

# Evaluación sobre la caracterización de distintos tipos de cimentaciones superficiales por medio de georradar

## *Evaluation of shallow foundations characterization by means Ground Penetrating Radar (GPR)*

Óscar Pueyo Anchuela<sup>1</sup>, Pedro López Julián<sup>2</sup>, José Ángel Pérez Benedicto<sup>2</sup>, Juan Ignacio Bartolomé<sup>3</sup> y Andrés Pocoví Juan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza, España. opueyo@gmail.com, apocovi@unizar.es

<sup>2</sup> Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (Zaragoza), España. pllopez@unizar.es, joanpebe@unizar.es

<sup>3</sup> Geoscan SLP Consultoría. jibartolome@geoscan.es

### ABSTRACT

*At retrofitting of buildings or at building damages analysis, the identification of footing characteristics is of high interest. The application of GPR for determining the size, depth and characteristics of footing is usual, due to the non-invasive character of this technique, the possibility to be performed at urban environments and the relatively fast survey. In this work three different footing types are evaluated; a reinforced concrete slab, isolated footing and isolated footing over shaft foundation. The objective of the analysis is to evaluate the potential identification of the foundation size, and especially, as the construction characteristics are known, to check the identification availability of the lower foundation limit (or footing depth). The presence of inverse propagation velocity contacts at the footing base, the wave phase change related to higher reflective media in the profiles, the propagation of multiple reflections or the changes of propagation velocity between the foundation and the natural soil are the main challenges in the exact identification of the foundation characteristics.*

**Key-words:** GPR, foundation characterization, concrete slab, footing, shaft foundation.

### RESUMEN

*En la rehabilitación de edificaciones o en el estudio de patologías constructivas la identificación de las características de los elementos portantes es de alto interés. La aplicación del georradar para la caracterización de la extensión y profundidad de dichos elementos es habitual por poderse realizar de forma no invasiva y con relativa rapidez. En este trabajo se aborda la caracterización de 3 tipos de cimentaciones superficiales habituales: una losa de cimentación, zapatas aisladas y zapatas aisladas sobre pozos de cimentación. El objetivo del análisis realizado es evaluar la potencial identificación de dichos elementos, pero sobre todo, dado que se conocen sus características constructivas, evaluar la capacidad de identificación de su base (cota de apoyo). La presencia de contrastes inversos de velocidad en la base de dichos elementos, el desfase producido por la presencia de medios de mayor reflectividad, la generación de reflexiones múltiples o los cambios de velocidad de propagación asociados a dichos elementos pueden definir problemas en su identificación exacta.*

**Palabras clave:** georradar, caracterización de cimentaciones, losa, zapata, pozos de cimentación.

*Geogaceta*, 60 (2016), 123-126  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 5 de febrero de 2016  
Revisión: 20 de abril de 2016  
Aceptación: 20 de Mayo de 2016

## Introducción

La prospección geofísica por georradar consiste en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas moduladas en un medio. La emisión y recepción de ondas se produce desde la superficie y las ondas retornadas provienen de la reflexión en cambios en el subsuelo. La reflexión se produce por cambios en las propiedades eléctricas y magnéticas del medio (constante dieléctrica). En medios naturales, esta reflexión se debe principalmente a variaciones en el contenido en agua (además de variaciones del contenido en materia orgánica, óxidos de hierro, sales disueltas, mineralogía, ...; e.g.

Van Dam y Schlager, 2000). En medios antrópicos estas reflexiones se deben principalmente a la presencia de cambios de los materiales constructivos o alteraciones del medio natural. Los resultados de la prospección geofísica por georradar dependen también de las frecuencias utilizadas.

La evaluación de cimentaciones es una aplicación habitual del georradar (ver por ejemplo Abbas *et al.*, 2005; Booth *et al.*, 2010 o De Domenico *et al.*, 2013). Sin embargo, la presencia de elementos de alta reflectividad en el subsuelo puede complicar la identificación de otros elementos por debajo del techo de las cimentaciones. Los cambios de la velocidad de propagación

pueden producir progresiones positivas de la velocidad al pasar de medios constructivos a naturales como inversas (dependiendo del tipo y estado del suelo y de las características del material constructivo). Por evaluar un ejemplo, el hormigón tiene valores de la constante dieléctrica entre 6 y 8; mientras que los suelos arcillosos pueden variar entre 3 y 15 (Reynolds, 1997). Cuanto más húmedo es el suelo, mayor el valor de la constante dieléctrica, de la conductividad del suelo, y menor la velocidad de propagación.

En los casos en que la base de un elemento de cimentación define un cambio relacionado con un descenso de velocidad, la

reflexión relacionada con el contacto inferior será más compleja de ser evaluada que en el caso contrario. La caracterización en planta de la extensión de dichos elementos suele ser sencilla en el análisis de cimentaciones, pero la base de las mismas puede presentar resultados ambiguos.

Con el objetivo de evaluar los alcances en dicha caracterización, se presentan en este trabajo un grupo de perfiles de georradar realizados en medios en los que se disponía de información previa y donde la geofísica ha podido ser utilizada como técnica de control de las características constructivas de varios elementos portantes. Para este análisis se evalúan 3 tipos de cimentaciones: i) losa armada, ii) zapatas aisladas y iii) zapatas aisladas apoyadas sobre pozos de cimentación. Esta evaluación se realiza con cálculos sencillos sobre la velocidad de propagación o la resolución obtenible para las frecuencias centrales de los equipos utilizados que son de aplicación habitual en la prospección geofísica por georradar. Sin embargo, estos factores pueden variar ampliamente en función de las condiciones del terreno (ver por ejemplo Pérez García *et al.*, 2009; Rial *et al.*, 2009 o Slowik, 2012).

## Resultados

### Caso 1: Losa de cimentación

Se trata de la prospección de una losa de cimentación con un espesor de 1 m, con dos niveles de armado embebidos y un nivel de

hormigón de limpieza localizado en la vertical del elemento a modo de homogenización topográfica. Se han utilizado en la prospección equipos con frecuencias centrales de 100, 250 y 500 MHz. Los objetivos eran evaluar la estructura interna de la losa con distintos grupos de antenas, determinar el límite inferior de la misma y la estructura interna del material natural.

Los perfiles realizados (Fig. 1A) permiten identificar con diferente grado de profundidad y resolución el mismo elemento. Si se evalúan los datos teóricos para cada grupo de antenas utilizadas, la propagación en el vacío de dichas ondas y los resultados obtenidos de la prospección, los registros relacionados con los elementos conocidos son difícilmente identificables con las antenas de 100 MHz (longitud de onda en el vacío,  $\lambda$ , entre 1 y 1,2 m), puede identificarse la base de la unidad a partir del equipo de 250 MHz ( $0,5 < \lambda < 0,4$  m) y es evidente en el caso de los perfiles de 500 MHz ( $0,21 < \lambda < 0,24$  m; Fig. 1B). La resolución vertical puede calcularse de forma general entre  $\lambda/2$  y  $\lambda/4$ , por lo que los 3 equipos deberían ser, a priori, capaces de resolver el elemento portante. En referencia a la caracterización de los niveles inferiores a los elementos portantes analizados la penetración es diferente en función de los equipos. Se identifican anomalías o cambios en el subsuelo que no se deben a la propagación de variaciones más someras, criterio utilizado para identificar la presencia de nuevas reflexiones, en los registros de 100 MHz, sólo puntualmente ante la presencia de algunas variaciones estructurales en el caso de

250 MHz, y no puede penetrarse por debajo del límite inferior del elemento portante con los equipos de 500 MHz. En este caso el límite del elemento se relaciona con la presencia de anomalías puntuales de alto contraste relacionadas con la estructura de varillas incluida en la base de la cimentación. Por otro lado, la estructura interna del elemento portante no parece homogénea, se identifican anomalías puntuales en su interior, contactos laterales netos que son interpretados como relacionados con el estilo constructivo y donde las geometrías de acomodación identificadas no afectan al límite inferior del elemento portante.

### Caso 2: Zapatas aisladas

En el segundo caso analizado se realizó prospección geofísica por georradar en las proximidades de pilares que se encuentran localizados en el centro de elementos portantes aislados (zapatas). La serie está compuesta por una solera superficial y una zapata de morfología cuadrangular con base localizada a 1 m de profundidad. En la figura 2A, se incluyen dos perfiles de georradar realizados con antenas de 250 y 500 MHz. En ambos casos se identifican los contactos laterales del elemento portante con el terreno circundante. La zapata está definida como un medio mucho más reflectivo delimitado por contactos de alta pendiente (subverticales) en el caso de los perfiles realizados con el equipo de 250 MHz, mientras que en el caso de los equipos de

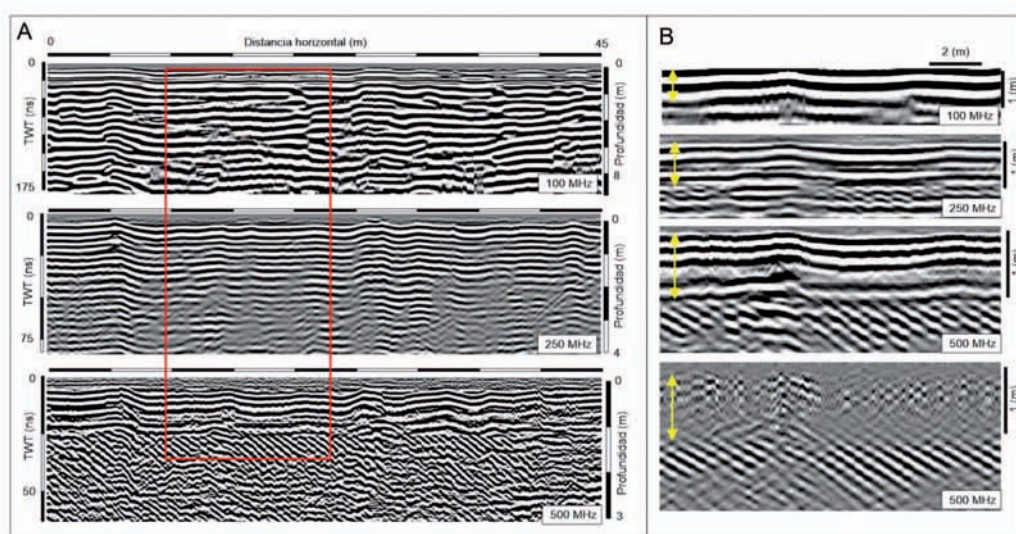
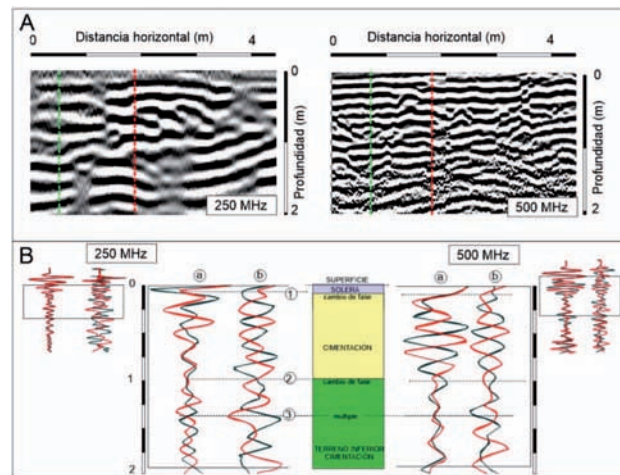


Fig. 1.- A) Perfiles de georradar realizados sobre una estructura de losa de cimentación para antenas de 100, 250 y 500 MHz. B) Detalles de los perfiles previos con el espesor conocido del elemento portante evaluado (en el caso del perfil de 500 MHz se incluye un segundo procesado en el que se ha eliminado el frente medio de los disparos del perfil de estudio). Ver figura en color en la Web.

Fig. 1.- A) GPR profiles developed over a slab foundation for different antennas: 100, 250 and 500 MHz. B) Detail of previous profiles with the known thickness of the foundation (in the case of 500 MHz profile a second processing is included where a subtract mean trace filter has been applied). See colour figure on the Web.

500 MHz la parte exterior del elemento muestra morfologías más irregulares.

Además de la evaluación de los perfiles obtenidos, se ha realizado el análisis de dos grupos de trazas individuales de los perfiles considerando un sector exterior al elemento portante y otro en su interior para los dos grupos de antenas (Fig. 2B). El conocimiento de la serie constructiva permite comparar los registros y realizar consideraciones sobre los cambios identificados. Por un lado, identificada la superficie topográfica de prospección (excluida la onda directa), se puede comprobar cómo los registros en los que se ha excluido el frente de ondas común para el perfil, muestra una inflexión en su progresión en la base de la solera (punto 1 en registro b; Fig. 2B), mientras que en el caso en que dicha onda no ha sido eliminada del registro, el acoplamiento relacionado con la superficie de estudio enmascara la identificación de cualquier cambio en este intervalo. Por otro lado, tras este contacto se identifica un desfase de los registros localizados en el interior y exterior del elemento, tanto por la definición de un reflector en el contacto que cambia la fase de la onda, como también por la presencia de una variación de la velocidad de propagación entre el interior y el exterior del medio. El contacto inferior del elemento portante se identifica como una reducción de la amplitud neta en el caso de los registros de tipo a), mientras que en el caso del registro b) apenas se identifica dicho cambio. En los registros por debajo de dicho contacto se identifica la morfología esperable para la onda en un medio homogéneo siendo el primer cambio neto identificado el asociado a un elemento localizado por debajo de la cota del límite descrito (punto 3 en los registros). Este punto se relaciona con una reflexión múltiple del interior del elemento portante superior. En este caso, se puede identificar el contacto inferior del elemento portante pero éste no muestra un reflector neto claro, y el identificado con mayor desarrollo en los registros realmente no se relaciona con un elemento real en el subsuelo. En este sentido, el paso de un medio con mayor velocidad de propagación a un medio natural de menor velocidad, podría ser el origen de una ausencia de reflexiones primarias en dicho intervalo. Este desfase es mucho más evidente en el caso de los perfiles realizados con el equipo de 250 MHz (registro "a" en Fig. 2B).



**Fig. 2.- A)** Perfiles de georradar coincidentes realizados con antenas de 250 y 500 MHz sobre la localización de un elemento portante aislado. Se incluye la localización de las trazas analizadas en B). **B)** Registros puntuales de las ondas analizadas a lo largo de los perfiles de 250 y 500 MHz comparado con los elementos conocidos de la cimentación. Los registros incluidos presentan dos procesados, siendo b) en el que se ha realizado la eliminación del frente de ondas común para el perfil analizado. (1) Contacto entre la solera y la cimentación, (2) contacto entre la cimentación y el terreno natural y (3) reflexión múltiple identificada. Ver figura en color en la Web.

*Fig. 2.- A) Coincident GPR profiles carried out with 250 and 500 MHz antennas over the extension of an isolated foundation. The locations of the studied traces analyzed in B) are marked. B) Trace analysis for both groups of antennas and over the foundation and the expected natural media surrounding it. At b) processing of subtract mean trace has been carried out. The identified main changes are 1) contact between the slab and the footing, 2) lower contact from footing and the natural media, 3) multiple reflections identified in the GPR-profiles. See colour figure on the Web.*

### Caso 3: Zapatas sobre pozos de cimentación

El tercero de los casos de estudio se realizó siguiendo la misma metodología de prospección definida en el caso anterior y en el que se conocía la presencia de una serie compuesta por una solera, bajo la cual, y como elemento portante, se desarrollaba un pozo de cimentación. En el caso anterior se identificaba la presencia de reflexiones múltiples en el subsuelo que dificultaban la identificación del contacto inferior del elemento portante. En este caso, una evaluación de los registros de georradar permite identificar reflexiones múltiples de elementos superficiales que aparecen como propagadas en profundidad pero no asociadas a cambios reales en el subsuelo, es decir por debajo de la localización del elemento portante (hasta 6-8 m) siendo su profundidad real inferior a los 3 m (Fig. 3A).

El estudio detallado (Fig. 3B) permite identificar una unidad superficial homogénea (solera) y la extensión en profundidad de un medio reflectivo limitado lateralmente por límites de alta pendiente. En el caso de las trazas analizadas, el cambio asociado al límite superior de la cimentación viene marcado por un cambio

de la polaridad de la onda, la generación de un desfase progresivo en el subsuelo y un cambio de la pendiente de la traza en los perfiles. Las mayores reflexiones se identifican a cotas inferiores a la base real de la cimentación que se interpretan como reflexiones múltiples de elementos asociados al elemento portante superior y no relacionados con cambios reales de la estructura del terreno en el subsuelo. La extensión vertical, de dicho elemento se puede identificar por i) la presencia de un medio relativo atenuante en la posición donde debería estar el límite inferior, y ii) la variación relativa de la extensión lateral del elemento como indicador de la presencia de variaciones asociadas a la sección del elemento.

### Discusión y conclusiones

Se ha realizado el análisis de varias tipologías de elementos portantes con georradar en contextos en los que se conocían sus características. El objetivo ha sido determinar la fiabilidad, certidumbre y resolución obtenible por medio de georradar en su caracterización. Dado que la aplicación del georradar es una técnica no invasiva y aplicable en contextos urbanos, construidos y que suministra resultados con

relativa rapidez, puede ser de interés conocer sus alcances en contextos en los que se pretende la rehabilitación, caracterización de cimentaciones o evaluación de patologías constructivas.

Se han evaluado varios tipos habituales de cimentaciones en los que puede interesar tanto la extensión en planta (dimensiones) como su cota de apoyo. Excepto en el caso de la prospección realizada sobre losa de cimentación con antenas de 500 MHz, en el que las anomalías asociadas al varillaje definían claramente su límite inferior y donde no existía penetración efectiva por debajo de dicho límite, en el resto de casos la identificación de dicho contacto inferior no ha sido inequívoca. En el caso de las zapatas aisladas se identificaba tanto el cambio relativo lateral del elemento como la identificación indirecta de su extensión a partir del desfase de onda relacionado con la variación de la velocidad de propagación entre el medio constructivo y anexo al mismo. Este desfase podía identificarse también por debajo de la posición real del elemento. La resolución de las antenas permitía identificar cambios estructurales más progresivos en equipos de alta frecuencia frente a límites más netos en los equipos de menor resolución. Estos aspectos podían relacionarse tanto con la propia resolución de los equipos como por la presencia de desbordamientos del relleno o la presencia en condiciones superficiales de límites más progresivos relacionados con la excavación previa.

En el caso de la identificación de la profundidad alcanzada por el elemento portante,

salvo en casos en que la sección variaba con la profundidad y se podían identificar cambios asociados a la extensión del elemento portante, el límite inferior puede ser más complejo de determinar. En los casos planteados, conocidas las características del elemento y profundidad, existían cambios en los registros que permitían identificar dichos límites. Estos límites venían asociados a una pérdida de definición de los registros, ausencia de reflexiones en el intervalo asociado al contacto y donde los límites identificados a cotas más profundas, de mayor contraste, se relacionaban con múltiples en el subsuelo sin relación directa con el elemento de estudio.

Estos resultados sugieren el especial cuidado necesario en la interpretación de los contactos inferiores de elementos portantes, y el grado de certidumbre que su identificación puede suponer en casos en los que no se dispone de información previa y en los que es recomendable el uso de antenas de diferentes frecuencias en su caracterización. En lo que respecta a la extensión en planta, los resultados obtenidos, permiten su identificación en sección tanto por los cambios asociados a los elementos analizados, como a partir de evaluaciones indirectas relacionadas con los desfases asociados a los cambios de velocidad, el cambio de fase de la onda asociada a reflexiones o por la extensión en profundidad de los ecos, reverberaciones y múltiples superficiales asociadas a dichos elementos.

Por otro lado, en casos en que no existe información previa y la interpretación del origen de las anomalías y registros obtenidos no puede contrastarse, los resul-

tados aún así pueden utilizarse de forma eficaz para evaluar la homogeneidad de las cimentaciones y la realización de análisis comparativos entre distintos elementos.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por las ayudas a Grupos de Investigación del Gobierno de Aragón (Grupo Geotransfer-E27). Los autores quieren agradecer las sugerencias realizadas por el editor Carlos L. Liesa Carrera y dos revisores anónimos.

## Referencias

- Abbas, A.M., Kamei, H., Helal, A., Atya, M.A., y Shaaban, F.A. (2005). *Archaeological Prospection* 12, 167-176.
- Booth, A.D., Clark, R.A., Hamilton, K. y Murray, T. (2010). *Archaeological Prospection* 17, 103-116.
- De Domenico, D., Teramo, A. y Campo, D. (2013). *Journal of Geophysics and Engineering* 10, 034007.
- Pérez-Gracia, V., Di Capua, D., González-Drigo, R. y Pujades, L. (2009). *NDT & E International* 42, 336-344.
- Reynolds, J.M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley, Chichester, England, 796 p.
- Rial, F.I., Pereira, M., Lorenzo, H., Arias, P. y Novo, A. (2009). *Journal of Applied Geophysics* 67, 367-373.
- Śłowik, M. (2012). *Journal of Applied Geophysics* 85, 1-14.
- Van Dam, R.L. y Schlager, W. (2000). *Sedimentology* 47, 435-449.

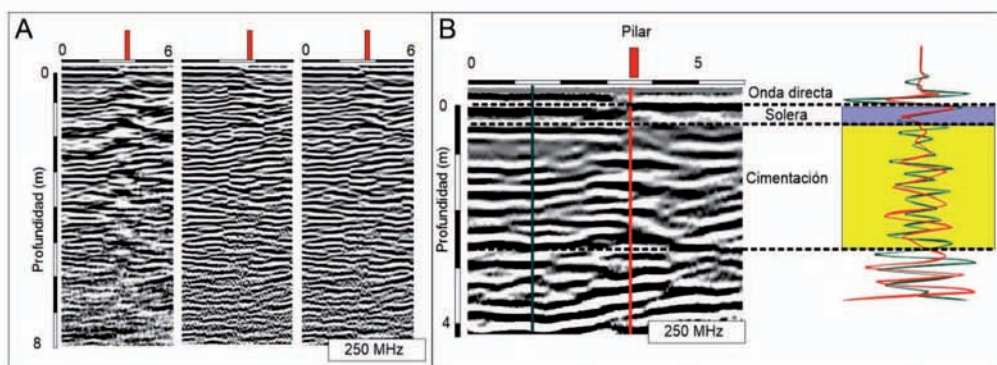


Fig. 3.- A) Perfil de georradar realizado con antenas de 250 MHz y donde se presentan distintos procesados. El perfil se realizó en las inmediaciones de un elemento portante aislado asociado a un pozo de cimentación. Se indica la localización del pilar central del elemento portante en los perfiles. El objetivo de estos perfiles es la identificación de una propagación vertical del elemento en el subsuelo sin relación con variaciones reales de la estructura del terreno. B) Análisis detallado del elemento portante estudiado en el que se realiza un análisis de varias trazas y se comparan con los datos disponibles del elemento constructivo en el subsuelo. Ver figura en color en la Web.

Fig. 3.- A) GPR profile carried out with 250 MHz antennas with different processing routines. The profile was carried out surrounding a footing over a shaft foundation. The location of the central pillar is included in the profiles. The objective of these profiles is the identification of a vertical propagation of non-actual changes in the underground. B) Detailed analysis of the GPR profile where several traces are evaluated and compared with the known construction characteristics of the analyzed foundation. See colour figure on the Web.