

# Aplicaciones de Geo-radar para la determinación del volumen de hormigón necesario para la reparación del revestimiento de bóveda y hastiales de un túnel

*Ground penetrating radar application to determine the concrete volume in a tunnel*

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

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

(\*\*) ETSI Geodesica, Cartogràfica y Topogràfica, Universidad Politècnica de Valencia, Valencia, Spain.

## ABSTRACT

The vault damage in a railway tunnel, caused by damp in a granite massif, produced the granite slabs roof detachment. Sustainment of these granite slabs by concrete, including damping voids between the roof and the granite massif, was the most optimal solution concerning the preservation of the railway interior tunnel size (galibo). The volume of concrete necessary to cover the vault and the gables of the tunnel was determined using a ground penetrating radar SIR 10 from GSSI, with a 500 MHz center frequency antenna. Twelve radar profiles along the tunnel, covering the vault and the tunnel walls, were made to determine the total volume of concrete necessary to replace the old granite slabs, the void location and the identification of the tunnel region to be repaired. Ground penetrating radar measurements allowed to know the thicknesses of the granite slabs and the distance between these slabs and the massif rock of the irregular void.

**Key Words:** geo-radar, concrete, tunnel

Geogaceta, 20 (4) (1996), 974-977  
ISSN: 0213683X

## Introducción

El elevado costo de las obras de reparación en ingeniería civil hace que el estudio previo del problema, con la finalidad de optimizar tanto el tiempo de trabajo como el material utilizado, sea cada vez una etapa más importante dentro del proceso. Para el estudio del terreno o bien para el estudio de patologías y defectos en las estructuras ya construidas, la prospección geofísica mediante geo-radar es una de las técnicas actuales utilizadas con mayor éxito ya que alcanza una elevada resolución en profundidades y espesores característicos de la construcción.

Dos de las ventajas que presenta frente a otras técnicas de prospección son la rapidez con la que se obtienen resultados y la continuidad en el espacio de los perfiles de datos.

A menudo utilizado para el estudio previo de la geología y propiedades del terreno (Doolite y Asmussen, 1992; Saarenketo *et al.*, 1992) o la búsqueda de reservas minerales (Benson y Yuhr, 1992), de imperfecciones bajo pavimentos (Ma-

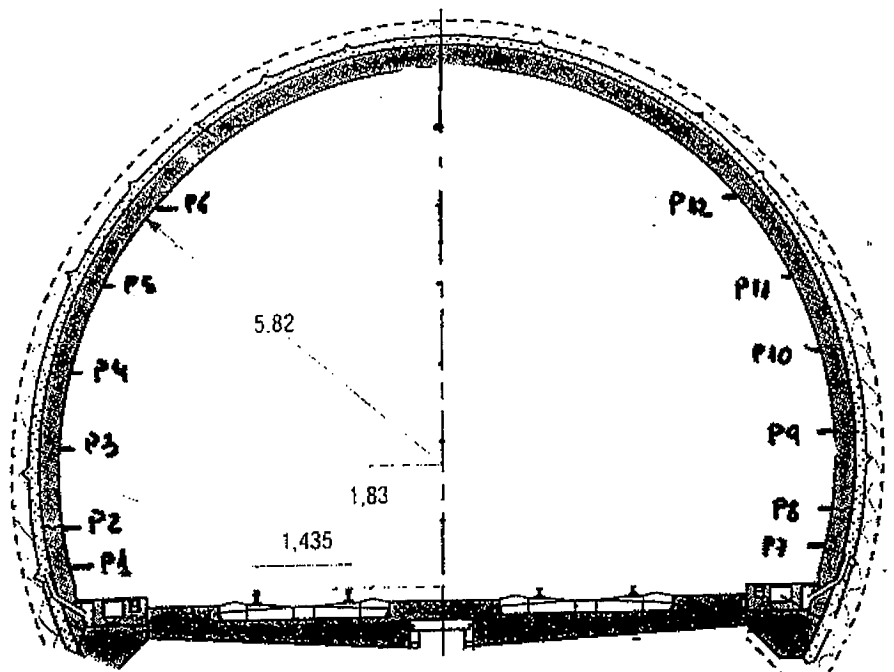


Fig. 1.- Esquema del túnel estudiado, con la situación de los perfiles realizados.

Fig. 1.- Scheme of the studied tunnel, indicating the emplacement of the radar profiles.

ser, 1992; Weil, 1992; Lau *et al.*, 1992; Lorenzo, 1994), en la determinación de daños y oquedades junto a las pilas y cimentaciones de puentes (Haeni *et al.*, 1992) o en arqueología (Lorenzo, 1994), ha sido empleado en este caso en la evaluación de los daños existentes en el revestimiento de la bóveda y hastiales de un túnel. El objetivo de este estudio es determinar la cantidad de hormigón necesaria para realizar las reparaciones sustituyendo el actual revestimiento de losas de granito por hormigón, cubriendo además los despegues y oquedades revocados por humedad y arrastre de aguas.

### Patología de la estructura

Debido a la humedad en el macizo granítico donde está excavado el túnel se han producido daños en la bóveda, provocando el desprendimiento de algunas losas de granito de su revestimiento. Debido al peligro que presenta esta situación se realizó un proyecto de sustitución de las losas del revestimiento por hormigón, y el relleno de las oquedades formadas entre el macizo y las mismas.

Esta solución es la más adecuada teniendo en cuenta la importancia de conservar el galibo del túnel para evitar posteriores reformas y modificaciones.

Antes de efectuar esta reparación, es interesante obtener datos previos que proporcionen un conocimiento de la situación geológica del macizo sobre el extradós del túnel, la calidad de la roca y el alcance de las patologías en la bóveda. Esta visión inicial del problema permitirá actuar en las zonas dañadas directamente minimizando costos.

Interesa también conocer el volumen de hormigón necesario para las reparaciones, manteniendo el galibo del túnel. El estudio planteado permite identificar el grosor de las losas del revestimiento y el estado del macizo tras dichas losas (oquedades en la zona de contacto entre macizo y revestimiento y grado de deterioro de las rocas graníticas). La evaluación del volumen a rellenar con hormigón es sencilla conocidos estos dos puntos.

### Equipo de geo-radar

Para realizar el análisis que exponemos se ha planteado una prospección geofísica con técnicas de geo-radar. Esta metodología que en principio permite una resolución correcta para las potencias de materiales esperados en este caso, ha de ser aplicada minuciosamente ya que la superficie no es horizontal, como habitualmente ocurre, sino que los perfiles

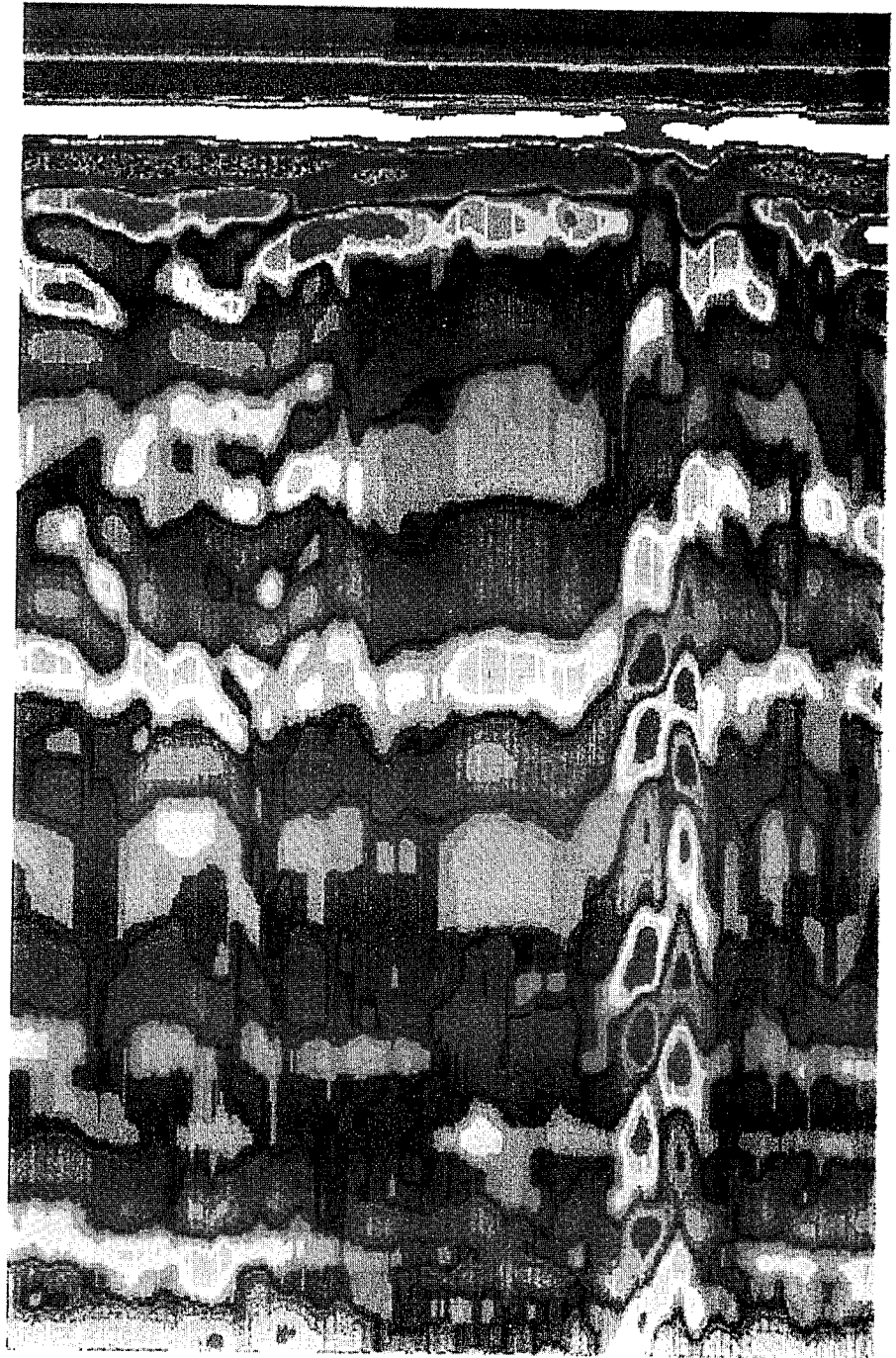


Fig. 2.- An example of the radar images obtained in the profile 1.

han de realizarse por la bóveda y hastiales del túnel.

Las técnicas empleadas son las mismas que las utilizadas para el estudio de suelos y pavimentos. El estudio del interior de un túnel ya ha sido realizado en algunas ocasiones con éxito (Westerdhal *et al.*, 1992) para el estudio de túneles excavados en glaciares.

La potencia que interesa estudiar es la ocupada por el revestimiento y la parte del macizo deteriorada hasta alcanzar la roca granítica inalterada. Para este estu-

dio se ha utilizado un geo-radar SIR10 de GSSI con una antena de frecuencia central 500 MHz. Esta antena ha sido escogida por tener potencia suficiente para alcanzar las profundidades necesarias y por su resolución vertical (una mayor resolución vertical la ofrecen antenas de impulsos de menor duración) que, considerada como un cuarto de la longitud de onda, depende tanto de la frecuencia de la antena como de la constante dieléctrica del medio. Como el macizo es granítico y son observables problemas de humedad,

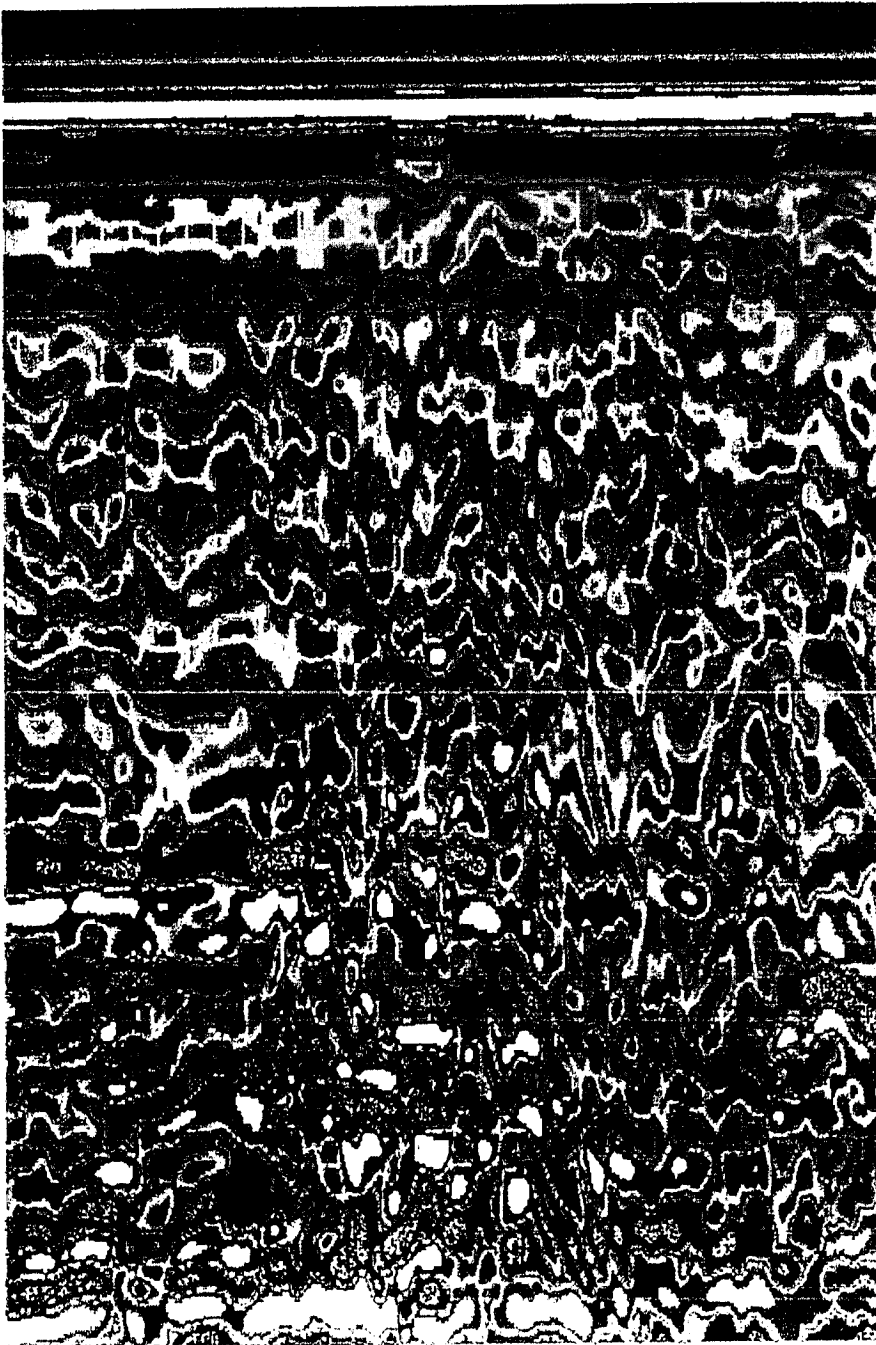


Fig. 3.- Detalle de radargrama obtenido en el perfil 4

Fig. 3.- Data detail of the results obtained in the profile 4..

la constante dieléctrica que se aconseja en este caso se sitúa entre 7 y 8, siendo la conductividad del mismo del orden de  $10^{-3}$ . La longitud de onda de la señal es el cociente entre la velocidad de la misma en el medio considerado y la frecuencia. La expresión que permite calcular la velocidad de la onda en un medio en función de sus constantes electromagnéticas y su frecuencia (Lorenzo, 1994) es el cociente

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} + 1 \right)}}$$

siendo  $\sigma$  la conductividad del medio,  $\epsilon$  la constante dieléctrica del material,  $\epsilon_r$  la constante dieléctrica relativa del material,  $c$  la velocidad de la onda electromagnética en el vacío y  $\omega$  la pulsación de la onda.

La resolución calculada para este tra-

bajo es, para el caso de constante dieléctrica más desfavorable de 0.06m. Un aumento de resolución vertical supone un aumento de la banda de frecuencias de la antena, lo que conlleva una disminución de la capacidad de penetración. La antena escogida es un compromiso entre ambos factores, utilizada a menudo en estudios sobre estructuras civiles.

Esta antena está apantallada para minimizar el ruido en los registros del georadar. Este ruido que se intenta evitar con el apantallamiento es ocasionado por la emisión de la propia antena. Parte penetra en el revestimiento del túnel, pero parte de la emisión se propaga por el aire. Esta última parte se refleja en los hastiales y bóveda y es detectada de nuevo por la antena como ruido sobre la señal de interés.

El estudio de los radargramas obtenidos en el túnel se ha efectuado en laboratorio mediante el software RADAN III de GSSI. El tratamiento efectuado sobre los datos ha consistido, en primer lugar en un filtrado vertical pasobanda de cinco puntos. Este proceso realiza un promediado de la señal cada cinco impulsos recibidos por el radar, eliminando el ruido que provocan las pequeñas irregularidades existentes en la superficie sobre reflexiones de la señal en objetos superficiales, aumentando la resolución vertical. Este proceso es adecuado para los registros más superficiales de los perfiles (Maijala, 1992) ya que se obtiene un resultado más claro que el registro original.

Otro tratamiento realizado ha sido un filtrado vertical pasoaltas que permite corregir efectos de línea base en la señal, producidos por anomalías de frecuencias más bajas que la del registro. Planteamiento del estudio y resultados obtenidos

Para cubrir la máxima superficie interior de la bóveda y hastiales del túnel se han realizado doce Perfiles a lo largo del túnel. El esquema de trabajo se muestra en la figura 1.

Este planteamiento del trabajo nos permitirá obtener una visión tridimensional de los daños en el macizo rocoso y del revestimiento del túnel, con la que podrá calcularse el volumen afectado. Los reflectores esperados son, en principio, el debido al contacto entre el revestimiento de losas de granito con el macizo granítico, los provocados por las oquedades generadas por deterioro de la roca a causa de la humedad y el que marca la separación entre la roca no deteriorada y la zona que presenta patologías. Esto permitirá conocer el grosor de las losas, la magnitud de las oquedades y la potencia de la

zona afectada por la humedad en el macizo. En la figura 2 presentamos una sección de uno de los registros obtenidos, en concreto el resultado del estudio del perfil 1 (figura 1). Pueden apreciarse las reflexiones características mencionadas. El espesor del revestimiento es de veinticinco centímetros. Bajo las losas de granito se observa una zona afectada de espesor variable en la que pueden apreciarse fisuras y oquedades por desprendimiento.

La zona más deteriorada se observa en la parte central de los perfiles. En ella se han detectado tanto humedad como oquedades. En la figura 3 se presenta el segmento central del registro obtenido en el perfil 4 (figura 1), donde son evidentes las fuertes reflexiones debidas a la humedad por debajo del revestimiento del túnel. Calculando el espesor total de la zona a restaurar en cada uno de los perfiles obtenemos el volumen de hormigón que será necesario para efectuar estas reparaciones conservando el gálibo del túnel.

#### Conclusiones

La problemática presentada en este estudio es frecuente en revestimientos de túneles, siendo necesario por seguridad efectuar las reparaciones y obras de mantenimiento necesarias sobre la estructura. Análisis con técnicas de prospección

geofísica pueden determinar qué estructuras están afectadas y el alcance de los daños. El geo-radar, como técnica de apoyo en trabajos de reparación y mantenimiento de túneles, es un instrumento efectivo que puede ofrecer datos de interés previos a los trabajos de restauración. Éstos permiten disminuir los costos y el tiempo, muestran los puntos conflictivos en los que es necesaria una actuación y evalúan la cuantía de los daños y la cantidad de material necesario para repararlos.

Los problemas que pueden surgir en un estudio de este tipo, en el que las superficies donde se desliza la antena no son horizontales, pueden ser solventados tras su análisis y con el empleo de los filtros adecuados en cada caso. Finalizado el tratamiento de los registros, la señal resultante contiene información suficiente para detectar las zonas donde existen patologías de importancia, y para poder determinar la extensión y el volumen de las mismas.

#### Referencias

- Benson, R. y Yuhr, L. (1992), 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. Geol. Surv of Finland, Special Paper, 16, p. 229-336.
- Doolite, J.A. y Asmussen, L. (1992), 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. Geol. Surv. of Finland, Special Paper, 16, p. 139-147.
- Haeni, F.P., Placzek, G. y Trent, R.E. (1992), 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. Geol. Surv. of Finland, Special Paper, 16, p. 285-292.
- Lau, C.L., Scullion, T. y Chan, P. (1992) 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. Geol. Surv. of Finland, Special Paper, 16, p. 277-283.
- Lorenzo, E. (1994): Tesis Doctoral. Univ. Pol. de Madrid. 200 p.
- Maijala, P. (1992), 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. Geol. Surv. of Finland Special Paper, 16, p. 103-110
- Maser, K.R. (1992), 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. Geol. Surv. of Finland, Special Paper, 16, p. 267-276.
- Saarenketo, T., Hietala, K. y Salmi, T. (1992), 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. Geol. Surv. of Finland, Special Paper, 16, p. 293-305.
- Weil, G.J. (1992), 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi, Finland. Geol. Surv. of Finland, Special Paper, 16, p. 259-266.
- Westerdahl, H., Austvik, R. y Kong, F.N. (1992), 4th Int. Conf. on G.P.R., Rovaniemi Finland. Geol. Surv. of Finland, Special Paper, 16, p. 41-45.