

Organizers:



REHABEND 2016

Euro-American Congress

CONSTRUCTION PATHOLOGY, REHABILITATION TECHNOLOGY AND HERITAGE MANAGEMENT

Burgos (Spain) - May 24th-27th, 2016

Sponsor entities:



REHABEND 2016

**CONSTRUCTION PATHOLOGY, REHABILITATION TECHNOLOGY AND
HERITAGE MANAGEMENT**

(6th REHABEND Congress)

Burgos (Spain), May 24th-27th, 2016

PERMANENT SECRETARIAT:

UNIVERSITY OF CANTABRIA

Civil Engineering School

Department of Structural and Mechanical Engineering

Building Technology R&D Group (GTED-UC)

Avenue Los Castros s/n 39005 SANTANDER (SPAIN)

Tel: +34 942 201 738 (43)

Fax: +34 942 201 747

E-mail: rehabend@unican.es

www.rehabend.unican.es

REHABEND 2016

ORGANIZED BY:



UNIVERSITY OF CANTABRIA (SPAIN)
www.unican.es // www.gted.unican.es



UNIVERSITY OF BURGOS (SPAIN)
www.ubu.es

CO-ORGANIZERS ENTITIES:



UNIV. ARGENTINA JOHN F. KENNEDY (ARGENTINA)



UNIV. ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUIDA FILHO" (BRAZIL)



UNIVERSIDAD AUSTRAL (CHILE)



TECNALIA (SPAIN)



UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO (SPAIN)



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA (SPAIN)



POLITÉCNICO DI BARI (ITALY)



UNIV. MICHOACANA SAN NICOLÁS HIDALGO (MEXICO)



UNIV. NACIONAL AUTÓNOMA (MEXICO)



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA (PERU)



UNIVERSIDADE DE AVEIRO (PORTUGAL)



UNIV. DE LA REPÚBLICA (URUGUAY)



UNIVERSITY OF MIAMI (USA)

CONFERENCE CHAIRMEN:

LUIS VILLEGAS
JUAN MANUEL MANSO

CONGRESS COORDINATORS:

IGNACIO LOMBILLO
JOSÉ MANUEL GONZÁLEZ
JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ
HAYDEE BLANCO
YOSBEL BOFFILL

EDITORS:

LUIS VILLEGAS
IGNACIO LOMBILLO
HAYDEE BLANCO
YOSBEL BOFFILL

INTERNATIONAL SCIENTIFIC ADVISORY COMMITTEE:

HUMBERTO VARUM – UNIVERSITY OF AVEIRO (PORTUGAL)
PERE ROCA – TECHNICAL UNIVERSITY OF CATALONIA (SPAIN)
ANTONIO NANNI – UNIVERSITY OF MIAMI (USA)

The editors do not assume any responsibility for the accuracy, completeness or quality of the information provided by any article published. The information and opinion contained in the publications are solely those of the individual authors and do not necessarily reflect those of the editors. Therefore, we exclude any claims against the author for the damage caused by use of any kind of the information provided herein, whether incorrect or incomplete.

The appearance of advertisements in this Scientific Publications (Printed Abstracts Proceedings & Digital Book of Articles - REHABEND 2016) is not a warranty, endorsement or approval of any products or services advertised or of their safety. The Editors do not claim any responsibility for any type of injury to persons or property resulting from any ideas or products referred to in the articles or advertisements.

The sole responsibility to obtain the necessary permission to reproduce any copyright material from other sources lies with the authors and the REHABEND 2016 Congress can not be held responsible for any copyright violation by the authors in their article. Any material created and published by REHABEND 2016 Congress is protected by copyright held exclusively by the referred Congress. Any reproduction or utilization of such material and texts in other electronic or printed publications is explicitly subjected to prior approval by REHABEND 2016 Congress.

ISBN: 978-84-608-7940-4 (Printed Book of Abstracts)

ISBN: 978-84-608-7941-1 (Digital Book of Articles)

Recorded by Serigrafías Serimar, S.A.

CODE 1.7.22**UTILIZACIÓN DE LA TÉCNICA DE GEORRADAR SIN CONTACTO PARA EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LA IGLESIA DE SAN NICOLÁS DE VALENCIA****Gosalbez Castillo, Jorge^{1*}; Bosch Roig, Ignacio**

1: Instituto de Telecomunicaciones y aplicaciones multimedia (ITEAM)
Universitat Politècnica de València (UPV)
e-mail: jorgocas@dcom.upv.es

PALABRAS CLAVE: Georradar, GPR; procesado de señal, evaluación sin contacto.

RESUMEN

El GPR se basa en la transmisión de señales de radiofrecuencia hacia el interior del material a inspeccionar. Las heterogeneidades del material (clavos, humedades o cambios de material) provocan que parte de la energía sea reflejada hacia la superficie generándose una imagen bidimensional donde se representa el nivel de señal frente al desplazamiento lineal de la antena y profundidad inspeccionada.

La iglesia de San Nicolás está situada en Valencia y es un ejemplo de construcción gótica con decoración barroca. Aunque algunos de los frescos de esta iglesia fueron ya restaurados en 1920, actualmente se está procediendo a su restauración integral gracias al apoyo económico de la Fundación Hortensia Herrero. Es por ello, que la utilización de la técnica no destructiva del GPR es de interés ya que permite la evaluación del estado de los elementos constructivos sin contacto físico de la antena preservando al máximo el elemento inspeccionado. Ahora bien, al no poder existir ningún contacto físico, no hay sincronización entre el desplazamiento de la antena y la imagen obtenida, imposibilitando la medición de heterogeneidades de manera precisa.

En este artículo se presentan los últimos resultados obtenidos que se centran en el seguimiento del perfil de la cubierta, la detección de una cámara hueca y su posterior consolidación en el interior de uno de los nervios y la verificación de la realización de medidas fiables de profundidades.

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se presentan los últimos avances del uso de la técnica de Ground Penetrating Radar (GPR), por parte del Grupo de Tratamiento de la Señal (GTS) [1] adscrito al Instituto de Telecomunicación y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), en la actual restauración pictórico-arquitectónica de la Iglesia de San Nicolás de Valencia, realizada por un equipo multidisciplinar de arquitectos, restauradores e ingenieros, desde el punto de vista del tratamiento digital de la señal, y concretamente de las diferentes posibilidades de uso de la técnica del georradar como ayuda en el proceso de restauración.

Estos estudios comenzaron con los estudios previos [2] y han continuado con resultados parciales del análisis de los elementos constructivos [3]. En ambos casos se ha tenido que trabajar de forma que la antena del georradar no tocara en ningún momento la superficie pictórica a inspeccionar, para evitar dañarla en el proceso de restauración, por lo que no ha sido posible el uso de posicionadores mecánicos utilizados habitualmente en este tipo de aplicaciones. En el artículo se presenta la posibilidad de implementar esta sincronización entre el desplazamiento de la antena GPR y la medida “sin contacto” con la superficie pictórica, con el fin de obtener imágenes precisas y reales. Para ello, se ha experimentado esta posibilidad empezado a emplear acelerómetros inerciales junto con un sistema de procesamiento y técnicas de procesamiento bidimensionales, permitiendo la reconstrucción del elemento inspeccionado.

El objetivo de este artículo consiste en la utilización de la técnica de GPR para mostrar los últimos resultados de la inspección y valoración de la morfología y la presencia de heterogeneidades dentro de los distintos elementos constructivos de la Iglesia de San Nicolás de Valencia, así como la introducción experimental de la técnica de sincronización sin contacto. Para ello, en la Sección 2 se hará una breve explicación teórica del GPR, en la Sección 3, se describirá la parte experimental donde se comenta el equipo y configuración empleadas, así como la ubicación exacta de las medidas y los principales resultados. Finalmente, en la sección 5 se verán las principales conclusiones alcanzadas, así como líneas futuras.

2. TÉCNICA DEL GPR

2.1 Descripción general de la técnica

El georradar o GPR (Ground Penetrating Radar) es una técnica de ensayo no destructivo basado en la transmisión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia hacia el interior del material a inspeccionar [4]. Las heterogeneidades del material provocan que parte de la energía de esta onda sea reflejada hacia la superficie, mientras que el resto de la energía sigue propagándose hacia el interior. Estas reflexiones son debidas a cambios de las propiedades eléctricas, como la constante dieléctrica del material, y pueden asociarse a interfaces, cambios de humedades, grados de compactación, fracturas, arcillas, cuerpos extraños... Esto hace que el rango de aplicación sea muy amplio: estimación de la profundidad, grosor, determinación de niveles freáticos, estudios arqueológicos y/o geológicos, localización de cavidades o fracturas... [5] La energía reflejada es detectada mediante una antena receptora, la cual puede ser la misma que la emisora o puede ser otra diferente. Las señales reflejadas son procesadas en tiempo real y representadas en función de la distancia recorrida frente al tiempo, de esta manera, conforme la antena se desplaza espacialmente, se va generando una sección transversal de la superficie inspeccionada.

La capacidad de penetración depende fundamentalmente de dos parámetros: frecuencia de la onda y de las propiedades dieléctricas del material inspeccionado. Con antenas de baja frecuencia, se consiguen penetraciones mayores, pero a costa de perder resolución lateral. Los materiales poco conductores como arenas secas, calizas, cemento... ofrecen una penetración mayor que materiales conductores como las arcillas. Antenas entre 500MHz y 1200MHz son capaces de penetrar entre 5m y 0.5m con resoluciones entre 5cm y 0.5cm. Por ello, la elección de la frecuencia de la antena será una solución de compromiso entre penetración y resolución.

Las heterogeneidades provocan una reflexión de la energía de la señal electromagnética hacia la superficie del material. Esta reflexión tardará un tiempo en llegar a la superficie y ser recogida por la antena. Dicho tiempo depende de la profundidad a la que se encuentre el reflector ($d_{reflector}$) y la velocidad de propagación del material ($c_{material}$), según la ecuación (1).

$$t_{llegada} = \frac{2d_{reflector}}{c_{material}} \quad (1)$$

La velocidad de propagación depende de las propiedades dieléctricas del material que son una combinación compleja entre la composición del material y contenido de agua, pudiendo sintetizarlo en la expresión (2) donde ϵ_R es la constante dieléctrica relativa del material.

$$c_{material} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_R}} \quad (2)$$

El tiempo de inspección que seleccionemos condicionará la profundidad que alcancemos en la representación y vendrá condicionado por ϵ_R , el cual no es un parámetro trivial de configurar cuando existen diferentes materiales, capas... El tiempo de inspección se deberá configurar acorde con la capacidad de penetración de la onda, ya que una vez que la onda se ha atenuado completamente, únicamente recogeremos ruido.

Una vez obtenido el perfil de GPR o radargrama, formado por una serie de pulsos de radar puestos uno a continuación del otro ofreciendo una imagen del perfil de la zona inspeccionada. Es necesario utilizar diferentes técnicas de procesado para mejorar la visualización e interpretación de dichas imágenes [6], [7]. Estas técnicas van desde: procesos de ganancia automática, que tratan de mantener la relación señal a ruido constante con la profundidad; los filtros temporales para la eliminación de interferencias; o técnicas de deconvolución espacial que permiten recuperar la forma original de las heterogeneidades las cuales vienen distorsionadas por el diagrama de radiación de la antena.

2.2 Descripción del equipo GPR

Para las medidas planteadas en este estudio, hemos empleado el equipo SIR 3000 de la marca “Geophysical Survey Systems, Inc”, configurado con dos antenas de diferentes frecuencias: 1.6GHz y 2.6GHz como se puede apreciar en la Figura 1.

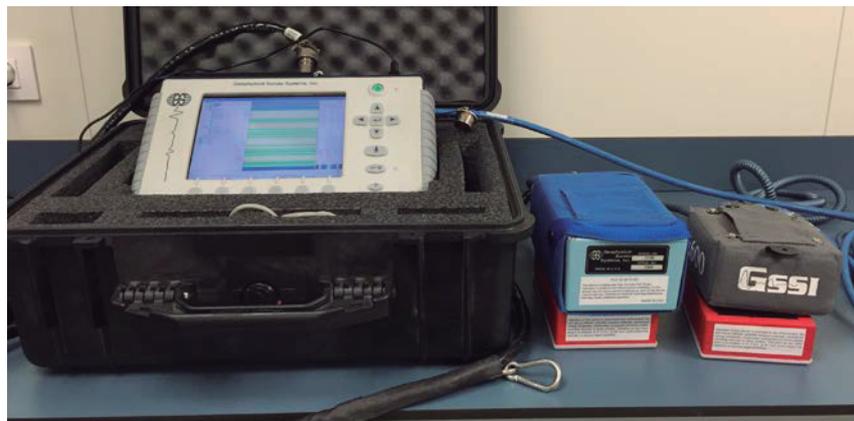


Figura 1: Georradar con su módulo de acondicionamiento, representación y almacenamiento de la señal (SIR 3000) y las antenas de 1.6 y 2,6GHz junto con sus acondicionadores de señal.

Estas antenas están pensadas para inspecciones superficiales y con capacidad de inspección entre 0 y 50 cm, aunque dicho parámetro depende del material inspeccionado. Las principales características del equipo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del equipo GPR SIR 3000.

Parámetro	Valor
Visualización	TFT 8.4", 800 x 600, 64k colores
Nº de canales	1
Fichero de salida	RADAN (archivos .dzt, formato propietario)
Tasas de adquisición	220 scans/seg a 256 muestras/scan 120 scans/seg a 512 muestras/scan
Bits / muestra	8 o 16
Muestras por scan:	256, 512, 1024, 2048, 4096 o 8192
Escala de tiempo:	0-8,000 ns
Ganancia:	[-20dB , 80dB] Manual o automático
Filtros verticales:	IIR y FIR. Paso bajo y alto
Filtros horizontales:	Eliminación de fondo
Tª de trabajo:	-10°C hasta +40°C
Alimentación:	Externa: 15VDC, 4A Interna: batería 10.8VDC
Dimensiones:	31.5 x 22 x 10.5 cm
Peso:	4.1kg
Conectores:	Antena, alimentación, Serie RS232 para GPS, Compact Flash, USB

2.3 Desplazamiento de las antenas por la superficie pictórica

Con el objetivo de obtener las señales medidas sincronizadas con la posición de medida real, habitualmente el sistema está dotado con un sistema mecánico, posicionador mecánico o carrito sobre el que va ubicado la antena ver Figura 2a, el cual lleva una rueda conectada a un sensor o encoder que conforme se va desplazando le indica al dispositivo que tome las medidas. Esta configuración garantiza dos aspectos, por un lado, garantiza que el eje X del radargrama esté espacialmente distribuido y, por otro lado, garantiza una separación constante entre la antena y la pared.



Figura 2: Antena georradar montada en posicionador o carrito, y antena desplazada “a mano alzada”.

Sin embargo, este sistema implica un contacto físico entre la zona a inspeccionar y el posicionador. En el caso concreto de la iglesia de San Nicolás se contrastó que dicho contacto físico no era asumible ya que las ruedas del posicionador desplazaban polvo y suciedad de una zona a otra además de deteriorar las pinturas.

Debido a esto, se optó inicialmente por una configuración menos precisa, pero totalmente conservadora con las pinturas. Para ello, se separó la antena del posicionador y se desplazó manualmente por la pared a una distancia aproximada de 1cm de la pared, como se puede apreciar en la Figura 2b. Adicionalmente, el equipo se configuró para que adquiriera continuamente, a diferencia de lo que ocurría en el caso original en el cual únicamente se adquiría cuando la antena se movía.

De esta manera se eliminó cualquier contacto físico con las pinturas, pero se perdió la sincronización precisa entre posición espacial y señal del georradar debido a que el desplazamiento de la antena se hacía a “mano alzada”. A pesar de ello, se ha podido establecer de manera aproximada una asociación entre las señales y las posiciones de la pared.

Se ha trabajado en una primera aproximación a una posible solución a esta problemática, donde se prevé sustituir el posicionador mecánico y el carrito, por un sistema inercial basado en la utilización de un acelerómetro (BMA180 de la marca Bosch) y un sistema de procesamiento sencillo, para poder realizar las medidas “a mano alzada”, pero sin perder la sincronización precisa entre la posición espacial y la señal del georradar. Los acelerómetros miden la gravedad a la que están sometidos sus ejes (X, Y, Z), es decir, $\bar{g}(t) = [g_X(t) \ g_Y(t) \ g_Z(t)]^T$. A partir de estas aceleraciones, se plantea la doble integral (3) para estimar la posición recorrida. Teniendo en cuenta que las aceleraciones se miden cada T_s segundos, las integrales se convierten en un doble sumatorio donde el eje temporal, t , se discretiza en los valores nT_s , resultando en la siguiente expresión:

$$\bar{e}(n) = T_s^2 \sum_{k=0}^n \sum_{k'=0}^k \bar{g}(k'T_s) = [e_X(n) \ e_Y(n) \ e_Z(n)]^T \quad (3)$$

Debido a restricciones de acceso a la iglesia no se pueden mostrar resultados reales en este estudio, dejando este aspecto para futuras presentaciones, pero se han alcanzado precisiones inferiores a 5cm en laboratorio.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se van a mostrar los últimos resultados experimentales obtenidos como ayuda en el proceso de restauración de la iglesia de San Nicolás de Valencia. Se muestran diferentes medidas en diferentes zonas de la iglesia, mostrando en cada una de las medidas la zona inspeccionada y los radargramas que ilustran los resultados obtenidos.

3.1 Medidas entre arcos para el seguimiento del perfil de la cubierta.

En este apartado se describe la tanda de medidas realizada entre el arco B y el arco D correspondiente a la 3ª y 4ª crujía (ver esquema de la Figura 3a). Para ello se empleó una antena de 2,6 GHz (utilizando un rango de inspección de 10ns) que es la que mejor resolución ofrece y una antena de 1,6 GHz (con un rango algo mayor de 15ns). Se inspeccionó desde la superficie de las pinturas hacia el interior del elemento constructivo. Con los siguientes parámetros de inspección: 100k de tasa temporal, 512 muestra, 16 bits por muestra, 6,35 de constante dieléctrica, una tasa de 20 y 90 scans/unidad. Una ganancia de 2 puntos entre -16dB y 31dB, unos filtros entre 250Hz y 3000Hz.

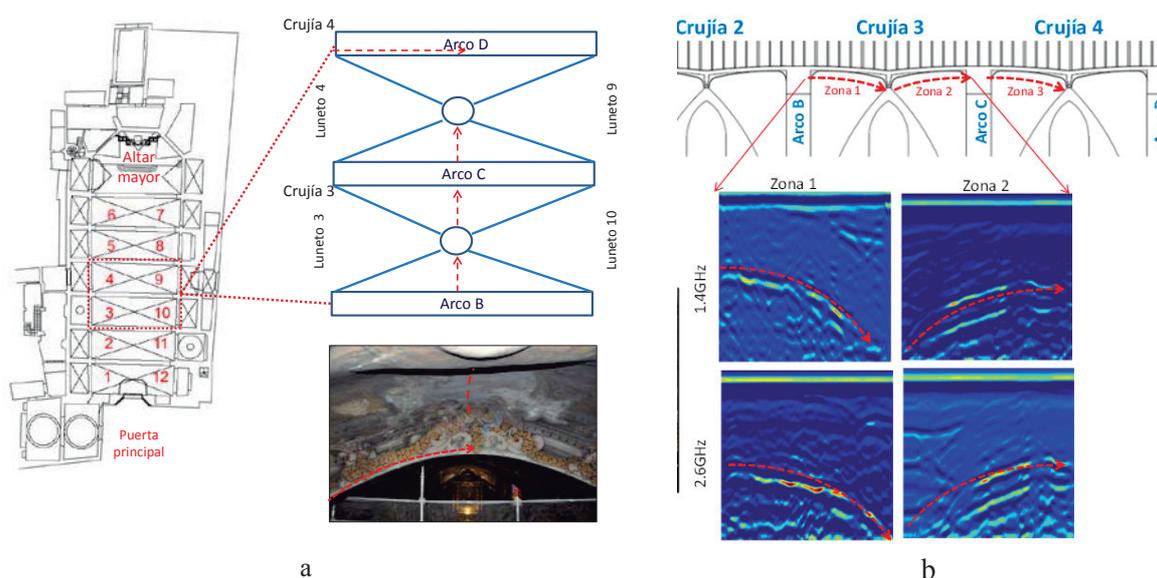


Figura 3: a) Esquema de zonas de inspección con detalle de crujías 3 y 4. b) Esquema y radargramas de resultados obtenidos del arco B al arco C

Podemos apreciar en la Figura 3b como el espesor de la cúpula se perfila en los radargramas obtenidos, pudiendo seguir perfectamente el espesor de la cubierta. La crujía 4, también fue analizada obteniendo resultados similares a la crujía 3.

3.2 Detección de cámara en interior de nervio 3

En este apartado se describe un primer resultado obtenido en la 6ª crujía correspondiente al nervio 3 de la zona del luneto 7, ver Figura 4a, donde se detectó una cámara en el interior de uno de los nervios, coordinándose éstas medidas con la inspección visual mediante un videoendoscopio. Se utilizó únicamente la antena de 2,6GHz con un rango de inspección de 10 ns y los mismos parámetros del caso anterior.

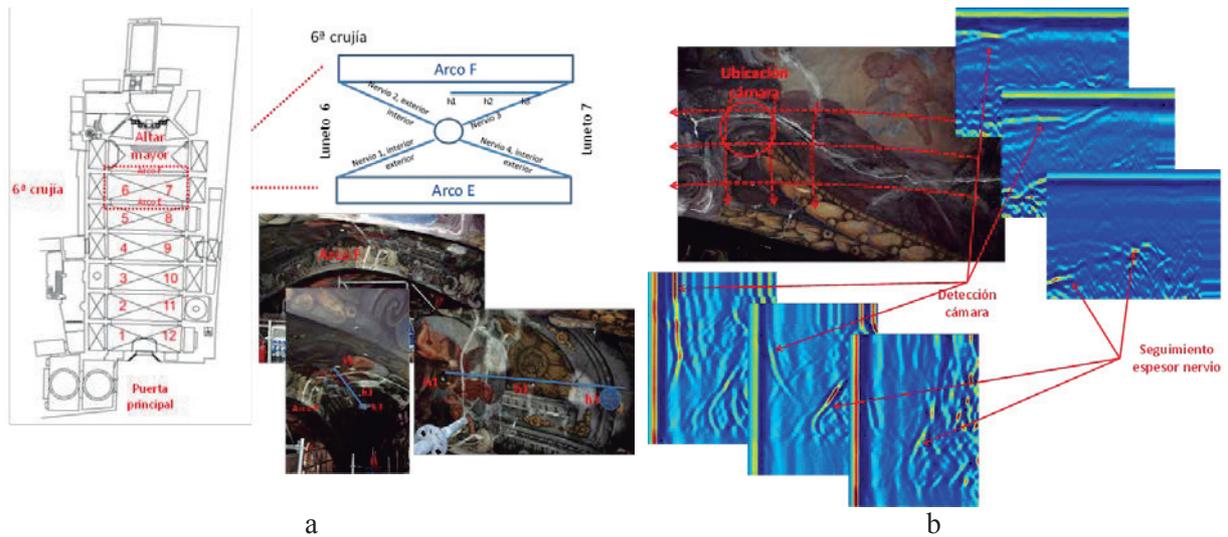


Figura 4: a) Esquema de zonas de inspección con detalle de la 6ª crujía. b) Radargramas de resultados obtenidos nervio 3 de la 6ª crujía.

Se realizó un mallado del Nervio 3 de la Crujía 6, con el fin de detectar y dimensionar la presencia de la cámara. Dichos resultados se muestran en la Figura 4b y se verificaron introduciendo un videoendoscopio a través de una fisura que estaba en dicho nervio.

Cabe destacar que esta zona se consolidó adecuadamente y tras esta consolidación se volvieron a realizar medias obteniendo los resultados de la Figura 5, que se corresponden aproximadamente con las primeras medidas horizontales del mallado anterior.

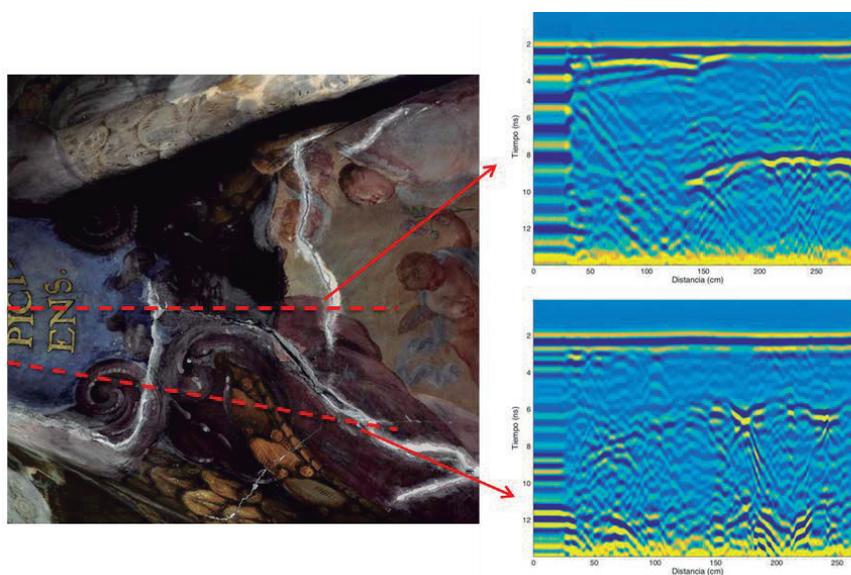


Figura 5: Radargramas de resultados obtenidos tras la consolidación

En este caso se aprecia la misma tendencia que en el caso previo, pero sin marcarse tan claramente la zona de la cámara ya consolidada.

3.3 Cálculo del tiempo de vuelo y velocidad de propagación en medidas en Arco F

En este apartado se describe una segunda tanda de medidas realizadas en la misma zona de la 6ª crujía correspondiente a los nervios 3 y 4 de la zona del luneto 7. Concretamente al arco F (arco entre la 6ª

crujía y el altar mayor) (Figura 6a). En este segundo caso se empleó la antena de 1,6 GHz y un rango de inspección de 10ns para permitir una mayor penetrabilidad hacia el interior del elemento constructivo. Con los siguientes parámetros de inspección: 100k de tasa temporal, 1024 muestras, 16 bits por muestra, 64 medidas por segundo, una tasa de 20. Una ganancia de 2 puntos entre -12dB y 26dB. En este caso se inspeccionó desde la 6ª crujía hacia el interior del arco, pero situando al final una placa metálica de referencia, con el objetivo de medir de la relación entre el tiempo de vuelo en “ns” y la dimensión real medida de 70 cm.

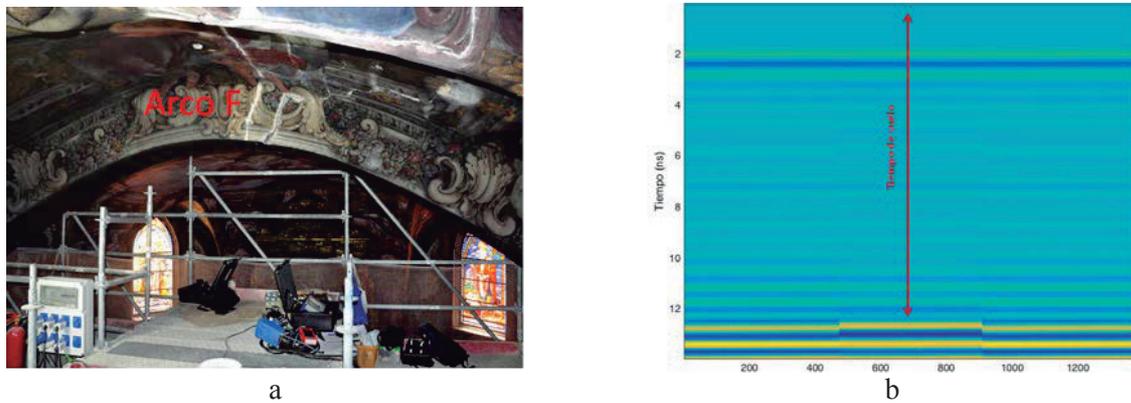


Figura 6: Imagen del Arco F y Radargrama para la estimación del tiempo de vuelo en el Arco F

Cabe destacar que el eje horizontal del radargrama no se corresponde con un desplazamiento de la antena, ya que esta permanece quieta, sino a que va pasando el tiempo. De forma que inicialmente no hay placa, luego se coloca ésta, y finalmente se vuelve a quitar.

Visualmente se mide un tiempo de vuelo de aproximadamente 12 ns (Ver Figura 6b), lo que implica que aplicando la ecuación (1) se puede obtener una velocidad de propagación de aproximadamente $1.16 \cdot 10^8 m/s$. Lo que se utilizará como dato para calcular los espesores de otros elementos constructivos en experimentos posteriores.

3.4 Medidas de profundidades en perforaciones h1, h2 y h3

Éste último caso se corresponde a una serie de medidas con y sin placa metálica alrededor de las perforaciones h1, h2 y h3 entre el arco F y el nervio 3, ver Figura 4a. En este caso, al igual que en el caso anterior, el eje horizontal del radargrama no se corresponde con un desplazamiento de la antena, ya que ésta permanece quieta. De forma que inicialmente no hay placa, posteriormente se coloca, y finalmente se retira.

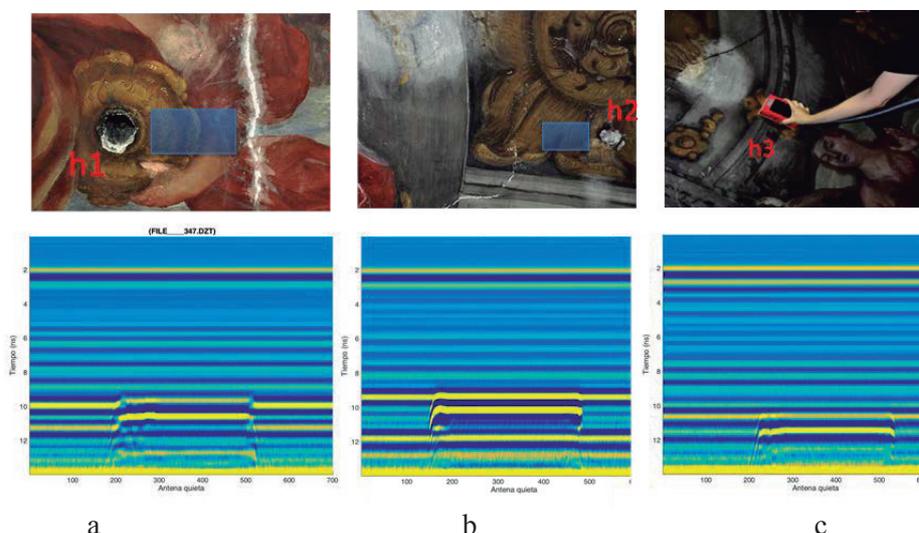


Figura 7: Detalles y radargramas obtenidos de perforaciones h1, h2 y h3.

En la Figura 7a se aprecia la placa a una profundidad de 9 ns, lo que se corresponde con 52.47 cm, asumiendo la velocidad de propagación obtenida en el estudio del Arco F y aplicando la ecuación (1). En la Figura 7b se detecta la placa a una profundidad de 8.5 ns, lo que se corresponde con 49.55 cm. Finalmente, en la Figura 7c, la placa aparece a 10.5 ns, que se corresponde a 61.21 cm.

4. CONCLUSIONES

Tras el análisis de los resultados experimentales obtenidos se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

Es posible realizar un perfecto seguimiento del espesor de la cubierta de la nave central de la iglesia, haciendo un barrido a lo largo de diversas crujías entre arcos, con medidas de GPR desde el interior de la nave central hacia la cubierta. Lo que permite corroborar los resultados ya obtenidos en (2) en la dirección contraria, desde el interior de la cubierta hacia la nave central.

Es posible la detección de grandes oquedades o cámaras interiores. Las cuales se han verificado visualmente con medidas con videoendoscopio. Verificándose a su vez su correcta consolidación al realizar medidas complementarias de GPR tras la inyección de material consolidante.

Finalmente se ha verificado la posibilidad de realizar mediciones fiables de profundidades en el entorno de diversas perforaciones ya existentes. Tomando como referencia el cálculo del tiempo de vuelo y velocidad de propagación en uno de los arcos, en el que es posible tomar las medidas de distancia reales.

Se deja para futuras investigaciones la implementación del sistema sin contacto para la sincronización entre el desplazamiento de la antena GPR y la medida con el fin de obtener imágenes precisas y reales. Para ello, se prevé la utilización de navegadores inerciales junto con técnicas de procesamiento bidimensionales, permitiendo la reconstrucción del elemento inspeccionado.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado como parte del proyecto de investigación PROMETEOII/2014/032 y del proyecto “Restauración de las pinturas murales [...] de la Iglesia Parroquial de San Nicolás [...]” financiado por la “Fundación Hortensia Herrero” a través de Arzobispado de Valencia.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Vergara, L., Bosch, I., Gosalbez, J., Salazar, A. Optimum detection of ultrasonic echoes applied to the analysis of the first layer of a restored dome, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. (2007).
- [2] Bosch, I., Gosalbez, J., Miralles, R., Genovés, V., Nicolas church by means ground penetrating radar technique, *11th International Conference on non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental Heritage*, Madrid, junio 2014.
- [3] Bosch, I., Gosalbez, J., Roig, P., Análisis de los elementos constructivos de la iglesia de San Nicolás mediante la técnica del georradar, *13er Congreso Nacional de Ensayos No Destructivos*. Sevilla, mayo 2015.
- [4] Maierhofer, C. Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating radar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol 15/3 (2003).
- [5] Schrott, L., Sass, O. Application of field geophysics in geomorphology: advances and limitations exemplified by case studies. *Geomorphology*, Vol 93/1 (2008).
- [6] Zhao, A., Jiang, Y., Wang, W. Exploring Independent Component Analysis for GPR Signal Processing. *Electromagnetics Research Symposium*, Cambridge, USA, 2005.
- [7] Liu, J.X., Zhang, B., Wu, R.B. GPR Bounce Removal Methods Based on Blind Source Separation, *Electromagnetics Research Symposium*, 2006.