalaciones eléctricas. A pesar de que la antena utilizada está preparada para trabajos urbanos con un apantallamiento superior, no han podido evitarse totalmente los parásitos inducidos en la señal por las instalaciones eléctricas. Para mejorar la relación señal-ruido, se ha realizado un filtrado pasobanda vertical centrado en la frecuencia de la señal parásita.

Algunos perfiles se han efectuado sobre una superficie en la que existen numerosos objetos metálicos, como por ejemplo las parrillas de las losas de hormigón sobre las que se ha pasado la antena. Estas armaduras próximas a la superficie provocan reflexiones múltiples del pulso emitido que oscurecen y dificultan la determinación de otros reflectores profundos. En estos perfiles se ha realizado una deconvolución, que permite eliminar las reflexiones múltiples de objetos metálicos situados en superficie o a poca profundidad. En algunos perfiles ha sido especialmente importante este tratamiento ya que las reflexiones ocultaban las producidas por el inicio y el final de la capa de «jet-grouting».

Se ha efectuado también sobre todos los registros una migración para eliminar el efecto de las reflexiones en objetos que no están situados en la vertical de la antena y de las superficies que no son planas, que generan señales de pendientes alteradas (Dobrin, 1976).

La presencia de desniveles importantes en el

túnel dificulta el cálculo de la cota de la capa de «jet-grouting» ya que se registran tiempos de reflexiones diferentes para objetos situados en el mismo nivel respecto a la superficie del suelo. Para su tratamiento e interpretación, se ha aplicado a todos los perfiles una corrección topográfica cuyo objeto es tener un nivel cero común en toda la longitud de cada uno. Esta corrección ha permitido igualar los tiempos de reflexión de la señal de geo-radar en las capas existentes a igual profundidad, facilitando de este modo la situación correcta de la capa.

Perfiles y resultados obtenidos

Se han efectuado trece perfiles agrupados en seis zonas. En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras los análisis en cada una de ellas, incluyendo la corrección topográfica que nos permite referenciar todas las profundidades a una misma cota relativa.

En la primera zona se realizaron dos perfiles, de treinta metros de longitud total. La primera reflexión asociada al inicio de la capa de «jet-grouting» está a una profundidad entre 12.5 metros y 13.2 metros. La segunda reflexión tiene lugar entre los 16.5 metros y los 17.4 metros de profundidad. El grosor medio del «jet-grouting» en esta zona es de cuatro metros aproximadamente.

La longitud de la segunda zona, formado por tres perfiles, es de ocho metros. La reflexión inicial en el «jet-grouting» se produce a una profundidad entre 11.6 metros y 12.8 metros, mientras que la reflexión de la base está entre los 15.5 y los 16.9 metros. El grosor medio del «jet-grouting» es también de cuatro metros aproximadamente.

Una tercera zona compuesta por tres perfiles, también de ocho metros de longitud presenta el contacto superior del cemento inyectado con el medio a una profundidad entre los 11.8 metros y los 12.1 metros. El contacto inferior se sitúa entre los 16.9 metros y los 17.8 metros. En este caso, la potencia media de la capa de «jet-grouting» es aproximadamente de cinco metros.

En la cuarta zona, de cuarenta metros de longitud y que consta de un único perfil, una primera reflexión indica que la superficie superior del «jet-grouting» se encuentra entre los 11.4 y los 12.3 metros de profundidad, quedando la parte inferior situada entre los 15.8 metros y los 17.4 metros. El grosor medio obtenido es ligeramente mayor que cinco metros.

En la quinta zona, también compuesta de un sólo perfil y de cuarenta y cinco metros de longitud, la primera reflexión está situada entre 11.8 y 13 metros de profundidad, estando la reflexión en la base entre 16.8 metros y 17.5 metros. El espesor del tratamiento de «jet-grouting» resulta en este caso de aproximadamente cinco metros.

La sexta y última zona consta de tres perfiles de una longitud total de catorce metros. Presentando la reflexión en la parte superior del «jet-grouting» a una profundidad entre 12.3 y 12.4 metros, y la parte inferior entre 16.6 y 17.1 metros. La potencia de la capa en este sector es algo mayor que cuatro metros (figura 6).

Como ejemplo de los registros obtenidos se presenta en la figura 4 el registro obtenido en una zona donde puede verse la continuidad del tratamiento de «jet-grouting». En la figura 5 se puede ver un detalle de un registro donde es posible observar la forma de una de las columnas de «jet-grouting». En la figura 3 se explica el proceso de

este tratamiento. En ella se ve que el «jet-grouting» se inyecta en forma de columnas.

El resultado final de todos los registros efectuados se resume en la figura 6, un esquema de toda la longitud de la estación donde se presenta la profundidad a la que se encuentra el estrato de material inyectado, que se sitúa entre las cotas -12 y -17 metros. En cada tramo se especifican los perfiles que se realizaron.

Conclusiones

En los registros puede apreciarse claramente la existencia de dos importantes reflectores que se corresponden con el inicio y el fin del tratamiento de «jet-grouting».

Así mismo, se aprecia la continuidad del estrato inyectado tanto en profundidad como en longitud, quedando situado su inicio a unos doce metros de profundidad desde el nivel topográfico cota cero, y el fin del tratamiento a unos 17 metros de profundidad referidos al mismo nivel.

En la figura 6 se presenta un esquema con la topografía de la superficie de la estación por donde se deslizó la antena y el inicio y final del tratamiento de «jet-grouting» determinados del análisis.

Se demuestra en este trabajo que ha sido posible realizar un análisis detallado del tratamiento efectuado en el subsuelo, mediante el procesado posterior de la señal.

Un adecuado tratamiento en laboratorio, teniendo en cuenta la problemática concreta de cada estudio y las circunstancias del terreno, posibilita la correcta interpretación de los datos obtenidos. Correcciones por topografía del suelo sobre el que se aplica la antena y filtrados adecuados para evitar el apantallamiento ocasionado por reflexiones múltiples o por superposición de otras señales eléctricas, a menudo existentes en las zonas de estudio, son muy importantes para la correcta interpretación de la señal registrada.

La posibilidad de determinar la correcta aplicación del «jet-grouting» en las construcciones civiles asegura el buen funcionamiento de las mismas, evitando problemas que puedan ocasionar importantes pérdidas económicas y materiales. En este caso se utiliza el geo-radar como un método sencillo y eficaz para la prevención de posibles fallos en la aplicación tratamiento de «jet-grouting» bajo la red de ferrocarriles metropolitanos de Valencia.

La existencia de sondeos realizados en la zona de estudio y el conocimiento geológico de la misma facilita la interpretación de los datos.

Referencias

- Bell, F.G. (1993), *Engineering treatment of soils*, Great Britain
- Dobrin, M.B. (1976) *Introduction to geophysical prospecting*, New York
- Mattehs, Stuart y Tsui (1993) *Radar inspection of structures*, Build. Res. Estab., U.K.
- Weil, G.J., (1992) 4th Int. Conf. on G.P.R. Rovaniemi, Finland. *Geol. Surv. of Finland. Special Paper*, 16, p.259-266
- Rupert, G., Summers, D. y Uopkins, A. (1992) 4th Int. Conf. on G.P.R. Rovaniemi, Finland. *Geol. Surv. of Finland. Special Paper*, 16, p.47-56
- Majjala, P. (1992) 4th Int. Conf. on G.P.R. Rovaniemi, Finland. *Geol. Surv. of Finland. Special Paper*, 16, p.103-110.