

Evaluación del radio de columnas de inyección mediante técnicas eléctricas

J.M. RUIZ FONTICIELLA (*), ROZYCKI, A. (**), J.M. MARTÍNEZ SANTAMARÍA (*) y A. DE LA CUADRA (*)

RESUMEN En este artículo se evalúan los radios de inyección conseguidos mediante la técnica de “super-jet grouting” utilizando técnicas de corriente continua. La posibilidad de utilizar, conjuntamente, dos métodos de inversión de los datos obtenidos, a través de una interpretación tomográfica o del modelado de un cilindro, permite resolver ciertas indeterminaciones que presentan ambos métodos por separado. La aplicación a una obra concreta, tratamiento del terreno en el muelle Ingeniero Juan Gonzalo del Puerto de Huelva, permite validar esta técnica.

EVALUATING THE RADIUS OF JET-GROUTING COLUMNS BY ELECTRICAL METHODS

ABSTRACT *Cylinder's radius obtained by a super jet grouting process can be evaluated employing the direct current method. Two kind of interpretation can be carried out to solve the problem. The first one is based on tomographic inversion and the second one uses a solution of the LaPlace equation applied to a simple cylinder model. Use of both interpretation methods allow lessening ambiguity in the determination of the cylinder radius. The interpreted data came from the works of terrain improvement developed on the Ingeniero Juan Gonzalo pier at the Puerto de Huelva.*

Palabras clave: Radio de inyección, Métodos eléctricos, Columnas de inyección.

Keywords: Radius of jet-grouting, Electrical methods, Jet-grouting.

1 INTRODUCCIÓN

Los tratamientos de inyección de lechada, a presión, con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas de un determinado suelo conllevan un cierto grado de indeterminación en el radio de la porción del terreno que se ve mejorado por el tratamiento. Un método que se está presentando como eficaz, en este control, es el descrito en este artículo y que se basa en los de inyección de corriente continua.

En un artículo anterior (Rozycki, et al, 2008), los autores presentaban las bases teóricas y apuntaban la posibilidad de utilizar dos métodos distintos para realizar la interpretación inversa de los datos obtenidos empleando técnicas de inyección de corriente continua aplicados a la determinación del diámetro equivalente de la inyección de lechada en el tratamiento de mejora del terreno utilizando técnicas de “jet-grouting”.

En ambos casos el problema se reduce a la resolución de la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (1)$$

En el primer método se realiza la inversión partiendo de una solución de esta ecuación (Dakhnov, 1947) para un modelo de cilindro de conductividad σ_c e inmerso en un medio semi-infinito y homogéneo de conductividad σ_e .

La solución de la ecuación (1) nos posibilita el cálculo de la resistividad aparente para un cilindro que se encuentra en un semi-espacio infinito y homogéneo y para cualquier dispositivo de medida situado en el eje Z (vertical) del cilindro.

Una segunda solución al problema pasa por una inversión tomográfica de los datos obtenidos mediante el mismo dispositivo de medida que en el caso anterior. Este proceso está suficientemente descrito en el artículo anterior por lo que no incidiremos sobre él.

En el estudio anterior se utilizó, exclusivamente, este último método demostrándose la posibilidad de determinar los diámetros (equivalentes) de inyección en diversos casos que fueron modelados para la ocasión. Con el desarrollo realizado, desde la publicación del artículo mencionado, en los algoritmos de cálculo podemos, en las páginas siguientes, afrontar el estudio de un caso real.

Se demostró en este artículo que, teóricamente, mediante los datos obtenidos a través de un dispositivo multielectrónico y una vez corregidos se podían tratar con una aplicación de inversión tomográfica.

Como se demuestra en el artículo mencionado, es esperable un margen de error del 5% en la estimación del radio de inyección.

El dispositivo de medida utilizado ha consistido en un sistema de electrodos, desplazables a lo largo de un sondeo, de manera que dos de ellos se utilizan como dispositivo inyector de corriente y otros dos como dispositivo de medida del potencial eléctrico generado. Las distintas distancias de penetra-

(*) Laboratorio Geotecnia del CEDEX.

(**) E.T.S.I de Minas de Madrid.

ción, medidas a partir del eje vertical del cilindro del cilindro, se consiguen variando las distancias de separación entre los dipolos de inyección y medida y la apertura de los mismos.

En este artículo se describen y se analizan los resultados de los ensayos realizados sobre unas columnas de inyección ejecutadas como parte de un tratamiento de mejora del terreno. Se han realizado las interpretaciones siguiendo los dos métodos descritos en el artículo anterior, y se hace un estudio comparativo de las soluciones proporcionadas por ambos obteniéndose conclusiones sobre su aplicabilidad.

2. CONSIDERACIONES GENERALES

Las inyecciones estudiadas corresponden a una de las unidades de obra del tratamiento de mejora del terreno que se ha realizado en el muelle Ingeniero Juan Gonzalo del Puerto de Huelva utilizando, entre otras, la técnica denominada "super-jet-grouting".

Dentro de estas actividades se realizaron una serie de ensayos encaminados a verificar y contrastar la efectividad de los tratamientos ejecutados.

Entre los ensayos propuestos estaban: la ejecución de ensayos "cross-hole", a distintas distancias, dentro del radio teórico de las columnas y en una muestra estadística de las mismas.

De entre todas las columnas ejecutadas se escogieron un número de ellas para realizar pruebas mediante las técnicas eléctricas objeto de este artículo. Para ello se realizó, en ellas, un sondeo, a destroza, en el centro del cilindro que permitiese la instalación del dispositivo de medida.

Los ensayos "cross-hole" permiten la medida de velocidades de ondas sísmicas (P y S), lo que conlleva, a su vez, determinar módulos dinámicos del material situado entre dos sondeos. Para su ejecución se hizo necesario la realización de cuatro sondeos por cada una de las columnas estudiadas, dos en la periferia de las columnas y otros dos en el diámetro que une los anteriores, situados a distintas distancias.

Con la técnica propuesta en este artículo sería necesaria la perforación de un solo sondeo ejecutado a destroza y situado en el centro de la columna de inyección. Su desventaja es que solo puede proporcionar información sobre el diámetro inyectado pero las propiedades mecánicas podrían ser determinadas mediante sondas de testificación (PS-logging o sonda acústica de onda completa). En este artículo se describen los resultados obtenidos en los sondeos denominados S7, S-8, S-255 y S-219. Los dos primeros corresponden a sondeos ejecutados en columnas realizadas en la fase de pruebas, los otros dos corresponden a fases de producción.

3. INVESTIGACIÓN DE COLUMNAS DE INYECCIÓN MEDIANTE RESOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE LAPLACE SOBRE UN MODELO CILÍNDRICO

Como se ha mencionado en la introducción la solución al problema planteado pasa por la resolución de la ecuación de Laplace (1) para un modelo de cilindro de dimensiones finitas con una resistividad conocida (ρ_c) inmerso en un sub-espacio infinito con una resistividad conocida (ρ_e). La solución a la ecuación para este modelo fue dada por Dakhnov (1947) mediante la expresión:

$$V_{r=0} = \frac{\rho_c I}{2\pi^2 r_c} \left[\frac{\pi}{2z} + \int_0^\infty P(m) \cos(mz) dm \right] \quad (2)$$

donde ρ_c es la resistividad del cilindro, V_r es el potencial en el eje, I la intensidad inyectada y P es una función del parámetro de integración m .

La determinación y explicación de todos los factores implicados en el desarrollo de esta ecuación fueron descritos en el artículo anterior (Rozycki et al, 2008) por lo que obviamos su descripción.

Esta ecuación nos determina el potencial medido en el eje del cilindro, mediante dos electrodos, para una inyección de corriente realizada a través de otros dos electrodos y para una resistividad y unas dimensiones determinadas del cilindro.

Por otro lado las medidas de campo nos permiten conocer, para cada uno de los puntos de la malla que se dibuja en la figura 1, la resistividad aparente a partir de la intensidad inyectada y del voltaje medido en el eje del cilindro a través de la expresión:

$$\rho_a = K \frac{V}{I} \quad (3)$$

donde K es la constante geométrica del dispositivo utilizado.

Para obtener esta distribución, bidimensional, de resistividades sería necesario como primer paso corregir los datos obtenidos en el campo, tridimensionales, para ajustarlos al caso de la Figura 1.

Para resolver el problema de la inversión, esto es; partiendo de esta resistividad aparente calcular la verdadera re-

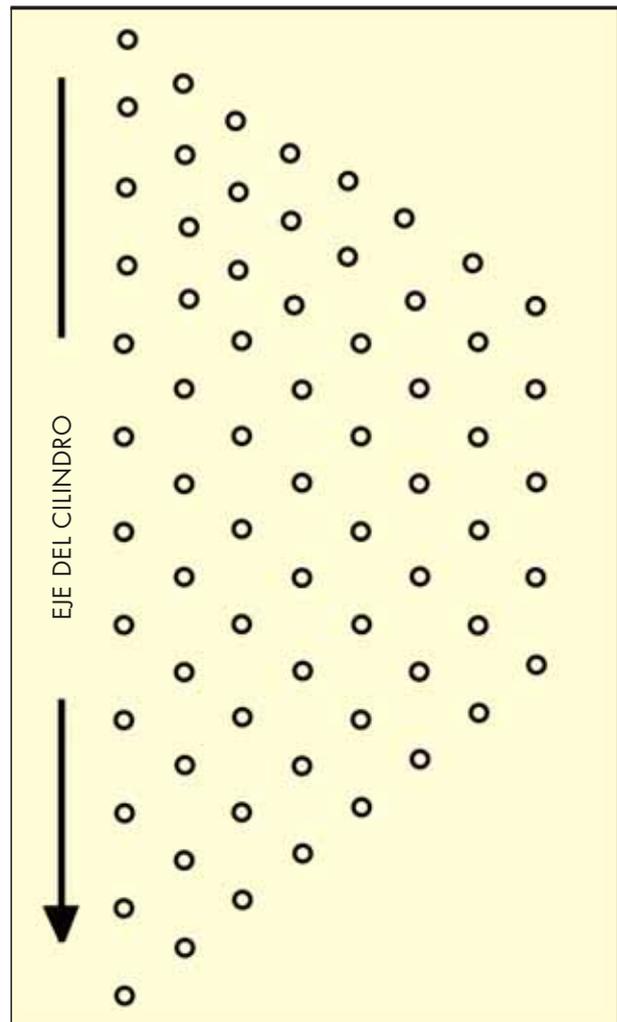


FIGURA 1. Malla de puntos donde se mide la resistividad aparente.

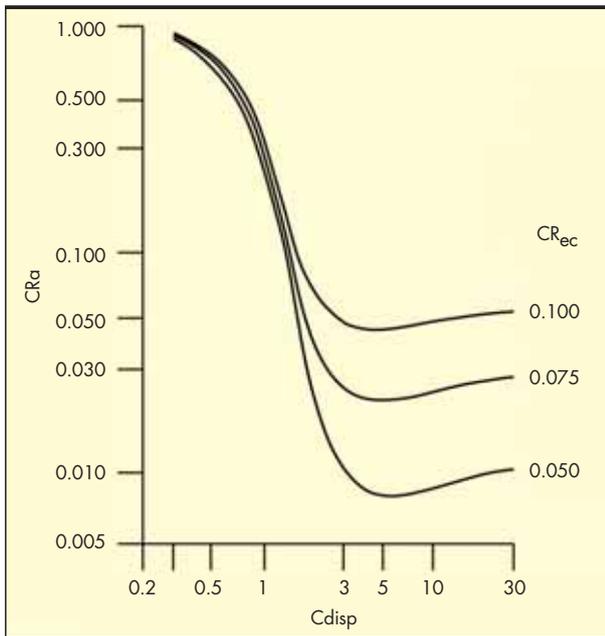


FIGURA 2. Un ejemplo de Familia de curvas para $\rho_c / \rho_a < 1$.

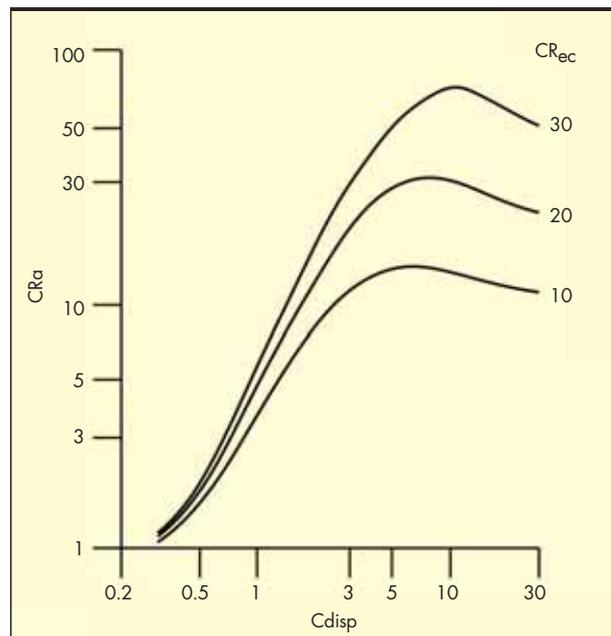


FIGURA 3. Un ejemplo de Familia de curvas para $\rho_c / \rho_a > 1$.

sistividad del cilindro, se ha comenzado por realizar una serie de familias de curvas que nos permitan calcular mediante interpolación esta resistividad. Estas curvas, que denotamos como CR_{ec} , representan la relación entre las resistividades del cilindro y la resistividad del medio y se han calculado en función de las variables CR_a y C_{disp} . En abscisas se representa la longitud del dispositivo frente al radio equivalente (igual que el radio del cilindro en el caso de un cilindro homogéneo) (C_{disp}).

En las ordenadas representamos la variable CR_a : relación entre la resistividad aparente medida y la resistividad del cilindro.

Para realizar estas curvas se ha procedido de la siguiente manera:

Partiendo de un modelo de un cilindro de radio r y resistividad ρ_c , inmerso en un medio de resistividad ρ_m , se calcula la diferencia de potencial (V), a diversas distancias del eje (las del dispositivo), mediante la expresión (2) a continuación calculamos la resistividad aparente que obtendríamos para el dispositivo mencionado aplicando la ecuación (3).

Se han calculado dos familias de curvas, compuestas cada una de ellas por 12 curvas; una para una relación de resistividades $\rho_c / \rho_a < 1$, de las que se representa en la Figura 2, y otra familia para la relación $\rho_c / \rho_a > 1$, que a su vez se muestra en la figura 3.

Las figuras mencionadas solo se pueden considerar un ejemplo ya que las familias de curvas no se han representado íntegramente para evitar complicar las imágenes.

Con estas funciones ya calculadas es rápido obtener el radio equivalente.

El principal problema que se plantea es el de determinar en qué curva de la familia nos movemos, ya que la relación CR_{ec} (resistividad del cilindro/ resistividad del medio) no nos es conocida de antemano, en los casos reales, aunque es evaluable mediante los valores asintóticos de la resistividad aparente. Es posible recurrir, también, a la bibliografía, si conocemos los materiales por los que atraviesa la columna, aunque el mejor método es, como se ha hecho en los casos aquí estu-

diados, medir estas resistividades mediante técnicas de testificación geofísica.

En el caso que nos ocupa, se han utilizado los sondeos perforados para su uso en los ensayos de cross-hole. Al estar distribuidos desde el centro hasta la periferia nos permite conocer la resistividad del núcleo y una resistividad en zona donde se supone que no ha llegado la inyección. De todas maneras esta última resistividad se puede determinar mediante sondeos eléctricos verticales (S.E.V) o tomografía eléctrica desde superficie y en zona no afectada por la inyección.

Aún con todo este proceso, no hay que olvidar que habrá que utilizar un valor aproximado o medio del cociente CR_{ec} ya que existirán las inevitables, por la propia naturaleza del terreno, variaciones que aumentarían al aumentar la heterogeneidad del terreno.

4. RESULTADOS

Sobre los cuatro sondeos utilizados se han realizado los dos tipos de interpretación propuestos: mediante el método del cilindro y con la interpretación topográfica.

Sondeo S-219: la interpretación topográfica nos permite evaluar el radio de inyección en 0,59 m. produciéndose, en apariencia, un ensanchamiento brusco de la columna hacia los 10 metros de profundidad (ver figura 4).

El método del cilindro permite determinar un radio de inyección más homogéneo y de una mayor amplitud (aprox. 0,72 m) proporcionando una mejor discriminación de variaciones de resistividad (ver figura 5).

La comparación entre ambos métodos y mostrada en la figura 6 permite observar un buen ajuste permitiéndonos confirmar que el ensanchamiento de la zona inferior es solo resultado de un aumento de la resistividad de la inyección provocando, así, un efecto de aumento en la imagen.

La escala vertical (depth) indica distancia (radio) al eje del sondeo que viene dado por el eje horizontal. Esto se cumple para todas las imágenes mostradas a continuación.

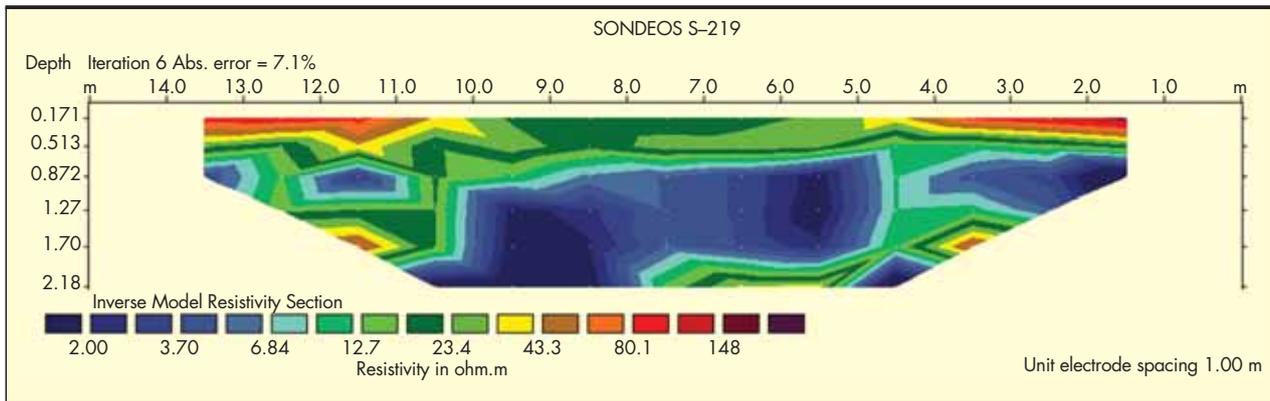


FIGURA 4. Interpretación tomográfica para el sondeo S-219.

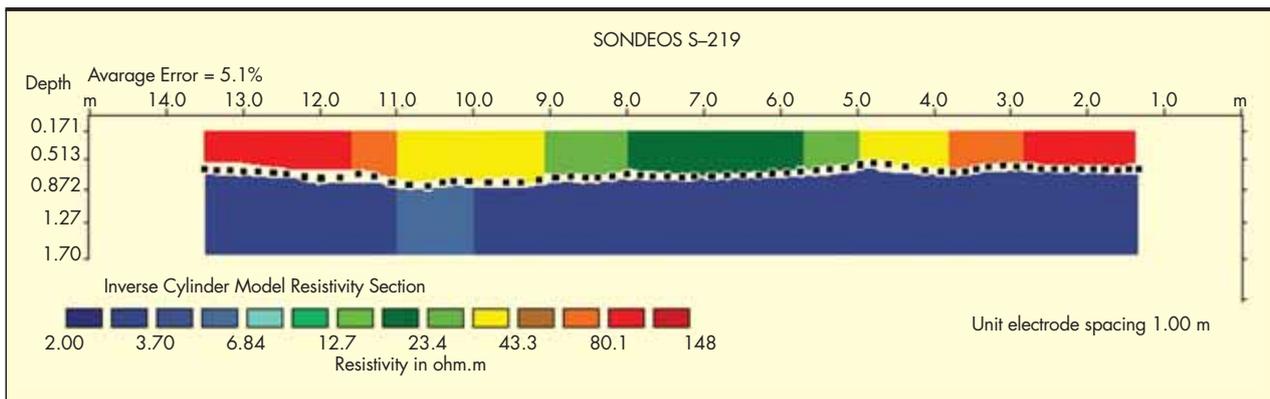


FIGURA 5. Radio y distribución de resistividades del cilindro y del medio para el sondeo S-219 obtenidas mediante el método del cilindro.

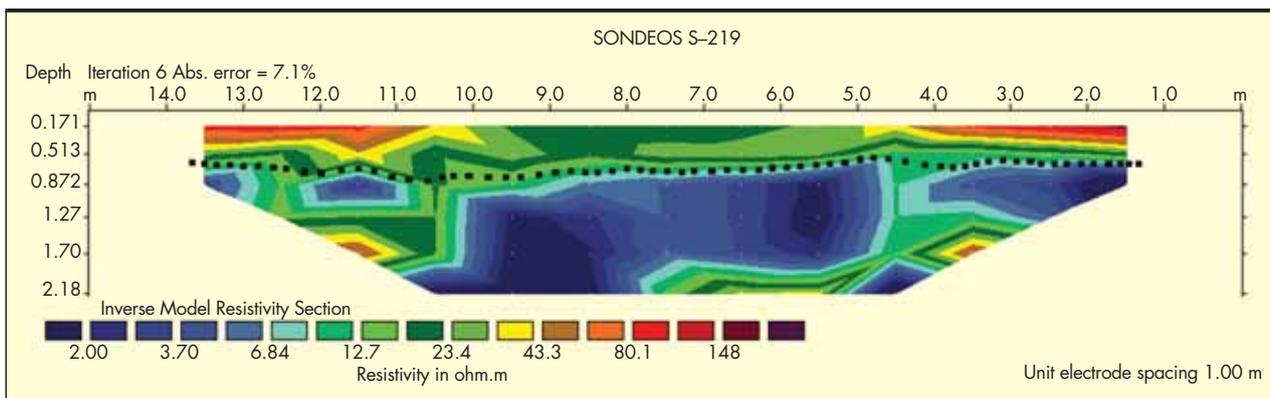


FIGURA 6. Comparación entre las dos imágenes anteriores.

En el sondeo S-255 se puede evaluar un radio, medio de inyección, de 0,8 m pero presenta mas heterogeneidades que el sondeo descrito anteriormente, lo que no hace fácil su evaluación (ver figura 7). El método del cilindro resuelve esta incertidumbre dando una línea de contacto mas nitida (ver figura 8). En esta imagen se puede observar una mayor penetración de la lechada a una profundidad de entre 10 y 13 metros con un radio de inyección de 1,15 m. Hasta los 6 metros se muestra una penetración mucho menor que no supera los 0,4 m.

No hay que olvidar que nos estamos refiriendo a radios equivalentes y que la penetración de la lechada en un terreno mas permeable puede llevar a una resistividad mas similar a la del terreno adyacente por una mayor dilución de la lechada. En la parte inferior se puede apreciar el efecto contrario, una mejor calidad del terreno original puede provocar una concentración de la lechada y un aumento de la resistividad pero con un radio de penetración menor.

En la figura 9 se comparan ambas soluciones.

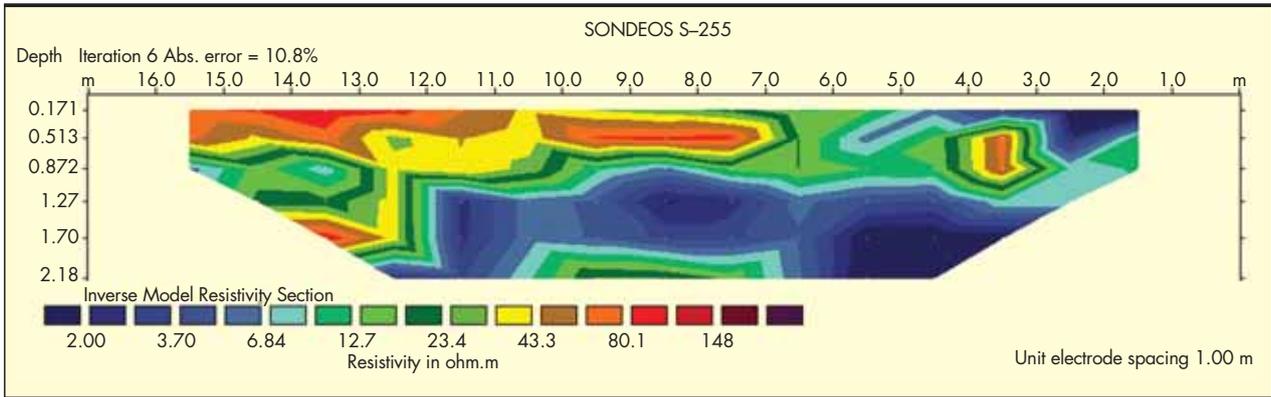


FIGURA 7. Interpretación tomográfica para el sondeo S-255.

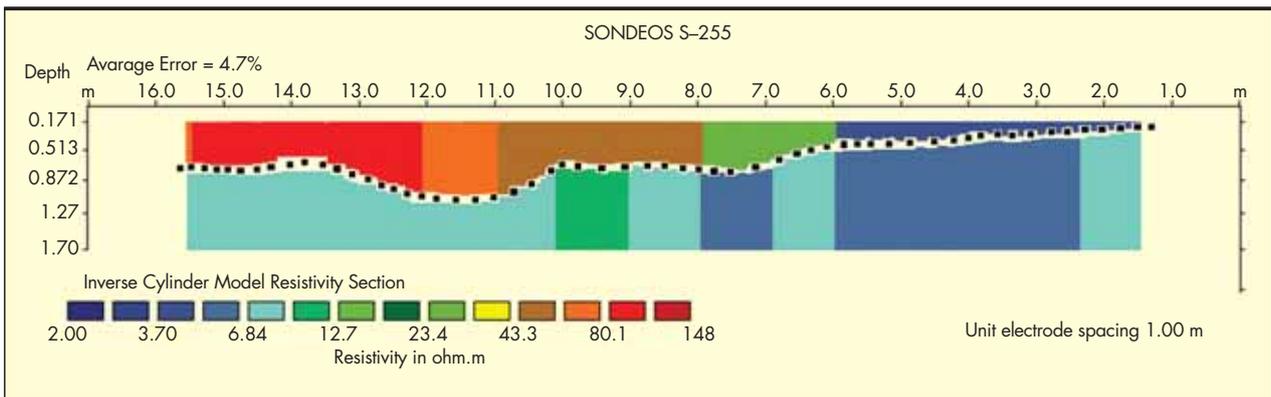


FIGURA 8. Radio y distribución de resistividades del cilindro y del medio para el sondeo S-255 obtenidas mediante el método del cilindro.

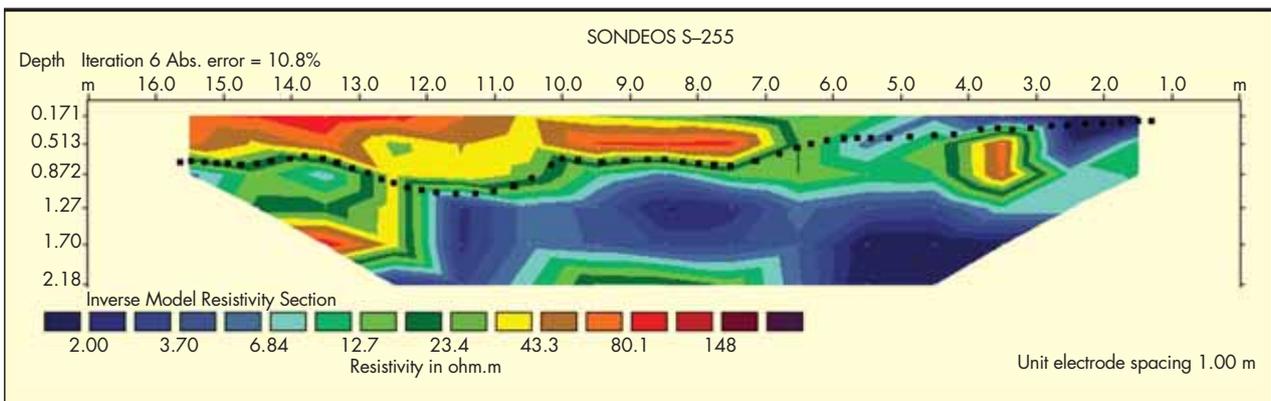


FIGURA 9. Comparación entre las dos imágenes anteriores.

Como ya se ha mencionado anteriormente los sondeos S-5 y S-8 corresponden a la fase de pruebas en los que se fijaron los parámetros de inyección.

En la columna 5 (S-5) la inyección media que se obtiene es de 1,8 m (Figura 10) y el método del modelo cilíndrico (figura 11) obtiene unos valores similares teniendo una coherencia elevada (ver figura 12) los dos métodos.

La columna 8 (S-8) presenta una mayor penetración en las zonas inferiores. Observando la escala de resistividades vemos que la columna 8 presenta un rango de resistividades

menores que la 5 lo que puede ser debido a una mayor calidad del terreno y una penetración bandeada.

5. CONCLUSIONES

Los métodos propuestos, en este artículo, para determinar los radios de la inyección conseguida mediante técnicas de “jet-grouting” y similares demuestran ser un camino acertado en la inspección rápida de este tipo de obras por lo que sería muy conveniente su desarrollo e introducción en la

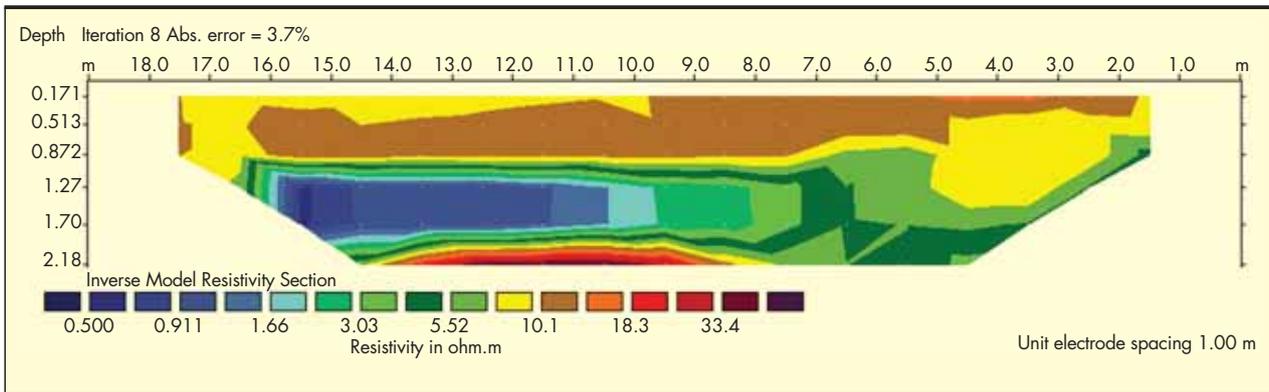


FIGURA 10. Interpretación tomográfica para el sondeo S-5.

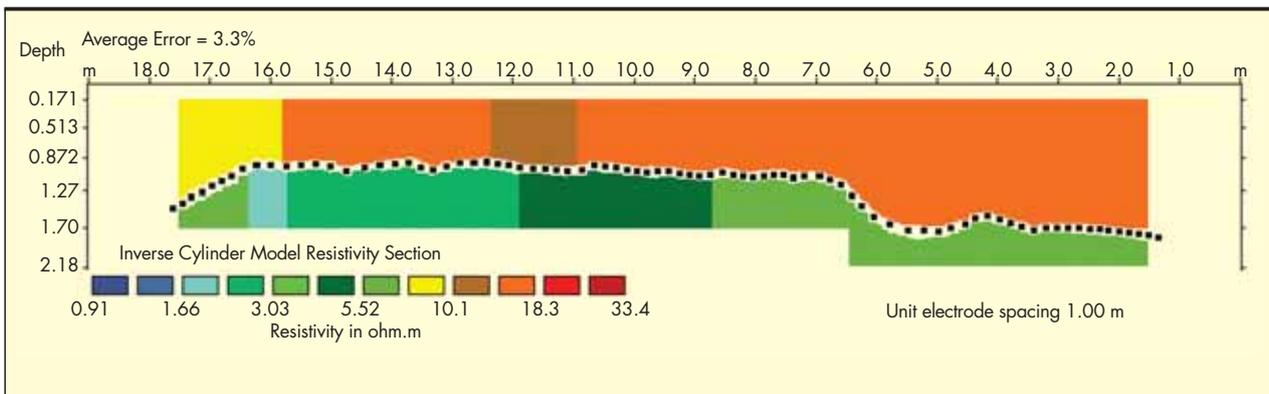


FIGURA 11. Radio y distribución de resistividades del cilindro y del medio para el sondeo S-5 obtenidas mediante el método del cilindro.

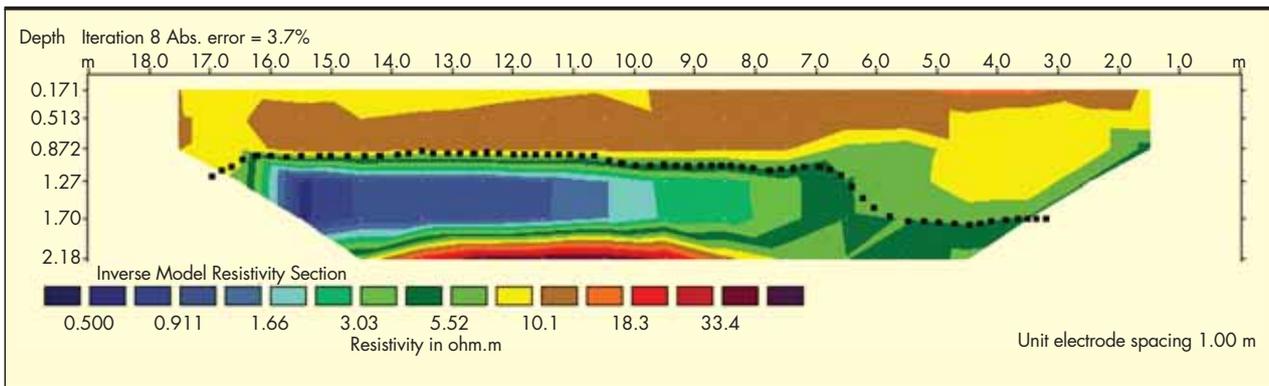


FIGURA 12. Comparación entre las dos imágenes anteriores.

práctica empresarial. El paso siguiente, podría ser, la ejecución de una columna de pruebas en la que se pudiera confirmar, mediante su excavación, el buen resultado de los ensayos en corriente continua.

Como conclusiones principales de este estudio se pueden reseñar:

- Mediante la técnica de Interpretación tomográfica no quedan, suficientemente claros, los límites entre el cilindro de inyección y el terreno natural, debido a la división del suelo en celdas.

- Mediante el método basado en el modelo del cilindro este límite queda muy bien definido pero en contrapartida el modelo es muy simple.
- Como la adquisición de datos de campo es común, para los dos métodos, es aconsejable la utilización conjunta de ambos para la resolución de las incertidumbres de cada uno.

6. AGRADECIMIENTOS

Las inyecciones estudiadas corresponden a una de las unidades de obra del tratamiento de mejora del terreno que se

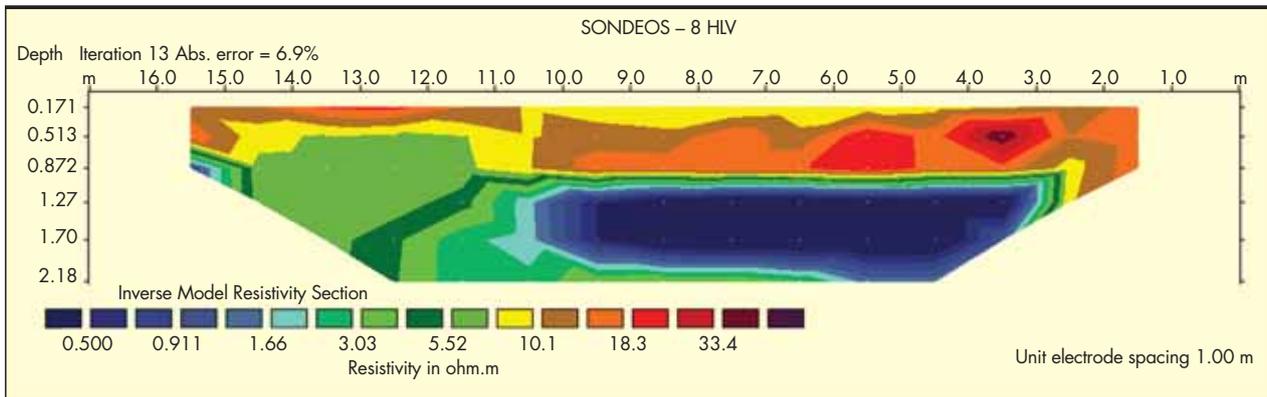


FIGURA 13. Interpretación tomográfica para el sondeo S-8.

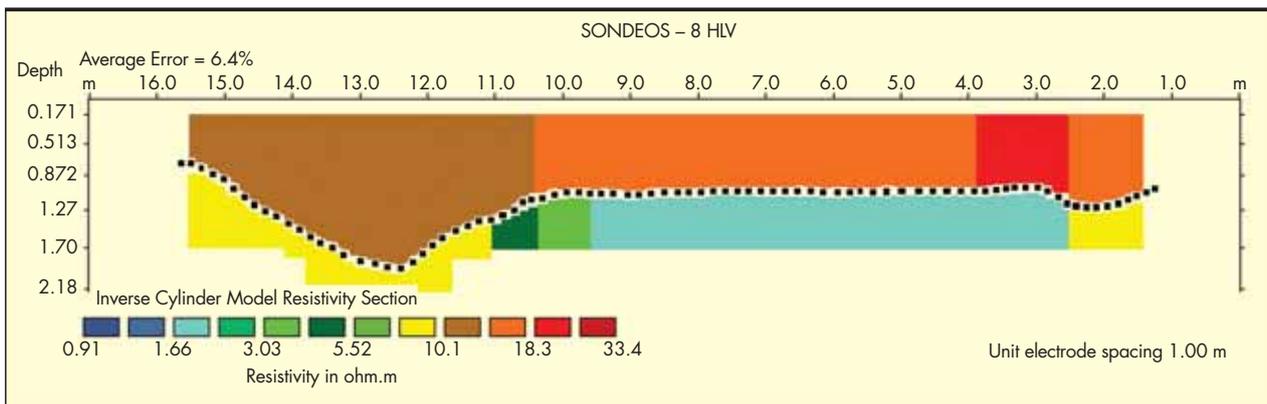


FIGURA 14. Radio y distribución de resistividades del cilindro y del medio para el sondeo S-8 obtenidas mediante el método del cilindro.

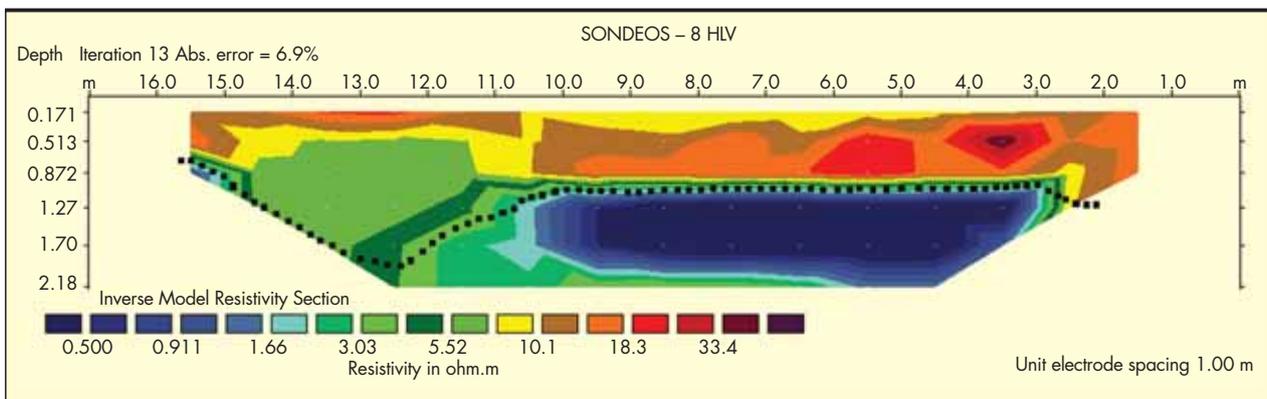


FIGURA 15. Comparación entre las dos imágenes anteriores.

ha realizado en el muelle Ingeniero Juan Gonzalo del Puerto de Huelva dirigida por la Autoridad Portuaria del mismo y ejecutada, mediante la técnica denominada “super-jet-grouting”, desarrollada por la empresa Keller Terra. El Laboratorio de Geotecnia del CEDEX intervino, a petición del Ente Público Puertos del Estado, como asesor de la Autoridad Portuaria de Huelva proponiendo el uso de esta técnica, obviamente experimental, que por su interés, contó con el apoyo incondicional, tanto de la Autoridad Portuaria como de la empresa Keller- Terra facilitando, ambas, la ejecución

de los ensayos y proporcionando todos los medios necesarios para la ejecución de los sondeos.

7. REFERENCIAS

- Dakhynov, V.N., 1947, Geofizicheskiy Karotaz, Gostoptekizdat, pp. 611, Moskva.
- Rozycki, A., J.M. Ruiz Fonticiella, A. de la Cuadra, J.M. Martínez Santamaría, 2008, Posibilidades de evaluación del radio de columnas de inyección mediante las técnicas eléctricas utilizando modelización numérica, Ingeniería Civil, no. 152, pp. 51-57.