TESIS DOCTORAL

Análisis de viabilidad y caracterización de la señal GPR para la evaluación de obras de infraestructuras del transporte

Francisco Javier Prego Martínez

Dirigida por los doctores:

Dra. María Mercedes Solla Carracelas
Dr. Pedro Arias Sánchez

Año 2018

Universida de Vigo

EIDO
Escola Internacional
de Doutoramento

Universidade Vigo

Escola Internacional de Doutoramento

Francisco Javier Prego Martínez

TESIS DOCTORAL

Análisis de viabilidad y caracterización de la señal GPR para la evaluación de obras de infraestructuras del transporte

Dirigida por los doctores:

Dra. María Mercedes Solla Carracelas
Dr. Pedro Arias Sánchez

Año 2018

Universidade Vigo
Escola Internacional de Doutoramento

Dña. **MARÍA MERCEDES SOLLA CARRACELAS**, Profesora Contratada Doctora del Centro Universitario de la Defensa - Escuela Naval Militar de Marín (centro adscrito a la Universidad de Vigo) y D. **PEDRO ARIAS SÁNCHEZ**, Profesor Titular de la Universidad de Vigo,

HACEN CONSTAR

Que la presente memoria "**ANÁLISIS DE VIABILIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE LA SEÑAL GPR PARA LA EVALUACIÓN DE OBRAS DE INFRAESTRUCTURAS DEL TRANSPORTE**", elaborada por el doctorando D. **FRANCISCO JAVIER PREGO MARTÍNEZ** bajo su dirección, constituye su Tesis Doctoral en forma de compendio de artículos de investigación para optar al grado de **DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE VIGO**.

Y hallándose concluida, autorizan y dan el visto bueno de la tesis para su tramitación.

Firman el presente certificado en Vigo, a 21 de agosto de 2018.

Fdo. María Mercedes Solla Carracelas Fdo. Pedro Arias Sánchez

“Ex nihilo nihil fit”

(Atribuido a **Parménides de Elea**)

Agradecimientos

Dice el refrán castellano que "*Es de bien nacidos el ser agradecidos*". Me gustaría cumplirlo a rajatabla y citar aquí a todos los que me han ayudado, de una u otra manera, a que esta tesis sea hoy una realidad. Pero son tantas y tantas las personas implicadas que, ciertamente, me resulta complicado mencionarlas a todas. ¡Haría falta otra tesis! Por este motivo, me veo en la necesidad de nombrar únicamente a los que estuvieron más cerca en esta aventura pero, eso sí, dejando claro que aunque "*son todos los que están, no están todos los que son*".

Quiero empezar agradeciendo a mi familia y amigos su comprensión y apoyo cuando no les pude dedicar el tiempo que merecerían, por estar elaborando este trabajo. En especial, a mis padres, Juan y Viruca, y a mi tía Loli: muchas gracias una vez más, no sólo por esto, si no por TODO, siempre.

En este capítulo de amigos no puedo dejar de citar expresamente a Luis Nieto Matarranz y familia: muchas gracias, Tatiana y Luis, por acogerme en vuestra casa en cada tutoría a la que me desplacé desde Ourense y A Coruña.

En el plano profesional, mi total agradecimiento a la dirección y compañeros de las empresas Misturas, S.A. y Extraco, S.A., por todas las facilidades dadas para la elaboración de los artículos que componen esta tesis.

En lo que concierne al ámbito académico y científico, no puedo dejar de citar a todo el personal del Grupo de Investigación en Geotecnologías Aplicadas de la Universidad de Vigo, por la ayuda dispensada y los medios técnicos puestos a mi disposición para desarrollar este trabajo. En particular, a Iván Puente, Susana Lagüela y a Xavier Núñez-Nieto, cuya propia tesis me sirvió de ejemplo y abrió el camino para poder acometer la mía.

He dejado para el final a los directores de la tesis, los Dres. Pedro Arias y María Mercedes Solla. Gracias también a ambos por haber aceptado dirigir este trabajo de investigación. Especialmente a Mercedes Solla, que ha sido la figura clave y fundamental para que este trabajo haya llegado a buen puerto. Merchi, sin tu paciencia, comprensión, impulso, tesón, ayuda y ánimo sin límites esta tesis nunca habría sido posible. ¡Muchas gracias!

A todos aquellos que no he citado expresamente, por la imposibilidad señalada al principio, pero que habéis estado todo este tiempo a mi lado apoyándome, os doy también las gracias, de todo corazón.

Francisco Javier Prego Martínez

Ourense, septiembre de 2018

RESUMEN

Las infraestructuras del transporte presentan unas necesidades de conservación y mantenimiento cada día más exigentes, especialmente en escenarios económicos adversos como el actual, en el que es prioritario mantener el patrimonio viario existente frente a la construcción de nuevas infraestructuras. Para ello, es necesario contar con herramientas objetivas de análisis y monitorización que permitan evaluar su estado y priorizar las intervenciones necesarias para su correcta conservación y mantenimiento. El presente trabajo de investigación propone estudiar la viabilidad de uso del radar de subsuelo (*Ground Penetrating Radar,* GPR) como técnica de inspección no destructiva en la evaluación del estado de las infraestructuras del transporte y obras de ingeniería civil relacionadas. Su desarrollo ha experimentado importantes avances en los últimos veinte años, pero su uso en este campo no se ha generalizado tanto como sería deseable, teniendo en cuenta su gran potencial de aplicación.

En el ámbito de las infraestructuras lineales del transporte, las unidades de obra de firmes y pavimentos constituyen una parte fundamental de la infraestructura. El control de sus espesores y de su estado resulta crucial para garantizar su operatividad y la seguridad de los usuarios. Así pues, en el presente trabajo doctoral se ha estudiado y validado el potencial del GPR en la localización y evaluación de daños asociados a los firmes y pavimentos, analizando su utilidad en la detección e interpretación integral de patologías asociadas, de manera conjunta con otras técnicas de inspección no destructivas (el Láser Escáner Terrestre y la Termografía Infrarroja).

La ubicación exacta de servicios urbanos enterrados, localizados en las inmediaciones de una obra, es otro aspecto importante que ha de tenerse en cuenta antes de acometer la construcción de las infraestructuras del transporte: de ello dependen, entre otros factores, la seguridad de su ejecución y la interrupción de los suministros a los usuarios. En este trabajo se ha analizado y validado el empleo del GPR como herramienta de prospección útil en la localización de los servicios enterrados: se probó su utilidad práctica en un tramo de pruebas real, construido "*ex profeso*", constituido por tuberías de sección circular de diversas tipologías y diámetros, enterradas a diferentes profundidades. Como resultado de esta experiencia se aportan nuevos protocolos de actuación y se sugieren normas de buena práctica que mejoran

la exactitud de las prospecciones y la interpretación de los resultados obtenidos.

Otra de las infraestructuras del transporte que mayor complejidad técnica e inversiones económicas requieren son los túneles: se ha probado y demostrado "*in situ*" la utilidad del GPR para el control de calidad y monitorización de aspectos constructivos de interés en un túnel del AVE, en fases tempranas de construcción. Se ha probado que con esta herramienta se pueden monitorizar las estructuras y detectar precozmente fallos y patologías ocultas, de manera que se subsanen de la manera más rápida y económica.

Por último, se presenta en esta tesis una nueva aplicación (*app*) diseñada específicamente en *Android* para el procesado básico de la señal GPR en dispositivos móviles y *tablets*, como una alternativa simplificada al empleo de los programas comerciales convencionales. Esta *app* pretende contribuir a la extensión de la técnica entre usuarios no expertos interesados en ella.

Las diferentes aplicaciones del GPR analizadas en este trabajo de investigación pretenden, además, difundir las grandes posibilidades que aporta esta técnica como instrumento de control efectivo en las obras de ingeniería civil e infraestructuras del transporte, tanto en fases de construcción como en servicio.

En resumen, esta tesis doctoral ha analizado y demostrado la validez e idoneidad del GPR como herramienta de aplicación práctica en un campo de estudio tan amplio como es el de la construcción y conservación de las obras de ingeniería civil e infraestructuras del transporte, abriendo el camino a futuras líneas de investigación que contribuyan a la automatización de estas técnicas de inspección no destructiva.

RESUMO

As infraestruturas do transporte presentan unhas necesidades de conservación e mantemento cada día máis esixentes, especialmente en escenarios económicos adversos como o actual, no que é prioritario manter o patrimonio viario existente fronte á construción de novas infraestruturas. Para iso, é necesario contar con ferramentas obxectivas de análise e control que permitan avaliar o seu estado e priorizar as intervencións necesarias para a súa correcta conservación e mantemento. O presente traballo de investigación propón estudar a viabilidade de uso do radar de subsolo (*Ground Penetrating Radar*, GPR) como técnica de inspección non destrutiva na avaliación do estado das infraestruturas do transporte e obras de enxeñería civil relacionadas. O seu desenvolvemento experimentou importantes avances nos últimos vinte anos, pero o seu uso neste campo non se xeneralizou tanto como sería desexable, tendo en conta o seu gran potencial de aplicación.

No ámbito das infraestruturas lineais do transporte, as unidades de obra de firmes e pavimentos constitúen unha parte fundamental da infraestrutura. O control dos seus espesores e do seu estado resulta crucial para garantir a súa operatividade e a seguridade dos usuarios. Así pois, no presente traballo doutoral estudouse e validouse o potencial do GPR na localización e avaliación de danos asociados aos firmes e pavimentos, analizando a súa utilidade na detección e interpretación integral de patoloxías asociadas, de maneira conxunta con outras técnicas de inspección non destrutivas (Láser Escáner Terrestre e Termografía Infravermella).

A localización exacta de servizos urbanos enterrados, situados nas inmediacións dunha obra, é outro aspecto importante que ha de terse en conta antes de acometer a construción das infraestruturas do transporte: diso dependen, entre outros factores, a seguridade da súa execución e a interrupción das subministracións aos usuarios. Neste traballo analizouse e validouse o emprego do GPR como ferramenta de prospección útil na localización dos servizos enterrados: probouse a súa utilidade práctica nun tramo de probas real, construído "*ex profeso*", constituído por tubaxes de sección circular de diversas tipoloxías e diámetros, enterradas a diferentes profundidades. Como resultado desta experiencia achéganse novos protocolos de actuación e suxírense normas de boa práctica que melloran a exactitude das prospeccións e a interpretación dos resultados obtidos.

Outra das infraestruturas do transporte que maior complexidade técnica e investimentos económicos requiren son os túneles: probouse e demostrouse "*in situ*" a utilidade do GPR para o control da calidade e de diferentes aspectos construtivos de interese nun túnel do AVE, en fases temperás de construción. Probouse que con esta ferramenta pódense controlar as estruturas e detectar precozmente fallos e patoloxías ocultas, de maneira que se emenden dun xeito máis rápido e económico.

Por último, preséntase nesta tese unha nova aplicación (*app*) deseñada especificamente en *Android* para o procesado básico do sinal GPR en dispositivos móbiles e *tablets*, como unha alternativa simplificada ao emprego dos programas comerciais convencionais. Esta *app* pretende contribuír á extensión da técnica entre usuarios non expertos interesados nela.

As diferentes aplicacións do GPR analizadas neste traballo de investigación pretenden, ademais, difundir as grandes posibilidades que achega esta técnica como instrumento de control efectivo nas obras de enxeñería civil e infraestruturas do transporte, tanto en fases de construción como en servizo.

En resumo, nesta tese doutoral analizouse e demostrouse a validez e idoneidade do GPR como ferramenta de aplicación práctica nun campo de estudo tan amplo como é o da construción e conservación das obras de enxeñería civil e infraestruturas do transporte, abrindo o camiño a futuras liñas de investigación que contribúan á automatización destas técnicas de inspección non destrutiva.

ABSTRACT

Transport infrastructures present highly demanding conservation and maintenance needs, especially in adverse economic scenarios such as the current one, in which the priority is to maintain the existing road network instead of creating new infrastructures. For that, it is necessary to have accurate tools for analysis and monitoring that allow assessing their state and prioritising the required interventions for their adequate conservation and maintenance. This research work proposes to analyse the feasibility of the Ground Penetrating Radar (GPR) as a non-destructive testing technique on the evaluation of the transport infrastructures and related civil engineering works. Its development has experienced important advances in the last twenty years, although its use in this field has not been generalized as much as it would be desirable, taking into account its great application potential.

In the field of linear transport infrastructures, pavements and paving construction units constitute an essential part of the infrastructure. Thicknesses and state controls are crucial to guarantee its operating capacity and safety of the users. Therefore, in this work, the potential of the GPR has been evaluated and validated in the identification and evaluation of damages associated to pavements and pavings, analysing its usefulness for the detection and integral interpretation of pathologies, in combination with other non-destructive testing techniques (Terrestrial Laser Scanner (TLS) and Infrared Thermography (IRT)).

The exact positioning of urban buried services, in the surrounding area of an intervention activity, is another important aspect that must be taken into account before undertaking the construction of transport infrastructures: among others factors, the safety of its execution and the interruption of supplies to users, depends on this. In this work, the use of the GPR has been analysed and validated as an useful prospecting tool for the detection and positioning of urban buried services. Its practical usefulness was tested in a real trial stretch, built expressly, composed of diverse types and diameters pipes of circular section that have been buried at different depths. As a result of this experience, new performance protocols were provided and good practice standards were suggested in order to improve the accuracy of the prospection and the interpretation of the results obtained.

Tunnels are another kind of transport infrastructures that require highly technical and economic investments. The potential of the GPR has been tested

and demonstrated "*in situ*" for quality control and monitoring of constructive aspects in a high speed railway tunnel, in its early stages of construction. It has been proved that the GPR is an efficient tool to monitor the tunnelling structures, as well as for an early detection of failures and hidden pathologies, so that they can be remedied as cheap and as soon as possible.

Finally, this doctoral thesis presents a new application (app), specifically designed in Android for a basic GPR signal processing in mobile devices and tablets, as a simplified alternative method in comparison with conventional commercial programs. This app aims to contribute to the extension of the technique among non-expert users interested in the technique.

The different GPR applications analysed in this thesis intend, in addition, to spread the great possibilities that this technique contributes as an effective tool for quality control in civil engineering and transport infrastructures, both on early stages of construction and in service.

In summary, this doctoral dissertation has analysed and demonstrated the feasibility and suitability of the GPR as a tool of practical application in a field of study as wide as it is the construction and conservation of the civil engineering works and transport infrastructure, opening the way to future research lines that contribute to the automation of these non-destructive inspection techniques.

Tabla de Contenidos

Capítulo 1. Introducción…… 1

1.1. Origen y motivación de la tesis……... 1

1.1.1. Contextualización y planteamiento del problema……. 1

1.1.2. Motivación de la tesis…… 2

1.2. Objetivos de la investigación…….. 4

1.3. Organización de la disertación…… 7

1.3.1. Sección 1: Aplicación de las técnicas de inspección GPR en el campo de la ingeniería civil e infraestructuras del transporte…….. 8

1.3.1.1. Análisis de patologías en firmes y pavimentos…….. 8

1.3.1.2. Detección de tuberías y servicios enterrados en obras de ingeniería civil…….. 9

1.3.1.3. Aplicación del GPR en el control de calidad de un túnel en construcción……. 10

1.3.2. Sección 2: Técnicas de procesado y *software* de aplicación……..... 10

1.3.3. Sección 3: Discusión y conclusiones…… 11

1.4. Estado del Arte …… 11

1.4.1. Origen del GPR y antecedentes de uso en el ámbito de la ingeniería civil…… 11

1.4.2. Aplicación del GPR en el estudio de patologías en firmes y pavimentos…… 13

1.4.3. Detección de tuberías y servicios enterrados en obras de ingeniería civil…… 14

1.4.4. Aplicación del GPR en el análisis de túneles…….. 16

1.4.5. Técnicas de procesado y *software* de aplicación…… 17

1.5. Referencias…… 19

Capítulo 2. Inspección de pavimentos. Uso conjunto de técnicas GPR, IRT y TLS para la detección integral de daños en pavimentos... 25

2.1. Introducción…… 27

2.2. Materiales y métodos…… 28

2.2.1. Antecedentes del área de inspección…… 28

2.2.2. Radar de penetración terrestre…… 28

2.2.3. Termografía infrarroja…… 30

2.2.4. Láser escáner terrestre…… 31

2.3. Resultados y discusión…… 32

2.4. Conclusiones…….. 36

2.5. Referencias…… 37

Capítulo 3. Detección de servicios enterrados. Adquisición eficiente de datos GPR para la detección de tuberías enterradas…….. 39

3.1. Introducción…… 41

3.2. Materiales y métodos…… 42

3.2.1. Zona experimental de ensayos…… 42

3.2.2. Inspección GPR…….. 42

3.2.2.1. Frecuencias de las antenas y resolución espacial……... 43

3.2.2.2. Dirección de adquisición de datos y orientación de las antenas…. 43

3.2.2.3. Ventana de tiempos total (*total time window*) e intervalos temporales de muestreo (*temporal sampling interval*)…… 43

3.2.2.4. Intervalos de muestreo espacial (*spatial sampling interval* o *trace-interval*)…… 44

3.3. Resultados y discusión…… 45

3.3.1. Dirección de adquisición de datos…….. 45

3.3.2. Intervalos espaciales de muestreo (*spatial sampling interval*)…… 45

3.3.3. Ventana total de tiempos (*total time window*)…… 46

3.3.4. Resolución horizontal…… 47

3.3.5. Resolución vertical…… 48

3.3.6. Orientación de la antena……... 49

3.4. Conclusiones…… 49

3.5. Referencias…… 49

Capítulo 4. Inspección de estructuras de obra: túneles. Evaluación de la aplicabilidad del radar de subsuelo para el control de calidad en la construcción de túneles …… 51

4.1. Introducción…… 53

4.2. Materiales y métodos…… 53

4.2.1. Túnel de alta velocidad de Seiró……. 53

4.2.2. Adquisición de datos GPR…… 54

4.3. Resultados y discusión…… 54

4.3.1. Estimación del espesor de gunita en la línea…… 54

4.3.2. Detección de problemas de humedades y de grietas internas……... 54

4.3.3. Localización de cerchas metálicas en el revestimiento……... 55

4.4. Conclusiones……. 56

4.5. Referencias……. 56

Capítulo 5. Técnicas de procesado y *software* de aplicación. Herramienta Android para móviles para el procesado simplificado de datos GPR en aplicaciones de construcción……. 57

5.1. Introducción…… 59

5.2. Arquitectura del *software*: filtros y herramientas……..... 59

5.2.1. Importación de datos y visualización de radargramas……. 60

5.2.2. Herramientas básicas de pre-visualización y pre-filtrado…… 61

5.2.2.1. Comandos deshacer, guardar y *reset*……. 61

5.2.2.2. Modificadores de filtrado…… 61

5.2.2.3. Paleta de colores y contraste…… 62

5.2.2.4. Zoom……. 62

5.2.2.5. Corrección de tiempo cero y extracción de *samples* y *traces*……. 62

5.2.3. Filtros de procesado de la señal…….. 62

5.2.3.1. Corrección de la componente DC…… 62

5.2.3.2. Amplificación de la señal……... 63

5.2.3.2.1. Filtro de truncamiento……. 63

5.2.3.2.2. Filtro de ganancia potencial…….. 63

5.2.3.3. Derivación de la señal…… 64

5.2.3.4. Filtro de eliminación de ruido (*Background removal filter*)……... 65

5.2.3.5. Análisis de frecuencia…… 66

5.3. Aplicaciones y resultados……. 67

5.3.1. Casos de estudio…… 67

5.3.1.1. Detección de grietas y cavidades..... 67

5.3.1.2. Medidas de espesores de pavimentos..... 67

5.3.1.3. Estimación de diámetros de tuberías y armaduras……... 68

5.3.2. Resultados…….. 69

5.3.2.1. Informes y datos gráficos…….. 69

5.3.2.2. Archivos de exportación……. 69

5.4. Conclusiones…….. 69

5.5. Referencias……. 70

Capítulo 6. Discusión general…….. 73

6.1. Antecedentes y organización del Capítulo…… 73

6.2. Discusión del Estado del Arte…….. 74

6.3. Discusión de la aplicación del GPR en la localización y análisis de patologías de firmes en infraestructuras del transporte…….. 76

6.3.1. Aplicación conjunta de las técnicas GPR, IRT y TLS para la detección integral de daños en pavimentos……. 76

6.3.1.1. Introducción al caso de estudio…… 76

6.3.1.2. Procedimiento empleado y discusión de resultados…… 77

6.4. Discusión de la aplicación y viabilidad de uso del GPR en la localización y análisis de servicios enterrados……. 80

6.4.1. Adquisición eficiente de datos GPR para la detección de tuberías enterradas……... 81

6.4.1.1. Introducción al caso de estudio…… 81

6.4.1.2. Procedimiento empleado y discusión de resultados……. 81

6.5. Discusión del empleo de las técnicas GPR como herramientas de inspección en túneles…….. 82

6.5.1. Discusión del análisis de aplicabilidad del georradar para el control de calidad de un túnel en construcción……. 82

6.5.1.1. Caso de estudio…….. 82

6.5.1.2. Procedimiento empleado y discusión de resultados……. 83

6.6. Discusión sobre las técnicas de procesado de la señal GRP y *software* de aplicación…….. 84

6.6.1. *App* Android para el procesado simplificado de la señal GPR en tabletas y teléfonos inteligentes……. 85

6.6.1.1. Descripción general de la *app* diseñada……. 85

6.6.1.2. Discusión y validación de la *app* en entornos reales de ingeniería civil e infraestructuras del transporte……. 86

6.7. Referencias……. 87

Capítulo 7. Conclusiones generales…….. 89

7.1. Conclusiones……. 89

7.2. Líneas de investigación futuras…….. 92

Anexo I. Información adicional detallada: Descripción de los factores de impacto y otros criterios de calidad de las publicaciones……... 95

Listado de figuras

2.1. (Top) Schematic view of the survey, with the location of its characteristic elements. (Bottom) Detail of the characteristic elements: a) View of the filling, consisting of masonry blocks; b) paving blocks fixed by mortar and grout; c) current alternation of patches of concrete roadbed and paving blocks; d) presence of shells in the concrete and granular materials; e) cracking of the concrete layer…….. 29

2.2. Surveying methods used to detect cracking in pavement: a) GPR; b) IRT; c) TLS……... 29

2.3. GPR profiles collected with the 500 MHz antenna through the visible extremes of the pipes; profiles are acquired in a direction perpendicular to the direction of the pipes. The reflections R1 and R2 indicate the air/ground and filling/pipe interfaces respectively, measured through travel-time difference. The exact depths of the pipes are also shown…….. 30

2.4. Comparison of data from (a) 800 MHz and (b) 500 MHz antennas regarding resolution and depth range of penetration characteristics. The reflections highlighted in the radargrams correspond to layering (dashed orange lines) and cracking or lack of filling (white circles). The depth range of penetration, or depth scale, was obtained using the pre-calibrated radar-wave velocity of 12.7 cm/ns. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article)…… 31

2.5. Examples of thermograms acquired in the inspection of the paving, where the thermal imprints of the different pathologies can be seen…….. 31

2.6. Examples of thermograms after processing, where the thermal imprints on the surface of inner and superficial pathologies can be seen: a) cracks in paving, where temperature increases with depth of the crack; b) the lack of concrete or grout between paving blocks provokes a temperature increase due to the presence of air; c) presence of pollution covering the blocks, which absorbs ambient heat homogenously; d) holes in paving provoke a sudden and deep temperature increase…… 32

2.7. Orthoimages generated, which values are (a) RGB information, (b) Z or height values of the point cloud and (c) temperature values. In (b) colors correspond to Z-values from 0 cm (dark blue) to 35 cm (dark green), while in (c) colors and temperatures go from 24 C (dark blue) to 37 C (dark red), according to the color scale shown in Fig. 6. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article)…… 33

2.8. 3D-GPR data showing the anomalous areas identified as damaged filling. The numbers in the green boxes at the bottom right corner of the slices indicate the depth of each slice, assuming a velocity of propagation of the radar-wave of 12.7 cm/ns (from left to right, and top to bottom: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 140, 170 and 200 cm). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article)…… 34

2.9. 2D-GPR data showing different internal faults and utilities interpreted: (a) 800 MHz data showing attenuation in area 1-red, (b) 500 MHz data showing possible lack of filling or delamination in areas 2-yellow and 3-blue, (c) 800 MHz data showing the existence of a probable pipe in area 4-green, (d) 500 MHz data showing the occurrence of a probable sinkhole in area 6-pink, and (e) profiles position. The number of area and colors correspond to the numbers used in Fig. 8. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article)…… 35

2.10. Pathologies detected in the TLS data (RBG orthoimages and DEM) and additional pictures of the nearest surrounding to add more information to interpretation…… 36

3.1. Design of the experimental test site: (a) Example of the different types of pipes considered; (b) Construction of the test site; (c) RIEGL

LMS Z390i during the survey; (d) Orthophoto obtained with the laser scanner…… 42

3.2. Common GPR antenna orientations…….. 43

3.3. 1 GHz data acquired over two pipes in both transverse (left) and longitudinal (right) direction to the pipe. The radargrams show the different patterns of reflections obtained: hyperbolic or continuous flat reflections for transverse and longitudinal directions, respectively……. 44

3.4. GPR data acquired with different antenna frequencies to analyze the influence of the trace-interval on the hyperbolic reflection produced……. 44

3.5. GPR data produced and identification of pipelayouts for each antenna frequency and different setting parameters: 2.3 GHz (10 ns of total time window and trace-interval of 2 cm), 1 GHz (30 ns and 2 cm), 800 MHz (30 ns and 2 cm) and 500 MHz (30 ns and 2 cm)…….. 45

3.6. Analysis of the horizontal resolution: measured data with the antenna frequencies evaluated showing the pipe signatures obtained when considering different horizontal separations between consecutive pipes (the headings of column indicate the piping in Fig. 1 and distance between them)…… 46

3.7. Analysis of the vertical resolution for both measurements of the pipe diameter and differentiation of pipes aligned vertically but at different depths…….. 47

3.8. 1 GHz GPR data acquired over a 500 m diameter concrete pipe illustrating two different approaches to measure diameters: difference pick (left) and diffraction hyperbola (right) applications…….. 48

3.9. 1 GHz and 500 MHz GPR data acquired in the same section using both the perpendicular and parallel broadside orientations in Fig. 2…… 48

4.1. Location of the Seiró tunnel in Galicia (North-West Spain) (photo by F.J. Prego; map image © 2015 Google, Inst. Geogr. Nacional)…… 54

4.2. (a) GPR profile obtained through the wall of the tunnel showing the gunite layer; (b) thickness profile depths (in centimeters)…….. 55

4.3. GPR data showing some deficiencies in linings, such as delamination or voids and moisture problems that are appreciate from the exterior in form of efflorescence (white stains) (image by M. Solla)……. 55

4.4. 1-GHz data showing the position of inner steel ribs……. 55

5.1. General flow chart of the developed app……... 60

5.2. General app interface: (a) opening rad files with field data acquisition configuration and (b) radargram displayed from the .rd3 file……. 60

5.3. Difference between a complete (a) and a partial (b) reading of the radargram…… 61

5.4. Filtering buttons (from left to right): decrease/increase intensity, fix a numerical value, save changes and, finally, exit or exit without changes… 61

5.5. Color spectrum applied (a); contrast enhancement of the GPR signal into central values (b) and contrast enhancement process of the central values of the color spectrum (c)…….. 62

5.6. Comparison between an original raw signal representation (a) and its zoomed version (b)…… 62

5.7. Illustration of time zero correction and samples/traces ranges removal…… 63

5.8. Example of the DC component correction: (a) raw data and (b) radargram after filtering…… 64

5.9. Example of signal simplification: (a) raw data, (b) truncation (with a truncation value of 12), and (c) potential gain filter (with a gain value of 24)…… 64

5.10. Signal change due to its derivative: original raw data in blue and modified signal in red. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article)……. 65

5.11. Example of signal derivation: (a) raw data and (b) GPR signal after vertical derivation filtering. The parameter of proportionality, k, was set to 100……... 65

5.12. Intuitive graphic representation of the SMA…… 65

5.13. Raw data (a) and processed radargram (b) after applying a background removal filter……. 66

5.14. Fourier Transform. Wavelength obtained between two valleys or crests in the sinusoidal function in terms of period (T)…… 66

5.15. 1 GHz data acquired through a natural bump in a road surface showing an anomaly (circled area) at the interface between the base and sub-base layers: (a) raw data and (b) radargram after applying a frequency analysis filtering…….. 67

5.16. Example of cracking detection: (a) 1 GHz GPR data before processing and (b) data after applying a signal derivation filter, highlighting different types of cracks: sur cracks with ellipses and embedded cracks with rectangles…….. 68

5.17. Examples of thickness measurements in two different cases: (a) on an experimental area and (b) on an in-service road…… 68

5.18. Maximum circumference tangent to the vertex and non-secant to the concave side of a hyperbola: Eq. (a) and visualization in the app (b)… 69

5.19. Example of diameter measurements and hyperbola fit procedure…… 69

5.20. 2.3 GHz data acquired over two pipes of 200 and 500 mm-diameter and measurement approximations with the app…….. 70

Listado de Tablas

2.1. GPR data processing applied for the 800 MHz and 500 MHz antennas……. 29

2.2. Technical data of terrestrial laser scanner FARO Focus 3D X330 according to manufacturer datasheet……. 32

3.1. Summary of materials, diameters (cm) and depths (cm) employed in the pipe layout. The combinations used to analyze the effect of aliasing in vertical distance are also shown……. 42

3.2. Obtained values of penetration in-depth (under optimum conditions), and both horizontal and vertical resolutions calculated for each antenna frequency evaluated……. 43

3.3. Total time windows, temporal sampling intervals, number of stacks and spatial sampling intervals evaluated for each antenna frequency used……. 43

3.4. Summary of optimal parameters settings for an efficient GPR data acquisition on pipe detection obtained from the experiments in Section 3.. 49

Capítulo 1

Introducción

1.1. Origen y motivación de la tesis

1.1.1. Contextualización y planteamiento del problema

Las infraestructuras del transporte de un país constituyen uno de los principales indicadores de su desarrollo socio-económico: la cantidad y calidad de sus infraestructuras tiene, además, una incidencia directa sobre el nivel de vida de sus ciudadanos. En este contexto, cuando se habla de la calidad de las infraestructuras del transporte, nos estamos refiriendo, principalmente, a su estado de conservación y mantenimiento, de cara a su uso eficiente y con las máximas garantías de seguridad. La existencia de una red de infraestructuras del transporte bien planificada y conservada en condiciones óptimas contribuirá, entre otros aspectos, a la movilidad interna de sus habitantes o al libre intercambio de mercancías y de personas, con el consiguiente efecto multiplicador sobre la economía del país (Pearce et al., 2006; Venables, 2007), contribuyendo además a la vertebración del territorio sobre el que se asienta.

La grave crisis financiera que se desató en el año 2008 en los EE.UU. (Crisis de las Hipotecas *Subprime*) y su posterior contagio a Europa, marcó el inicio de una gran recesión económica, en la que aún nos encontramos (Greenspan, 2010). El último decenio se ha caracterizado por la contención en el gasto público como principal medida para reducir el creciente déficit de las administraciones. Este hecho se tradujo en un drástico recorte en las inversiones en obra civil e infraestructuras del transporte en España en los últimos años, tanto por parte del Estado (Ministerio de Fomento, principalmente) como de las Comunidades Autónomas, obligadas a ajustarse a un techo de gasto que mantenga el déficit público acorde con las políticas económicas dictadas por las autoridades monetarias de la Unión Europea (UE) y del Banco Central Europeo (BCE).

En un escenario de escasez de recursos económicos como el descrito, en el que se limita extraordinariamente, o no se puede acometer, la construcción de nuevas infraestructuras del transporte (a excepción de diversas líneas de ferrocarril de alta velocidad, con unos plazos de finalización muy inciertos), la

conservación de las ya existentes requiere de la máxima atención. Las necesidades de mantenimiento de estas obras deberán ser atendidas de manera eficiente, priorizando las intervenciones y las inversiones necesarias para su conservación, buscando mecanismos que faciliten la toma de decisiones a partir de criterios técnicos objetivos. Los sistemas de inspección empleados actualmente, de forma generalizada, presentan importantes carencias en cuanto a la tecnificación y calidad de la información suministrada, ya que están basados, principalmente, en inspecciones visuales más o menos subjetivas, que en muchas ocasiones dependen de la pericia del operario que las realiza, *de visu*.

Las técnicas de evaluación no destructivas (*Non Destructive Techniques*, NDT) podrían jugar un papel especialmente importante en este escenario, puesto que permiten analizar las infraestructuras del transporte de manera eficaz, extrayendo información de su situación (McCann et al., 2001), muy útil a la hora de conocer su estado y considerar las medidas de intervención que sean necesarias en cada momento, priorizando además su ejecución. Se trata de técnicas económicamente ventajosas y asequibles, en comparación con las técnicas de tipo destructivo, que podrían llegar incluso a poner en peligro la integridad de la propia infraestructura (es el caso, por ejemplo, de la extracción sin control de probetas testigo).

En la actualidad coexisten diversas técnicas no destructivas para el estudio y evaluación de las obras de ingeniería civil, tales como métodos eléctricos, electromagnéticos y sónicos/ultrasónicos. Cada método proporciona una información diferente en relación a las condiciones, materiales y características constructivas empleadas en el elemento que se quiere analizar. Así, a diferencia de otras técnicas que aportan, esencialmente, información de tipo superficial o subsuperficial de las infraestructuras (por ejemplo, el láser escáner terrestre (*Terrestrial Laser Scanning,* TLS) y la termografía infrarroja (*Infrared Termography,* IRT) (Clark et al., 2003; Olsen et al., 2010), el radar de subsuelo o georradar (*Ground Penetrating Radar*, GPR) facilita datos del estado interno de los materiales que se emplearon en su construcción o del terreno sobre el que se asienta. Es, por tanto, una herramienta de inspección que sirve tanto de método de contraste como de técnica de apoyo para afrontar el análisis integral del estado de una obra de ingeniería civil.

1.1.2. Motivación de la tesis

El origen de esta tesis se sitúa, cronológicamente hablando, en el año 2010, en un proyecto de investigación presentado a la convocatoria competitiva “Fondo Tecnológico” del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI), organismo dependiente del Ministerio de Economía y Competitividad-Gobierno

de España, uno de los principales entes co-financiadores de actividades de I+D+i de nuestro país.

El proyecto, denominado “SITEGI: Sistemas Integrados de Tecnologías para la Gestión e Inspección de Infraestructuras del Transporte”, tuvo su génesis en el seno del Grupo de Investigación en Geotecnologías Aplicadas de la Universidad de Vigo. Los investigadores de este grupo plantearon a un consorcio de empresas gallegas (entre ellas, las constructoras ourensanas Misturas, S.A. y Extraco, S.A.) la posibilidad de desarrollar una unidad móvil de inspección que agilizase los procesos de recogida de datos y parámetros de control en las infraestructuras del transporte (principalmente, carreteras y viales), tanto cualitativa como cuantitativamente, de una forma eficiente y objetiva, con la menor dependencia posible de los operarios que habitualmente realizan estas labores. Es, precisamente, en los departamentos de I+D+i de las dos empresas mencionadas donde este doctorando ha desarrollado su actividad profesional durante los últimos diez años. Como responsable de dichos departamentos, organizados de acuerdo con el Sistema de Gestión de I+D+i según la norma UNE 166.002, gestiona y coordina los diferentes proyectos de innovación en los que participan las dos compañías, que son habitualmente certificados de acuerdo con la norma UNE 166.001 (“Proyectos de I+D+i”). Se trata, en definitiva, de actividades relacionadas con la innovación en la construcción de obra civil, acometidas con la colaboración de organismos y centros de investigación públicos y privados, así como con plataformas tecnológicas de gran actividad en el ámbito de los proyectos de I+D+i en nuestro país: Plataforma Tecnolóxica Galega de Medio Ambiente-ENVITE; Plataforma Tecnológica Ferroviaria Española (PTFE).

En el proyecto SITEGI se diseñó y construyó una unidad móvil de inspección específica, prototipo dotado de equipos de alta precisión y última generación, de interés para el análisis de las infraestructuras del transporte (Martínez-Sánchez et al., 2013; Prego et al., 2015): Láser escáner móvil (LiDAR) para la obtención de nubes de puntos georreferenciados que permitiesen realizar modelos tridimensionales de las estructuras y del terreno circundante; sistemas de posicionamiento GPS para la geolocalización exhaustiva de los elementos analizados; cámaras de vídeo RGB y cámaras termográficas para vigilancia y análisis de las vías durante el proceso de inspección; sistemas de perfilometría láser (IRI) para el control de la textura superficial de las capas de rodadura y, finalmente, un georradar (GPR) cuyo principal cometido en el proyecto fue probar su idoneidad para el control de los espesores de las capas de firmes.

El proyecto SITEGI se completaba con el diseño de un novedoso programa de control que integrase los resultados obtenidos por cada uno de los instrumentos de inspección (Varela et al., 2014a; Varela et al., 2014b; González-Jorge et al., 2016), con la finalidad de obtener una aproximación al estado real de la infraestructura, a partir del análisis de los diferentes

parámetros aportados por cada equipo. Con estos medios, las empresas participantes en el proyecto sumarían a su "*know-how*" una gestión más eficiente de las infraestructuras del transporte, basada en parámetros objetivos de control: la denominada "gestión por indicadores" es una de las metas marcadas por los organismos públicos y privados gestores de estas infraestructuras para los próximos años (administraciones públicas; concesionarias de autopistas; empresas conservadoras-mantenedoras de carreteras).

La obtención de financiación del CDTI para llevar a cabo el proyecto SITEGI (desarrollado finalmente en el trienio 2011-2013), supuso la colaboración efectiva del consorcio de empresas participantes en el proyecto con el Grupo de Investigación en Geotecnologías Aplicadas de la Universidad de Vigo. Y fue, además, el primer contacto de los departamentos de I+D+i de Extraco, S.A. y Misturas, S.A. con las técnicas de inspección GPR, muy poco conocidas en el entorno de las empresas constructoras.

El desarrollo del proyecto SITEGI puso de manifiesto el gran potencial de esta técnica como herramienta útil para el análisis y control de las obras de ingeniería civil e infraestructuras del transporte, tanto en servicio como de nueva construcción. Cabe mencionar también que el proyecto SITEGI obtuvo el Premio ACCÉSIT en la modalidad de "Premio al Mejor Proyecto de I+D+i", dentro de la I Convocatoria de Premios Anuales a la Innovación en Infraestructuras Viarias (2013) de la Plataforma Tecnológica Española de la Carretera (PTC).

En este contexto, la presente tesis doctoral pretende profundizar y buscar nuevas aplicaciones del GPR en este campo de actividad, evaluando su idoneidad y contribuyendo, además, a la difusión y conocimiento de esta técnica de prospección no destructiva entre las empresas de construcción, un sector tradicionalmente conservador y muy refractario a la innovación en sus procesos.

1.2. Objetivos de la investigación

El objetivo principal de esta tesis doctoral es mostrar la potencialidad y adecuación del georradar (GPR) como herramienta prospectiva de gran utilidad para el análisis e inspección de obras de ingeniería civil e infraestructuras del transporte, de manera que se contribuya a la difusión y empleo de esta técnica en este campo particular de actividad.

Atendiendo a estas premisas, las contribuciones presentadas en este trabajo de investigación persiguen los siguientes objetivos, asociados al anterior:

1. Estudiar la eficiencia de los sistemas GPR como herramientas útiles para el análisis e inspección del estado de los pavimentos en las infraestructuras del transporte.

    a. Analizar su potencial como técnica de evaluación no destructiva adecuada para las labores de mantenimiento y conservación de las infraestructuras, en particular en el campo de los firmes.
    b. Estudiar su idoneidad para detectar y evaluar la presencia de patologías en las capas de base y rodadura: entre otras, grietas, fisuras, presencia de cavidades y subsidencias.
    c. Probar su eficacia y exactitud frente a los procedimientos de inspección convencionales, basados habitualmente en el empleo de técnicas de tipo destructivo.
    d. Analizar su complementariedad con otras técnicas de inspección de última generación, como son la termografía infrarroja (IRT) y el empleo del láser escáner terrestre (TLS), a fin de obtener un mayor número de datos que aporten información relevante y veraz sobre el estado de los firmes.
    e. Aportar nuevas metodologías de trabajo que permitan la evaluación integral del estado de los pavimentos, a partir de la interpretación conjunta de resultados obtenidos con el recurso a otros procedimientos de inspección asociados y/o complementarios (IRT y TLS).
    f. Validar los resultados obtenidos en casos reales de infraestructuras del transporte afectadas por diversos tipos de fallos y patologías asociadas, que ponen en peligro su uso e integridad estructural.

2. Presentar el GPR como un método apropiado para su aplicación en la localización de servicios enterrados asociados a las obras e infraestructuras del transporte.

    a. Estudiar su potencialidad en la detección de servicios subterráneos presentes en la traza de una obra y en sus inmediaciones, con el fin de minimizar los cortes de suministro e interferencias de uso que pudieran darse en la ejecución de este tipo de obras.
    b. Analizar su utilidad para la reducción de costes asociados a las operaciones en estos servicios, minimizando los tiempos de intervención, así como los posibles impactos medioambientales y las molestias a los usuarios.
    c. Estudiar la efectividad de los procedimientos de inspección basados en el empleo del GPR, a partir de las propiedades de los materiales presentes en las zonas de prospección, orientación y tamaño de los reflectores detectados, junto con otros parámetros de campo.

d. Mejorar la efectividad y precisión de los trabajos de prospección con GPR en la localización de servicios enterrados, en particular, en el caso de conducciones y tuberías subterráneas, proponiendo procedimientos de actuación mejorados. En concreto, se analizarán distintas frecuencias y orientación de antenas, así como distintos parámetros de adquisición de campo.
e. Validar las mediciones y procedimientos aportados en casos reales, que permitan conocer su exactitud y veracidad. Las metodologías diseñadas se evaluarán en una pista experimental construida en base a situaciones reales en obra.

3. Estudiar el potencial del GPR como herramienta de inspección útil para el control y monitorización en las fases iniciales de ejecución de túneles en construcción, como infraestructuras de ingeniería civil de gran complejidad estructural.

   a. Empleo del GPR como técnica de evaluación no destructiva para la detección de patologías inherentes a las fases tempranas de construcción de un túnel ferroviario.
   b. Utilidad del GPR en la obtención de información complementaria para el control de calidad en fases críticas del proceso constructivo, de interés para la seguridad de la obra durante su ejecución y para su mantenimiento futuro.
   c. Posibilidades de uso del GPR en obras ejecutadas por diferentes procedimientos constructivos (Nuevo Método Austríaco), en la localización y detección de elementos y detalles constructivos asociados a la seguridad estructural y calidad final de la obra: espesores de gunitados, situación y disposición de elementos de sustentación, etc.
   d. Validación de la capacidad de prospección del GPR en un túnel ferroviario real en fase de construcción.

4. Aportar nuevas herramientas simplificadas para el tratamiento de la señal GPR sin necesidad de recurrir exclusivamente a los programas de procesado comerciales, contribuyendo a la difusión y popularización de su empleo en el campo de la ingeniería civil y en la construcción y control de infraestructuras del transporte.

   a. Diseñar una aplicación *Android* de carácter gratuito para móviles y *tablets* que permita el procesado básico de la señal GPR en este tipo de dispositivos.
   b. Extender el uso del GPR a personal no especializado en esta técnica, de manera que sea capaz obtener resultados preliminares aproximados del estado de las infraestructuras prospectadas a través

del procesado de la señal en *smartphones* y *tablets*, de una forma más rápida, intuitiva y accesible.

c. Buscar métodos simplificados de análisis y tratamiento de la señal GPR, que rebajen los requerimientos computacionales y tiempos de procesado, recurriendo a la programación por hilos y al aprovechamiento conjunto de varios núcleos a la vez (*multi threaded programming*).
d. Implementar herramientas de medición de detalles constructivos relevantes, tales como espesores de pavimentos, diámetros de tuberías y armaduras enterradas.
e. Validar la veracidad y exactitud de las medidas aportadas por la *app Android* en casos reales de infraestructuras del transporte y obras de ingeniería civil.

1.3. Organización de la disertación

Esta disertación se presenta como un compendio de artículos científicos publicados en revistas internacionales de reconocido prestigio. La estructura de la investigación está compuesta por cuatro artículos, todos ellos publicados en revistas indexadas en el *Journal Citation Reports (JCR)*, organizados en varias secciones.

Teniendo en cuenta la normativa vigente en la Universidad de Vigo para la aceptación de una tesis doctoral formada por un compendio de artículos científicos, se requiere de una introducción que apoye la coherencia temática de la investigación realizada y que incluya una justificación razonada de la presencia de cada uno de los artículos que componen el cuerpo de la tesis.

El Capítulo 1 supone una introducción a la temática de la investigación, contextualizándola y explicando los motivos que dieron lugar a su génesis (Apartado 1.1.). Se incluyen también aquí los objetivos de la investigación (Apartado 1.2), una explicación de cómo se ha organizado la disertación (Apartado 1.3), el estado del arte (Apartado 1.4.) y un punto específico dedicado a las referencias bibliográficas empleadas (Apartado 1.5).

El contenido científico de este trabajo se organiza en tres secciones bien diferenciadas, atendiendo a la temática abordada en cada una. La Sección 1 está compuesta por los Capítulos 2, 3 y 4, y presenta diferentes casos de estudio de aplicación de las técnicas de inspección GPR en el campo de la ingeniería civil e infraestructuras del transporte. Así, el Capítulo 2 muestra el análisis con GPR de patologías presentes en este tipo de infraestructuras, en particular en el ámbito de los firmes y pavimentos, abordando su complementariedad con otras técnicas de inspección de última generación. El Capítulo 3 se centra en la potencialidad del GPR como técnica de inspección

no destructiva para la detección y localización de tuberías y servicios enterrados en obras de ingeniería civil e infraestructuras. El último capítulo de esta sección (Capítulo 4) analiza la aplicabilidad y eficiencia del GPR en el control de calidad de un túnel en fases tempranas de construcción.

La Sección 2 (Capítulo 5) está dedicada a las técnicas de procesado de la señal GPR y *software* de aplicación: presenta el desarrollo de una nueva herramienta Android para el tratamiento de datos GPR en *smartphones* y *tablets*, estudiando su aplicación en casos reales de ingeniería civil.

Finalmente, la Sección 3 se compone de los Capítulos 6 y 7, que incluyen la Discusión y Conclusiones Generales, respectivamente. En ellos se resumen las principales contribuciones de esta tesis doctoral y las conclusiones a las que se ha llegado, a partir de los diferentes trabajos de investigación desarrollados. Como punto final de la disertación, se incluyen también propuestas de investigación a modo de líneas de trabajo futuras, vinculadas a la temática de la tesis.

A continuación se describen, de forma resumida, las secciones que componen la disertación:

1.3.1. Sección 1: Aplicación de las técnicas de inspección GPR en el campo de la ingeniería civil e infraestructuras del transporte

1.3.1.1. Análisis de patologías en firmes y pavimentos

En el campo de la construcción de carreteras y viales, las unidades de obra que constituyen su soporte (explanadas y bases) y el paquete de firmes (capas intermedias y de rodadura), suponen una de las principales inversiones en este tipo de infraestructuras lineales, tanto durante su construcción como en el momento de abordar las labores de conservación y mantenimiento periódico que requieren, una vez entran en servicio. Por ello, una conveniente inspección de los pavimentos, con la localización y caracterización de patologías asociadas, supone un paso fundamental para garantizar su calidad durante el proceso de construcción y para tomar decisiones adecuadas relativas a los trabajos de reparación que habrá que afrontar a lo largo de su vida útil.

El **Capítulo 2**, titulado **"*Joint use of GPR, IRT and TLS techniques for the integral damage detection in paving*"**, presenta una metodología de inspección para pavimentos y firmes basada en el empleo conjunto del GPR con otras técnicas de inspección no destructivas (termografía infrarroja –IRT– y láser escáner terrestre –TLS–). Se analiza su idoneidad para estudiar el estado de las capas que conforman el paquete de firmes y localizar la presencia de patologías internas en esta parte fundamental de las infraestructuras (como pueden ser grietas, fisuras, cavidades y subsidencias). El artículo que conforma

este capítulo ha sido publicado en la revista internacional ***Construction and Building Materials*** *(Elsevier SCI Ltd.)*, indexada en el *Journal Citation Reports* (JCR), ocupando el puesto 8º de 61 revistas (Q1), dentro de la categoría de *Construction & Building Technology* (y el puesto 11º de 125 en la categoría de *Engineering, Civil* (Q1)) (2016).

1.3.1.2. Detección de tuberías y servicios enterrados en obras de ingeniería civil

En el momento de acometer una obra (tanto de nueva planta como en determinadas operaciones de mantenimiento y conservación), y antes de la firma del acta de replanteo, es necesario contar con información detallada sobre la presencia de servicios enterrados en las zona de actuación, de manera que se puedan planificar y acometer los trabajos previstos sin interferir con ellos o, de ser necesario, proceder a su retirada de una manera segura y eficiente. La proliferación de todo tipo de servicios enterrados, con redes especialmente densas en zonas urbanas y periurbanas, requiere que las empresas constructoras contacten sistemáticamente con las compañías de las que dependen los suministros (agua, gas, electricidad, telecomunicaciones, etc.), a fin de tener convenientemente localizadas las conducciones y tuberías enterradas. Dado que los departamentos de servicios afectados de estas empresas no siempre cuentan con información precisa o actualizada y que, en ocasiones, incluso no existe este tipo de información, el GPR se configura como un instrumento de prospección no destructiva de indudable interés a la hora de acometer estas actuaciones, mejorando la seguridad y ahorrando importantes costes asociados a estas actuaciones.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el **Capítulo 3** presenta un trabajo de investigación titulado "***Efficient GPR data acquisition to detect underground pipes***", en el que se presentan estrategias para una detección y localización eficiente de varios tipos de tuberías enterradas, probadas a escala real en un tramo de prueba construido para tal fin en las instalaciones de las empresas Extraco, S.A. y Misturas, S.A. en Allariz, (Ourense). Este capítulo está constituido por el artículo publicado en la revista internacional ***NDT&E International*** (*Elsevier SCI Ltd.),* indexada en el *Journal Citation Reports (JCR)*, ocupando el puesto 4º de un total de 33 revistas (Q1), dentro de la categoría *Materials Science, Characterization and Testing Science* (2016).

1.3.1.3. Aplicación del GPR en el control de calidad de un túnel en construcción

Las herramientas de inspección no destructivas basadas en la técnica GPR se han empezado a probar, tímidamente, en el ámbito de la construcción de grandes infraestructuras del transporte; en particular, en el estudio de túneles en servicio. El trabajo de investigación que compone esta sección propone recurrir al GPR durante el proceso de construcción de la infraestructura, pero ya desde sus fases más tempranas, por el gran potencial que aporta a la hora de controlar la calidad de la obra ejecutada en el mismo momento en el que se aborda. Se consigue así prevenir la aparición de patologías futuras derivadas de una mala ejecución, o de errores y patologías ocultas presentes en el proyecto, que sólo se manifiestan en el momento mismo de acometer la obra. El GPR permite controlar, entre otros parámetros de calidad, el espesor de las capas de hormigón proyectado que constituyen el recubrimiento de las galerías del túnel, la presencia de cárcavas, oquedades y humedades, o la ubicación y colocación de los elementos de sustentación, controlando así que la configuración estructural se ejecuta de forma correcta y se adecúa a lo previsto en el proyecto constructivo.

El **Capítulo 4**, titulado "***Assessing the applicability of Ground-Penetrating Radar to quality control in tunneling construction***" presenta las contribuciones obtenidas en este campo de aplicación y fueron publicadas en la revista internacional ***Journal of Construction Engineering and Management***, publicada por la *American Society of Civil Engineers* (ASCE). Se trata de una revista indexada en el *Journal Citation Reports* (JCR), ocupando el puesto 22º de 61 revistas (Q2) en la categoría de *Construction & Building Technology* (y el puesto 44º de un total de 125 revistas (Q2) en la categoría de *Engineering, Civil)* (2016).

1.3.2. Sección 2: Técnicas de procesado y software de aplicación

Durante el proceso de elaboración de esta tesis, se ha comprobado que uno de los principales escollos para la difusión de la técnica GPR en la inspección y caracterización de las infraestructuras del transporte y obras relacionadas radica en la dificultad del tratamiento y análisis de la señal obtenida en los trabajos de prospección realizados. La complejidad de la interpretación de los resultados de los radargramas, así como la necesidad de recurrir a programas de procesado de cierta dificultad de uso, contribuyen a que esta técnica no se haya popularizado ni extendido tanto como sería deseable, si tenemos en cuenta su potencial como herramienta de inspección no destructiva en el ámbito de las obras de ingeniería civil. Frente a los programas de uso comercial más habituales, de probada efectividad pero de carácter no gratuito, el **Capítulo 5** presenta como aportación una nueva aplicación Android para el

procesado de la señal de una manera más sencilla e intuitiva, en dispositivos móviles y *tablets*, totalmente gratuita. Bajo el título de "***A mobile Android tool for simplified GPR data processing in construction applications***", el capítulo recoge, en esta última sección de contenidos científicos, los avances desarrollados en este campo, publicados en la revista internacional ***Automation in Construction*** (*Elsevier Science BV*), indexada en el *Journal Citation Reports (JCR*), ocupando el puesto 11º de 61 revistas (Q1), en la categoría de *Construction & Building Technology* (y el puesto 15º de 125 (Q1) en la de *Engineering, Civil*) (2016).

1.3.3. Sección 3: Discusión y conclusiones

Como ya se ha indicado al principio de este apartado, la **Sección 3** agrupa los **Capítulos 6 y 7**, dedicados a presentar la discusión razonada de los trabajos científicos que conforman la tesis y las conclusiones finales obtenidas, respectivamente.

1.4. Estado del Arte

1.4.1. Origen del GPR y antecedentes de uso en el ámbito de la ingeniería civil

El radar de subsuelo o georradar (*Ground Penetrating Radar*, GPR, por sus siglas en inglés) es una técnica geofísica de análisis e inspección no destructiva que, desde finales del siglo XX, se ha ido introduciendo lentamente en el ámbito de la ingeniería civil. Las teorías que rigen sus principios básicos de funcionamiento (principalmente, el comportamiento de las ondas electromagnéticas y su modelización) fueron desarrolladas en la segunda mitad del siglo XIX, a partir de los estudios del científico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) y del físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894). El primero unificó por vez primera la electricidad, el magnetismo y la luz como manifestaciones distintas de un mismo fenómeno físico, formulando la Teoría Clásica de la Radiación Electromagnética (que incluye las célebres Ecuaciones de Maxwell). Por su parte, Hertz descubrió el efecto fotoeléctrico, la manera en que se propagan las ondas electromagnéticas y las formas de producirlas y detectarlas, siendo el primero en demostrar que se reflejan sobre las superficies metálicas, que actúan como "reflectores perfectos". Sin embargo, la carencia de medios técnicos en esa época ralentizó su desarrollo y popularización, a pesar del esfuerzo de otros investigadores coetáneos por estudiar las aplicaciones de los nuevos descubrimientos.

En 1904, el alemán Christian Huelsmeyer (1881-1957) patenta el primer sistema anticolisión de buques utilizando ondas electromagnéticas, el cual fue

denominado "*telemobiloskop*" (Rohling, 2014). También a principios del siglo XX el italiano Guillermo Marconi (1874-1937) desarrolla la radio y la transmisión inalámbrica, influyendo decisivamente en el diseño de las antenas emisoras-receptoras de ondas. En 1917, Nikola Tesla (1856-1943) establece los principios teóricos del futuro radar, con estudios fundamentales sobre frecuencias y niveles de potencia en la emisión de las ondas.

Son muchos los científicos e ingenieros que contribuyeron decisivamente en el siglo XX al desarrollo definitivo del radar, impulsados sobre todo por el ambiente prebélico anterior a la Segunda Guerra Mundial y por el inicio de la propia contienda. Este avance significativo se debió a la necesidad de buscar nuevas armas y novedosos sistemas para la localización del enemigo, con el fin de destruirlo o de neutralizarlo. Como en otras ocasiones en la historia de la humanidad, un conflicto armado se convierte en el principal motor de desarrollo de nuevas tecnologías que, de un uso exclusivamente militar, acabarán dando el salto a su empleo en el mundo civil. En este caso, los países que participaron en el conflicto (principalmente, las grandes potencias militares de la época: EE.UU., Reino Unido y Alemania) fueron desarrollando, de manera paralela, distintos sistemas radar, aportando grandes avances que, sumados entre sí, han dado lugar al desarrollo de los sistemas radar tal y como los conocemos en la actualidad: se trata de los mismos principios que rigen el funcionamiento de las técnicas de prospección GPR (Daniels, 2004; Jol, 2009).

En el desarrollo del radar durante la II Guerra Mundial destaca especialmente la aportación del ingeniero y físico escocés Sir Robert Alexander Wattson-Watt (1892-1973) que, desde la *Aldershot Wireless Station* del *Air Ministry Meteorological Office* primero (Servicio Meteorológico de la Aviación Militar del Reino Unido), y luego desde el *Air Ministry* (Ministerio del Aire), desarrolló y patentó el primer sistema radar capaz de detectar un avión en el aire, a partir de una señal electromagnética emitida desde tierra, en el año 1935: este equipo supuso un instrumento esencial de los aliados para llevarlos hasta la victoria final en esta contienda, contribuyendo además al posterior desarrollo de nuevos estudios sobre el radar y sus aplicaciones, tanto militares como civiles.

A partir de los años 70 del siglo XX comienza el despegue del radar de subsuelo como técnica independiente, llevándose a cabo los primeros estudios para su aplicación en investigaciones lunares, así como en el ámbito de la geología y de la glaciología terrestre (Campbell et al., 1974; Annan et al., 1976). De ahí se dará el salto al campo de la ingeniería civil, en las décadas de los años 70 y 80 del siglo pasado. De las primeras referencias de uso del georradar en el campo de las infraestructuras del transporte destaca el trabajo de Bertram et al. (1974), así como el análisis de las aplicaciones desarrolladas hasta mediados de los años 80 del siglo XX, elaborado por Daniels et al. (1988). Desde entonces, la aplicación del GPR en otros tipos de obras de

ingeniería civil se ha ampliado significativamente, como han constatado Benedetto y Pajewski (2015).

Sin embargo, a pesar del enorme potencial demostrado por el GPR en este campo, su introducción y empleo de manera rutinaria en los departamentos técnicos de constructoras y empresas contratistas de obras no acaba de cuajar: al desconocimiento de esta técnica por parte de estas empresas se une la dificultad de interpretación de los radargramas resultantes de las prospecciones, así como la falta de personal especializado para ello en sus cuadros técnicos. Todos estos aspectos han contribuido, en mayor o menor medida, a que las técnicas de inspección GPR no se hayan popularizado ni generalizado tanto como sería deseable, de manera que existen aún amplios campos de aplicación, dentro de las infraestructuras del transporte y de las obras de ingeniería civil, que han sido muy poco o casi nada estudiados. Es precisamente en estas parcelas de conocimiento en los que esta tesis pretende avanzar, buscando además la difusión del potencial del GPR en el mundo de la construcción de obra civil y de las infraestructuras del transporte.

1.4.2. Aplicación del GPR en el estudio de patologías en firmes y pavimentos

Las primeras aplicaciones del GPR en ingeniería civil se desarrollaron, precisamente, como se indicó en el apartado anterior, en el ámbito de los firmes, una de las unidades de obra de mayor importancia en la construcción y mantenimiento de las infraestructuras lineales del transporte: caminos, carreteras, autopistas, autovías y vías de servicio (Kraemer et al., 2003). En este caso concreto, se empleó por primera vez la técnica GPR para una evaluación preliminar del estado de los pavimentos de aeropuertos de uso militar de los EE.UU., en un estudio coordinado por los ingenieros del *Air Force Weapons Laboratory* de Dayton (Bertram et al., 1974). Desde entonces, el empleo del GPR ha tenido cierta proyección en este campo, pasando de un uso restringido al ámbito militar a ser aplicado en la vida civil.

Dentro del mundo de las obras de la ingeniería civil y de las infraestructuras del transporte, el uso del GPR se ha aplicado, principalmente, al estudio y evaluación de los espesores de las capas de firmes, pavimentos, explanadas y suelos tratados. Son numerosas las referencias que documentan este uso particular, uno de los que mayor recorrido ha tenido en los últimos años, desde principios del siglo XXI (Saarenketo et al., 2000; Maser et al., 2012).

A medida que las técnicas de prospección GPR han ido avanzando, además de su potencial para la estimación de espesores de capas de firmes, se han probado experimentalmente las ventajas que aporta en la localización y estudio de patologías asociadas a estas unidades de obra: se trata de un campo de

aplicación menos desarrollado, pero que está dando resultados de gran interés (Rister et al., 2008) a la hora de conocer el estado de deterioro de pavimentos y suelos en infraestructuras del transporte en servicio.

Pese a estos resultados tan prometedores, resulta conveniente profundizar en los protocolos de actuación que se emplean en este campo, con el fin de mejorar la calidad de los resultados. Es necesario planificar diseños de prospecciones específicos para firmes y pavimentos, teniendo en cuenta sus particularidades, con el fin de alcanzar resultados cada vez más exactos y una adecuada interpretación de los mismos. Además de sistematizar estos protocolos de actuación, mejorándolos, resulta de interés comparar los resultados de inspección GPR con los obtenidos de la aplicación de otras técnicas de evaluación no destructivas (por ejemplo, la termografía infrarroja), que aportan información complementaria, tremendamente útil para un conocimiento e interpretación integral de las patologías localizadas, de cara a una correcta y efectiva planificación de las acciones correctivas pertinentes (Solla et al., 2014).

1.4.3. Detección de tuberías y servicios enterrados en obras de ingeniería civil

La detección genérica de elementos enterrados en el suelo constituye, por definición, el ámbito de uso natural del radar de subsuelo, en oposición al denominado radar “convencional”, al que podríamos considerar como su “hermano gemelo”, en el que las ondas electromagnéticas se propagan fundamentalmente por el aire o por el agua. La localización de elementos enterrados o ubicados *ex profeso* en el subsuelo es una tarea muy compleja, que tiene en las técnicas de prospección con GPR a uno de sus principales aliados. La literatura científica presenta gran cantidad de referencias en las que esta técnica de prospección se ha empleado con éxito en la búsqueda y ubicación de multitud de elementos enterrados, muchos de ellos realmente sorprendentes para los no familiarizados con esta técnica y sus aplicaciones; por citar algún ejemplo: en el control de excavaciones arqueológicas (Novo et al., 2014), en la localización de minas enterradas en zonas de conflictos armados (Daniels, 2006) o, incluso, en el ámbito forense, como instrumento de apoyo en la búsqueda de cadáveres y cuerpos enterrados (Solla et al., 2012).

Desde el punto de vista de la ingeniería civil y de las obras relacionadas (que es, no lo perdamos de vista, el ámbito particular de esta tesis), la ubicación y monitorización de los servicios urbanos enterrados que puedan encontrarse en la zona de construcción de una infraestructura constituye una labor fundamental antes de comenzar su ejecución. Su localización es una condición necesaria para desarrollar la obra sin interferencias con ellos, toda vez que podrían verse afectados por cortes y alteraciones que pusiesen en peligro el

suministro de agua, gas, electricidad o de voz y datos a los ciudadanos, por citar algunos de los servicios más habituales. Por no hablar de los problemas de seguridad derivados de una manipulación inadecuada en la ejecución de la obra, llegando, en el peor de los casos, a producirse explosiones de gas, inundaciones, etc.

En una sociedad especialmente tecnificada como la actual, la red de servicios enterrados es cada vez más densa, especialmente en zonas urbanas, de forma que cualquier tipo de intervención en el suelo y subsuelo de nuestras ciudades y pueblos requiere conocer qué tipo de canalizaciones, tuberías y servicios se localizan en la zona de actuación. Antes de iniciar una obra de ingeniería civil, la normativa española obliga a la empresa contratista y a la administración a que firmen conjuntamente el “Acta de Comprobación de Replanteo”: se trata de un documento administrativo que deja constancia, por escrito, de que el proyecto redactado es viable técnicamente y que se adecúa a la realidad física de la zona de actuación. El acta, además, comprueba que los terrenos que se verán afectados por las obras están disponibles para la ejecución de los trabajos previstos y que se pueden ocupar, habiendo pasado previamente por otro tipo de trámites y comprobaciones burocráticas relacionadas (por ejemplo, expedientes de expropiación, replanteos previos, etc.). La doble comprobación administrativa que se hace en este acto documentado (viabilidad técnica y disponibilidad del terreno) implica conocer, aunque sea de manera somera, qué tipo de servicios enterrados se podrían ver afectados por la obra durante su ejecución, a fin de tomar las medidas oportunas en cuanto a adecuación del proyecto, afecciones a dichos servicios y medidas de seguridad adicionales que se consideren necesarias (relacionadas con el tipo de conducción enterrada presente en la zona).

En la práctica, las constructoras recurren normalmente a las propias empresas suministradoras de los servicios (compañías de gas, electricidad, agua y redes de voz y datos) para comprobar que los datos que manejan son correctos. Pero no siempre se dispone de esta información: porque hay redes antiguas que no están bien delimitadas; porque la cartografía de base está obsoleta o no hay registros suficientemente fiables, etc. En estos casos, los departamentos técnicos de las constructoras se ven obligados a recurrir a cualquier otro tipo de fuentes de información que puedan aportar pistas para su adecuada localización: reconstrucciones de cartografía a partir de mapas históricos y de vuelos fotogramétricos anteriores; preguntando a los vecinos de la zona o, en ocasiones, recurriendo a otras constructoras que interviniesen en la zona anteriormente y que puedan compartir los datos de los que disponen. En última instancia, se recurre a técnicas de inspección destructivas (catas, sondeos), de mayores costes, complejidad de ejecución y riesgos asociados.

Por todo lo expuesto, el GPR se configura como una herramienta de gran utilidad a la hora de localizar los servicios enterrados, tanto para buscar

aquellos de los que no se conoce su ubicación exacta, como para verificar que los indicados en el proyecto y en la cartografía de referencia de la obra han sido correctamente localizados y señalizados (Gamba et al., 2000; Petinelli et al., 2009; Bonomo et al., 2011).

Si tenemos en cuenta los fenómenos de atenuación de la señal cuando penetra en el suelo, el limitado poder de penetración de la misma y la proliferación de objetos enterrados cercanos en las redes de servicios, con interferencias entre sí, se entiende perfectamente la necesidad de establecer nuevos y optimizados protocolos de prospección (Sagnar et al., 2016): conviene buscar pautas de actuación GPR que cada vez se adapten mejor a la tipología específica de la red de servicios presente en la zona de análisis, capaces de estudiar y delimitar secciones de datos cada vez más complejas, en las que aparecen reflexiones muy numerosas y muy próximas entre sí, con casos de solapamiento e interferencias que dificultan la interpretación de los radargramas obtenidos (Shaari et al., 2010).

1.4.4. Aplicación del GPR en el análisis de túneles

La aplicación de las técnicas de inspección GPR en el estudio de los túneles no es nueva, pero puede considerarse como puntera, pues hasta fechas recientes no era posible localizar experiencias del empleo de la tecnología GPR en este tipo de infraestructuras. Los primeros estudios de cierta envergadura empezaron a desarrollarse a principios del siglo XXI (año 2000), a medida que se extiende la construcción de nuevas líneas ferroviarias (especialmente de alta velocidad) en todo el mundo y que, a la par, las técnicas GPR avanzan en aspectos técnicos muy específicos, útiles y necesarios para poder abordar su empleo con ciertas garantías de fiabilidad. Los estudios desarrollados sobre algunos de estos aspectos han resultado cruciales para la obtención de resultados cada vez más exactos en el análisis e inspección de túneles con esta técnica: entre ellos, la determinación de las propiedades dieléctricas del hormigón *in situ,* como el material de construcción por antonomasia (Davis et al., 2003), y el estudio de la presencia de humedades y su comportamiento en estas infraestructuras desde el punto de vista del GPR (Laurens et al., 2005), habitualmente afectadas por la presencia de cursos y vetas de agua subterráneas que pueden llegar a poner en entredicho su estabilidad estructural.

El diseño y la construcción de este tipo de infraestructuras es cada vez más complejo, tanto desde el punto de vista proyectual como tomando en consideración los procedimientos constructivos necesarios para su ejecución (Burkin, 2010). Estas circunstancias han servido de acicate para avanzar en la aplicación de las técnicas de inspección GPR en el análisis de túneles, tanto ferroviarios (Parkinson et al., 2008) como de carreteras (Lei et al., 2013).

El desarrollo de la técnica en este campo ha sido, por tanto, muy positivo, con estudios de aplicación cada vez más amplios, que abarcan desde el análisis de patologías comunes en este tipo de infraestructuras (presencia de cavidades, problemas de adherencia, delaminaciones y humedades: Slob et al., 2010; Wimsatt et al., 2014), hasta evaluaciones de la calidad constructiva de túneles de líneas ferroviarias que están en servicio (Zhu et al., 2009; Saricicek et al., 2014).

A pesar de la significativa introducción del GPR en el campo del análisis de los túneles y sus patologías asociadas en las dos últimas décadas, queda mucho margen de actuación para la investigación aplicada a este medio, buscando nuevas aplicaciones prácticas que saquen el mayor partido de la técnica, contribuyendo además a su propia mejora y desarrollo. Frente a los diferentes estudios realizados en túneles en servicio, que son los más extendidos, cabe destacar las posibilidades de uso del GPR como herramienta de control en fases tempranas de construcción de estas infraestructuras, controlando aspectos importantes para su integridad estructural (por ejemplo, localización y posicionamiento de elementos de sustentación) y para la calidad final de la obra, en aspectos tales como son el control de espesores en el gunitado de las galerías o en la detección de humedades en la línea, a medida que se excava. La monitorización *in situ* de túneles en construcción con GPR apenas se ha afrontado: esta herramienta permitiría a los ingenieros proyectistas y constructores detectar de manera precoz defectos o errores de ejecución que podrían subsanarse en el momento mismo de su detección, evitando actuaciones posteriores de reparación, más complejas y caras o que, incluso, no tendrían otra solución más que demoler lo ya construido.

1.4.5. Técnicas de procesado y software de aplicación

Cuando la unidad de inspección GPR está en funcionamiento, envía ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda a través del subsuelo de la zona de prospección, las cuales experimentarán un viaje de ida y vuelta en el medio por el que se transmiten: la onda emitida es parcialmente atenuada en su recorrido y reflejada en el medio, siendo nuevamente recibida por la antena del equipo, que funciona a la vez como elemento emisor-receptor (Daniels et al., 1988). La señal “bruta” recibida (es decir, sin ningún tipo de procesamiento) pasa entonces desde la antena receptora a la unidad de control del GPR, elemento fundamental en el equipo. Esta señal bruta (o *raw data*) deberá ser procesada para su depuración y amplificación, con la finalidad de obtener la mayor cantidad posible de datos a partir de los cuales generar un radargrama o representación gráfica 2D de la zona del subsuelo que ha sido inspeccionada. En este proceso de tratamiento y depuración de la señal originalmente recibida, también se eliminan o minimizan interferencias (comúnmente llamadas

“ruidos”) asociadas a ella, ocasionadas por la transmisión de la propia onda en el medio o por la existencia de fenómenos de acoplamiento con la antena (entre otras causas de distorsión de la señal).

El análisis y tratamiento de la señal GPR recibida es una cuestión compleja, pero muy importante para la adquisición de datos lo más exactos y fiables a partir de los cuales obtener los radargramas de la zona prospectada. Para el procesado y manipulación de la señal se recurre a programas informáticos especialmente diseñados para ello. En general, este tipo de programas están dotados de herramientas de procesado o “filtros” muy específicos, que actúan amplificando la señal, eliminando ruidos o modificándola de tal manera que se potencien zonas de interés, ayudando a localizar y detectar la presencia de anomalías en los radargramas y perfiles de reflexión resultantes: puntos de inflexión de la señal, búsqueda de patrones de reflexión significativos, existencia de picos relevantes, series de reflexiones hiperbólicas, reflexiones planas y/o reverberaciones por la presencia de elementos metálicos, etc. Además de estos filtros de depuración de la señal, los programas suelen contar con otras aplicaciones de visualización, afrontando tareas relativas a correcciones de tipo topográfico, marcado del “horizonte cero” o “tiempo cero” de la prospección, representación gráfica de la señal, aplicación de paletas de colores y escalas de grises que ayuden a mejorar la interpretación de los radargramas, posibilidad de hacer un zoom de partes del mismo, etc.

El importante desarrollo de la programación informática en los últimos treinta años ha favorecido la aparición de gran número de programas comerciales especialmente desarrollados para el procesado y análisis posterior de la señal obtenida en las prospecciones con GPR: hoy día son bastante accesibles para el público interesado en el tema, gracias a la globalización tecnológica propiciada con la aparición de Internet. La mayor parte de estos programas han sido diseñados por empresas especializadas en la técnica GPR, muchas de ellas fabricantes de equipos GPR propios y de sus componentes. De este modo, los sistemas GPR comerciales cuentan con paquetes informáticos propios que, además de controlar la antena emisora-receptora y conectarla con la unidad de control, dirigen y monitorizan la emisión de las ondas electromagnéticas, permitiendo un procesado básico de la señal recibida. Es el caso, por ejemplo, de: *GroundVision (Malå Geoscience), Radan 7 (GSSI Geophysical Survey Systems Inc.), DVL-500P (Sensors & Software Inc.)* y *One Vision (IDS GeoRadar).* Asimismo, existen programas de post-procesado que han alcanzado un nivel de sofisticación tal que permiten, además de la generación de radargramas en 2D, reconstruir volúmenes 3D del espacio subterráneo prospectado, facilitando mucho el trabajo de visualización e interpretación de los resultados obtenidos en cada estudio. Entre estos programas de procesado avanzado destacan especialmente, por su grado de desarrollo, los software *ReflexW* (*Sandmeier Geophysical Research*), *GPRSoft*

(*Geoscanners AB), GPR-Slice (Geophysical Archaeometry Laboratory Inc.)* y *EKKO_Project (Sensors & Software Inc.).*

El trabajo desarrollado en los últimos años en el ámbito del procesado y modelado de la señal GPR ha sido muy amplio, especialmente intenso desde el año 2000, de manera paralela a la extensión de la técnica en los diferentes ámbitos citados. Sin embargo, los programas comerciales indicados tienen unas características comunes que los hacen poco atractivos a la hora de elegir su empleo: no son gratuitos y su manejo e interpretación posterior no es en absoluto trivial, requiriendo de personal altamente especializado para su uso. Se trata de un aspecto que no ha ayudado en absoluto a que la técnica se popularice en el ámbito de la ingeniería civil e infraestructuras del transporte.

Por otro lado, estamos en un momento en el que los *smartphones* y *tablets* han alcanzado capacidades de procesamiento, almacenamiento y modelización de datos que casi compiten con las que los ordenadores personales ofrecen a sus usuarios. Las *tablets* y *smartphones* aportan, además, gran versatilidad y movilidad, relacionada con su tamaño y peso, uso de pantallas táctiles, etc. Las tabletas y teléfonos “inteligentes” se han incorporado con éxito y rapidez a nuestra sociedad, popularizando de manera exponencial, en el día a día, las Tecnología de la Información y Comunicación (TIC) entre la población, en particular a través de aplicaciones (*apps*) para móviles, de fácil descarga desde la Red y, generalmente, de uso bastante intuitivo desde el punto de vista del usuario final. En este punto de expansión de la denominada “Revolución Industrial 4.0” del siglo XXI, apenas se localizan *apps* específicas y gratuitas para el análisis y tratamiento de la señal GPR en este tipo de dispositivos (Benedetto et al., 2014; Varela-González et al., 2014). Es otro de los retos que cabe plantear ahora mismo para fomentar el desarrollo de las técnicas de prospección con GPR: diseñar aplicaciones específicas que, además de abaratar los costes asociados a su uso (no habría que pagar costosas licencias), ayuden a la simplificación, sistematización y popularización de uso del GPR en el campo de la construcción, contribuyendo además a su futuro desarrollo.

1.5. Referencias

Annan, P.; Davis, J. Impulse radar sounding in permafrost. Radio Sci. 11, 383-394 (1976).

Benedetto, F.; Benedetto, A.; Tedeschi, A. A Mobile Android Application for Road and Pavement Inspection by GPR Data Processing. 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. GPR (2014).

Benedetto, A.; Pajewski, L. Civil Engineering Application of Ground Penetrating Radar. Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. Springer International Publishing. Swirtzeland (2015).

Bertram, C.L.; Morey, R.M.; Sandler, S.S. Feasibility study for rapid evaluation of airfield pavements. Rep. No. AFWL-TR-71-178. U.S. Air Force Weapons Lab. Dayton, Ohio, 38 pp. (1974).

Bonomo, N.; de la Vega, M.; Martinelli, P.; Osella, A. Pipe-flange detection with GPR. J. Geophys. Eng. 8, 35-45 (2011).

Burkin, N. Model railway, design and construction techniques. Crowood Press, Ramsbury, Marlborough, Wiltshire, U.K. (2010).

Campbell, K.; Orange, A. A continuous profile of sea ice and freshwater ice thickness by impulse radar. Polar Record 17(106), 31-41 (1974).

Clark, M.; McCann, D.M.; Forde, M. Application of infrared thermography to the non destructive testing of concrete and masonry bridges. NDT & E Int. 36, 265-275 (2003).

Daniels, D.J.; Gunton, D.J.; Scott, H.F. Introduction to subsurface radar. Radar Sig. Proc. IEEE Proc. F 135(4), 278-320 (1988).

Daniels, D.J. Ground Penetrating Radar. The Institution of Electrical Engineering. London (2004).

Daniels, D.J. A review of GPR for landmine detection. Sensing and Imaging: An International Journal 7(3), 90-123 (2006).

Davis, J.; Huang, Y.; Millard, S.G.; Bungey, J.H. Determination of dielectric properties of insitu concrete at radar frequencies. Proc. Non-Destructive Testing in Civil Engineering. BAM (The BAM Federal Institute for Materials Research and Testing). Berlin (2003).

Gamba, P.; Lossani, S. Neural detection of pipe signatures in ground penetrating radar images. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 38(2), 790-797 (2000).

González-Jorge, H.; Varela, M; Díaz-Vilariño, L.; Martínez-Sánchez, J. Road Management Using Mobile LiDAR Data. Software Testing. Publicado en “Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure”. CRC Press/Balkema. Taylor & Francis Group. London (2016).

Greenspan, A. The Crisis. Rev. Econ. Inst., 12(22). Bogotá Jan./June 2010. ISSN 0124-5996(2010).

Jol, H.M. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier Science (2009).

Kraemer, C.; Pardillo, J.M.; Rocci, S.; García-Romana, M; Sánchez-Blanco, V.; Del Val, M.A. “Ingeniería de Carreteras”. Vol. II. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. ISBN: 84-481-3998-4. Madrid (2004).

Laurens, S.; Balayssac, J.P.; Rhazi, J.; Klysz, G.; Arliguie, G. Non destructive evaluation of concrete moisture by GPR: Experimental Study and direct modeling. Mater. Struct. 38(9), 827-832 (2005).

Lei, X.; Hui-lin, Z.; Zhen, S.; Si-hao, T.; Guo-qing, L.; Zhu, J. GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: a case study. NDT & E Int. 59, 68-76 (2013).

Martínez-Sánchez, J.; Nogueira, M.; González-Jorge, H.; Solla, M.; Arias, P. SITEGI Project: Applying geotechnologies to road inspection. Sensor integration and software processing. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W2, 2013, ISPRS Workshop Laser Scanning. Antalya, Turkey (2013).

Maser, K.; Puccinelli, J; Amestoy, J.K. Accuracy of ground penetrating radar asphalt thickness data and its impact on pavement rehabilitation design. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, USA (2012).

McCann, D.M.; Forde, M.C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. NDT & E Int. 34, 71-84 (2001).

Novo, A.; Solla, M.; Montero-Fenollós, J.L.; Lorenzo, H. Searching for the remains ofan Early Bronze Age city at *Tell Qubr Abual-´Atiq* (Syria) through archaeological investigations and GPR imaging. Journal of Cultural Heritage 15, 575-579 (2014).

Olsen, M.J.; Kuester, F.; Chang, B.J.; Hutchinson, T.C. Terrestrial laser scanning-based structural damage assessment. J. Comput. Civ. Eng. 24, 262-272 (2010).

Parkinson, G.; Ékes, C. Ground-penetrating radar evaluation of concrete tunnel linings. Proc. 12th Int. Conf. on Ground-Penetrating Radar. Univ. of Birmingham. Birmingham, U.K. (2008).

Pearce, D., Atkinson, G.; Mourato, S. Cost-benefit analysis and the environment. Recent developments. OECD, París (2006).

Pettinelli, E.; di Matteo, A.; Mattei, E.; Crocco, L.; Soldovieri, F.; Redman, J.D. et al. GPR response from buried pipes: measurement on field site and tomographic reconstruction. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 47(8), 2639-45 (2009).

Prego Martínez, F.J.; Arias Sánchez, P.; Solla Carracelas, M.; González Jorge, H.; Puente Luna, I.; Núñez Nieto, X.; Caride Coello, R. Innovaciones

en la inspección y conservación de infraestructuras. I Congreso Multisectorial de la Carretera. Valladolid, 11-12 mayo 2015.

Rister, B.W.; Graves, R.C. Investigation of the Extended Use of Ground Penetrating Radar (GPR) for Measuring In-situ Material Quality Characteristics. Kenctucky Transportation Centre. College of Engineering. University of Kentucky, USA (2008).

Rohling, H. From Huelsmeyer's telemobiloskop to the digital radar. 11th European Radar Conference. IEEE Xplore, ISBN: 978-2-8748-7037-8 (2014).

Saarenketo, T.; Scullion, T. Road evaluation with ground penetrating radar. J. Appl. Geophys. 43(2-4), 119-138 (2000).

Sagnard, F.; Norgeot, C.; Derobert, X.; Baltazart, V.; Merliot, E.; Derkx, F. et al. Utility detection and positioning on the urban site Sense-City using ground-penetrating radar systems. Measurement 88, 318-30 (2016).

Saricicek, I.; Seren, A. Imaging of deteriorations and concrete quality of the tunnels (Zigana, Torul) with ground-penetrating-radar. Proc. 15th Int. on Ground-Penetrating Radar, IEEE (2014).

Shaari, A.; Ahmad, R.S.; Chew, T.H. Effects of antenna-target polarization and target medium dielectric contrast on GPR signal from non-metal pipes using FDTD simulation. NDT & E Int. 43, 403-08 (2010).

Slob, E.; Sato, M.; Olhoeft, G. Surface and borehole ground-penetrating-radar developments. Geophysics 75(5), 75A103-75A120 (2010).

Solla, M.; Riveiro, B. Álvarez, M.X.; Arias, P. Experimental forensic scenes for the characterization of ground-penetrating radar wave response. Forensic Science International 220, 50-58 (2012).

Solla, M.; Lagüela, S.; González-Jorge, H.; Arias, P. Approach to Identify Cracking in Asphalt Pavement Using GPR and Infrared Thermographic Methods: Preliminary Findings. NDT & E Int. 62, 55-65 (2014).

Varela-González, M.; González-Jorge, H.; Riveiro, B.; Arias, P. Automatic filtering of vehicles from mobile LiDAR datasets. Measurement 53; 215-223 (2014).

Varela-González, M.; Solla, M.; Martínez-Sánchez, J.; Arias, P. A semi-automatic processing and visualization tool for ground-penetrating radar pavement thickness data. Automation in Construction 45, 42-49 (2014).

Venables, A.J. Evaluating urban transport improvements. Cost–benefit analysis in the presence of agglomeration and income taxation. Journal of Transport Economics and Policy 41(2), 173-188 (2007).

Wimsatt, A. et al. Mapping voids, debonding, delaminations, moisture and other defects behind or within tunnel linings. Strategic Highway Research Program 2, Transportation Research Board of the National Academies. Washington DC (2014).

Zhu, Z.; He, X.; Lu, G.; Liu, Q. Tunnel liner quality management with GPR. Proc. Int. Conf. on Management and Service Science, IEEE (2009).

Capítulo 2. Inspección de pavimentos

Uso conjunto de técnicas GPR, IRT y TLS para la detección integral de daños en pavimentos

Resumen

Con el fin de mantener las infraestructuras en condiciones óptimas de conservación y garantizar su uso, resulta esencial disponer de técnicas de inspección capaces de determinar su estado de conservación y condición sin alterar su estructura, tanto durante como después de la inspección de estas infraestructuras. Las técnicas de evaluación no destructiva (END) presentan características adecuadas para alcanzar estos objetivos, especialmente en lo que se refiere a la minimización de los tiempos de inspección empleados.

Con la finalidad de obtener el mayor número de datos, y con la mayor exactitud posible, este artículo propone el empleo conjunto y posterior interpretación de tres técnicas END complementarias: el radar de subsuelo o georradar (*Ground Penetrating Radar*, GPR) para la detección de patologías internas; la termografía infrarroja (*Infrared Thermography*, IRT) para la evaluación del estado subsuperficial de las estructuras, y el láser escáner terrestre (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS) para una medición exacta de la geometría y detección de defectos externos. Cada una de estas técnicas adquiere datos de diferente naturaleza y de distintas partes de la infraestructura, de manera que su interpretación conjunta permitiría una detección bastante exacta de patologías superficiales e internas, así como su localización y dimensionamiento. La aplicación conjunta de las tres técnicas mencionadas se ha probado en una carretera próxima al mar, compuesta por varios tipos de materiales de relleno empleados para ampliar la explanada en la zona más cercana al agua, la cual se ha ido deteriorando con el uso y la erosión causada por el mar.

Palabras clave: georradar; termografía infrarroja; láser escáner; pavimentos; rellenos; técnicas END.

Construction and Building Materials 174 (2018) 749–760

Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Joint use of GPR, IRT and TLS techniques for the integral damage detection in paving

Susana Lagüela [a,b,*], Mercedes Solla [b,c], Iván Puente [b,c], F. Javier Prego [d]

[a] Department of Cartographic and Terrain Engineering, University of Salamanca, Calle Hornos Caleros 50, 05003 Ávila, Spain
[b] Applied Geotechnologies Research Group, School of Mining, University of Vigo, Rúa Maxwell s/n, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo, Spain
[c] Defense University Center, Spanish Naval Academy, Plaza de Españas/n, 36900 Marín, Spain
[d] PhD Program in Geotechnologies Applied to Construction, Energy & Industry, University of Vigo, 36310 Vigo, Spain

HIGHLIGHTS

- Three NDT with different principles, to the detection of damage in paving.
- The union of the different data implies integral knowledge of the paving materials.
- Fault identification by the combined interpretation of inner and superficial data.
- Results validate the application of each technique for damage detection.
- Individual techniques are reinforced, the combination does not nullify single use.

ARTICLE INFO

Article history:
Received 15 May 2017
Received in revised form 19 September 2017
Accepted 19 April 2018

Keywords:
Ground-penetrating radar
Infrared thermography
Laser scanning
Paving
Filling
NDT

ABSTRACT

In order to preserve the condition of infrastructure and guarantee its usability, the availability of inspection techniques is essential, provided these are able to determine the condition of the infrastructure causing minimum disturbance and post-inspection consequences. Non-destructive techniques present characteristics to reach all these requisites, especially regarding time minimization. With the objective of reaching maximum data extent and accuracy, this paper proposes the joint use and interpretation of three techniques: ground-penetrating radar (GPR) for the detection of inner pathologies, infrared thermography (IRT) for the evaluation of the state of the subsurface of the structure, and terrestrial laser scanning (TLS) for the accurate measurement of geometry and detection of external defects. Each technique acquires data of different nature and different parts of the infrastructure, in such way that their interpretation in an integrated way allows for the accurate detection of superficial and inner pathologies, as well as their location and measurement of dimensions. The joint application of the techniques mentioned has been tested in a road next to the sea, composed by different fill materials placed in order to increase the extent of land towards the water, and deteriorated by the use and the erosion provoked by seawater.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The performance of road maintenance tasks is essential for the conservation of transport infrastructures, towards the detection and remediation of existing pathologies, both superficial and internal, since both cases can provoke the collapse of the infrastructure and the consequent interruption of its use. The presence of pathologies should be minimized from the roll-out of the infrastructures and during all their life cycle. Different techniques are currently used for the detection of pathologies in infrastructure, each adequate for a specific pathology. Superficial pathologies are commonly visible, in such way that a visual inspection allows for its detection, and direct measurements in situ give information about its size and depth, indicators of their severity. The detection of internal pathologies has not been directly solved, being the most common procedure the achievement of punctual information of interior layers of the infrastructure through core drilling of the road.

* Corresponding author at: Department of Cartographic and Terrain Engineering, University of Salamanca, Calle Hornos Caleros 50, 05003 Ávila, Spain.
E-mail addresses: sulaguela@usal.es (S. Lagüela), merchisolla@cud.uvigo.es (M. Solla), ipuente@cud.uvigo.es (I. Puente).

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.159
0950-0618/© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

In order to eliminate the need for core drilling, this paper presents a methodology for the integral inspection of infrastructures, which is composed by a combination of non-destructive testing (NDT) techniques: (1) ground-penetrating radar is applied for the detection of pathologies in the inner layers of the road, such as cracks in the wearing course, buried holes and settlement problems; (2) infrared thermography is used for the evaluation of the condition of the subsuperficial and superficial layers, with a depth of 2–5 cm; and (3) laser scanning acquires 3D topographic data of any object surface from where geometric information is derived, including the superficial pathologies.

Ground-penetrating radar (GPR) has been established as one of the most recommended NDT for routine subsurface inspections, which has proven its suitability for providing high quality images of the radar signal in the interior of the structures. GPR is a prospecting method based on the propagation of electromagnetic pulses in very short time. The radar-wave travels from the antenna through the medium and is reflected when encountering an interface between two different media with different dielectric constants. The likelihood of detecting targets is greater when the contrast between dielectric properties of the target and the background increases, which can affect the resolution and accuracy of the method. Numerous studies have been published about the application of GPR to many aspects related to civil engineering field [1]. Regarding its use for road infrastructure quality management and detection, there are successful works in pavement inspection [2], bridges inspection [3] and tunnel evaluation [4]. Published works also deal with GPR applied for assessing moisture [5], rebar corrosion [6], and detection of subsurface defects such as cracking, voids and delamination [7–10].

Infrared thermography (IRT) is a non-destructive technique that allows the calculation of the temperature of objects based on the measurement of the radiation emitted in the thermal infrared band of the spectrum (8–14 μm). Thus, the thermographic method relies on thermodynamics phenomena, and heat transfer events to detect superficial or subsuperficial anomalies in bodies [11]. In this way, the thermophysical properties and/or thermal response of objects changes in the areas where an anomaly is present (internal and external cracks, air cameras), in such a way that their response to thermal stimuli, both natural from the Sun and artificial, both processed directly or with active thermography methods [12–14], is different with respect to undamaged areas. In addition, given the superficial nature of the technique, the emissivity of the surface of the objects presents great influence on the thermographic results [15]. Thus, in addition to the material, its surface appearance, such as roughness, rusting level, presence of cracks and dents, affect the emissivity of the objects, influencing the apparent temperature measured by the camera. Infrared thermography has been rarely applied in road inspection, a few approaches have been found in literature regarding bridges [16], road surfaces [17] and asphalt pavement [18,19].

Terrestrial laser scanning (TLS) accurately records 3D topographic data of real-world objects or environment using point clouds. The resulting point cloud is a high-resolution dataset with x, y, z coordinates of the scanned scene, consisting of point attributes such as reflected intensity value (i) for each point, and their RGB data obtained from cameras, mapped to the coordinates. This technology has been widely applied in geometric surveys [20], structural health monitoring [21], structural assessment [22], deformation measurements [23], pavement evaluation [24] and cracking [25].

The joint application of these techniques has been proved as an adequate solution for the maximization of data acquired and available in the analysis of construction materials. For example, IRT data have been fused with TLS data, as a point attribute, for the three-dimensional detection of pathologies in buildings [26–28]. An introduction to the combination of IRT with geophysical techniques can be found in [29], where IRT, ultrasounds and electric geophysical methods are applied for the detection of internal defects in masonry structures, such as wall tiles and other building materials. Within the geophysical methods, GPR has also been applied in conjunction with IRT to inspect archaeological sites [30,31], as well as to detect cracks and voids in asphalt [32]. Integral TLS and GPR approaches have been applied to analyze masonry arch bridges; in which the TLS data were used to generate 3D models (external geometry), while the GPR data provided inner parameters such as ring-stone thicknesses [33,34]. Moreover, GPR has been used in combination with mobile LiDAR for measuring pavement layer thicknesses and volumes [35]. Last, the combination of IRT and GPR data with the 3D model provided by TLS has been applied for the detection of water channels and moisture source in masonry bridges [36].

2. Materials and methods

2.1. Background of the survey area

An area chosen as a case study is an esplanade formed by heterogeneous port filling, raised from sea level through the contribution with "all-one" material (Fig. 1a). Compacting of the materials has been performed with traditional mechanical procedures consisting of heavy successive coatings of 0.5–1 m thick.

The filling surface is covered by paving blocks fixed by mortar and grout (Fig. 1b), following the process of traditional construction, which dates from the years 1930–1940s. From that time, partial layers of bituminous material have been poured on the paving to reduce the effect of erosion and cover existing cracks, holes, and other types of deteriorations, and improve vehicle rolling. In fact, nowadays, the surface alternates patches of bituminous layers with others of rigid concrete roads (Fig. 1c). In addition, there are evidences of punctual maintenance operations using low-quality arid materials, such as shell mashes (Fig. 1d).

This area is currently destined for parking and vehicle transit, and is affected by different pathologies: the greatest problems are caused by subsidence and partial sinking, but also by numerous cracking in the bituminous surface and in the concrete patches (Fig. 1e). Consequently, the cover (and protection) of the paving blocks has disappeared.

In this work, an area of approximately 192.5 m^2 was covered from the parking to the edge of the quay with a cross-section of 7 m width and 27.5 m long. For an exhaustive evaluation, the data acquisition was based on 3D methodologies by using three different NDT techniques, namely, GPR, IRT and TLS (Fig. 2).

2.2. Ground-penetrating radar

The GPR survey was conducted using a RAMAC system from MALÅ Geosciences (Fig. 2a) with a CUII control unit and two, 800 MHz and 500 MHz, antennas mounted on a survey cart with an odometer wheel as triggering system. The data acquisition was based on single antenna 3D GPR methodologies using the common-offset mode with the polarization perpendicular to the data collection direction, and the acquisition parameters were 2 cm trace-interval and time window of 60 ns and 75 ns for the 800 MHz and 500 MHz antennas, respectively. To cover the entire grid, parallel 2D profiles were collected at regular intervals of 10 cm spacing resulting in a total of 67 profiles. Two measurement tapes were placed on the opposite parallel sides of the grid for measuring the cross track spacing and a string was used as a guideline to move the survey cart in order to ensure straight profiles. Moreover, the four corners of the grid were georeferenced by the terrestrial laser scanner to accurately position the profiles.

All the collected profiles were filtered before interpretation to correct the down shifting of the signal caused by the air-ground interface and to amplify the received signal, as well as to reduce clutter and unwanted noise in the raw data. The objective of filtering was to enhance the extraction of information from the received signals and to produce a subsurface image including all features of interest, which simplifies the interpretation of the GPR data. The data were processed with the ReflexW software [37]. Table 1 shows the filters and parameters used to process both 800 and 500 MHz data. Once the 2D data were processed, these data were exported to the 3D-data-interpretation module of the same processing software for the 3D cube creation. In addition to the equidistant profile increment, all the radargrams acquired with each antenna frequency were registered with equal trace-distance and time increment (number of samples in which the time window is divided), so the cube was generated without interpolation. This 3D-data allow for the extraction of either parallel or crossing 2D-lines in order to enhance the spatial correlations of the filling layers and possible damages in depth.

To transform the travel-time distance (ns)axis of the GPR image into a depth/distance (m) axis, the radar-wave velocity was previously calibrated in different positions of the esplanade since this parameter is very dependent on fill material

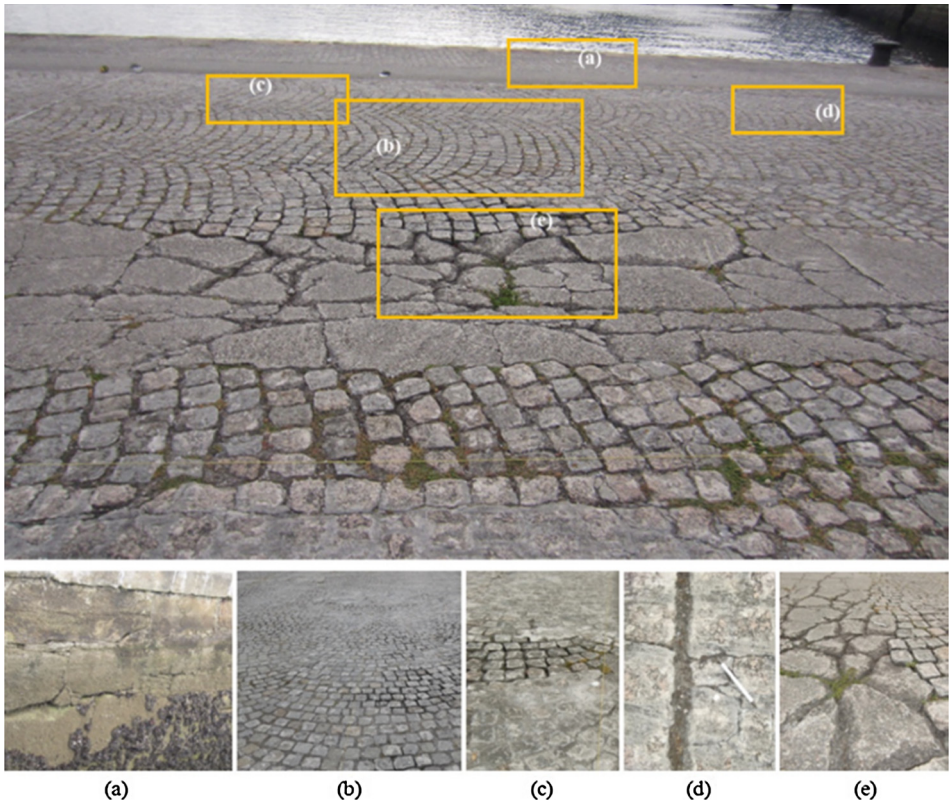


Fig. 1. (Top) Schematic view of the survey, with the location of its characteristic elements. (Bottom) Detail of the characteristic elements: a) View of the filling, consisting of masonry blocks; b) paving blocks fixed by mortar and grout; c) current alternation of patches of concrete roadbed and paving blocks; d) presence of shells in the concrete and granular materials; e) cracking of the concrete layer.

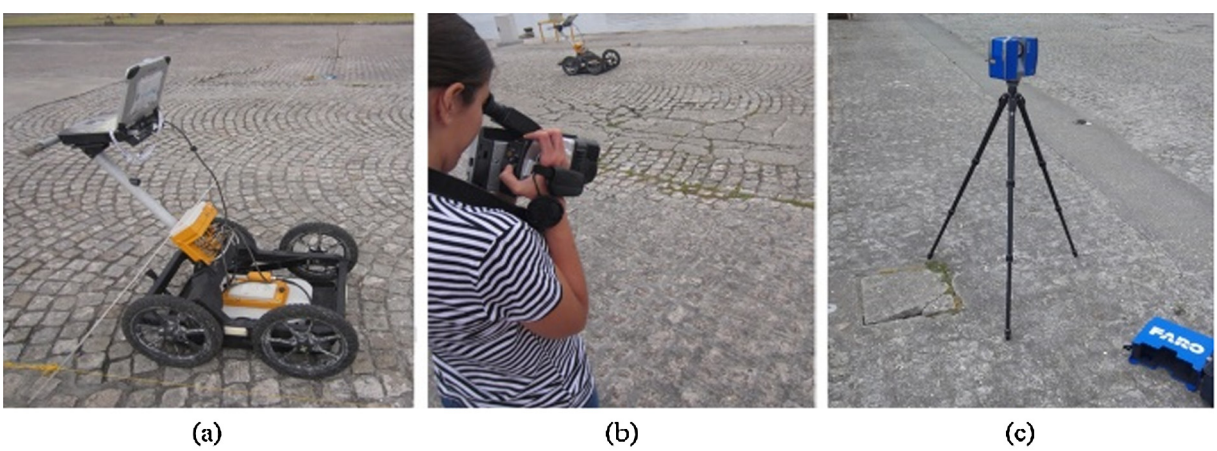


Fig. 2. Surveying methods used to detect cracking in pavement: a) GPR; b) IRT; c) TLS.

Table 1
GPR data processing applied for the 800 MHz and 500 MHz antennas.

800 MHz	500 MHz
Time-zero correction	Time-zero correction
Dewow filtering (time window: 1.25 ns)	Dewow filtering (time window: 2 ns)
Gain function (linear: 3&exponential: 3)	Gain function (linear: 2 & exponential: 2)
Subtracting average (average traces: 400)	Subtracting average (average traces: 250)
Dispersion compensation (scaling value: 0.11)	Dispersion compensation (scaling value: 0.11)

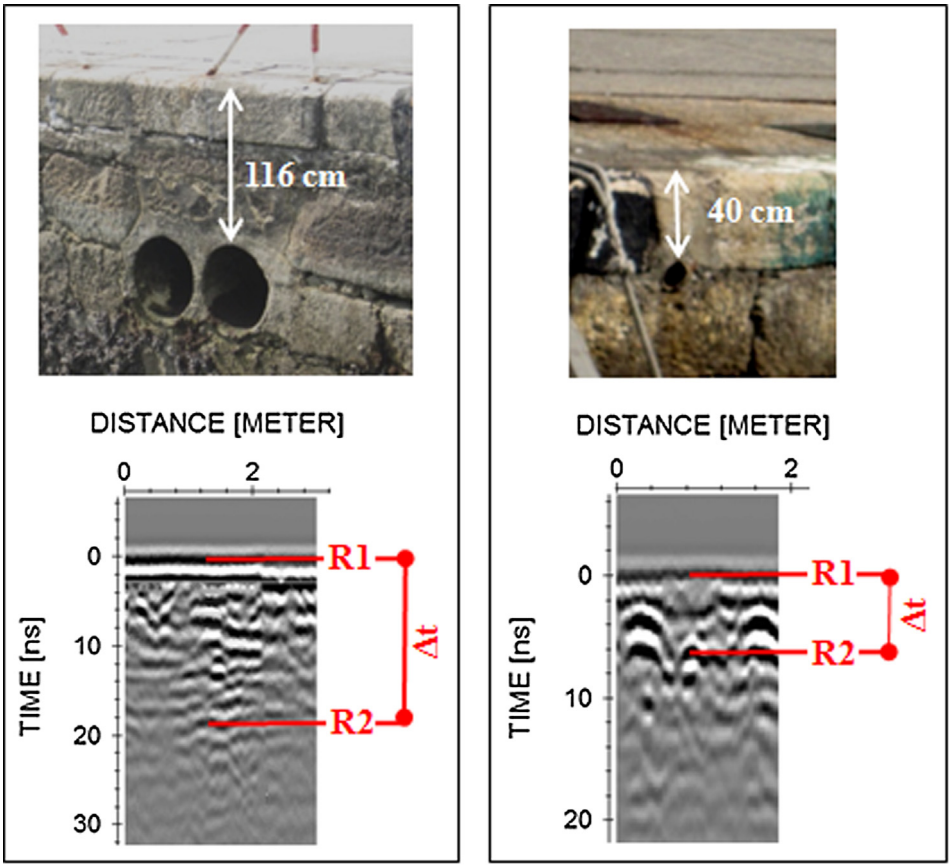


Fig. 3. GPR profiles collected with the 500 MHz antenna through the visible extremes of the pipes; profiles are acquired in a direction perpendicular to the direction of the pipes. The reflections R1 and R2 indicate the air/ground and filling/pipe interfaces respectively, measured through travel-time difference. The exact depths of the pipes are also shown.

conditions such as porosity and moisture. For velocity calibration, Eq. (1) was used by considering the travel-time difference (Δt) measured and the expected thickness of the filling (d) measured over pipe extremes accessible from the external walls of the esplanade (Fig. 3). Thus, an average radar-wave velocity of 12.7 cm/ns was obtained for the filling, which resulted in a dielectric constant (K) of 5.6 (Eq. (2)).

$$d = v\frac{\Delta t}{2} \tag{1}$$

$$K = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \tag{2}$$

where v is the velocity of propagation and c is the free-space velocity (30 cm/ns).

Figure 4 presents an example of how important the appropriate selection of the antenna frequency is. This work recommends the combination of two different GPR antennas of high (800 MHz) and medium (500 MHz) resolutions in order to provide information of both shallower and deeper subsoil, respectively. In general terms, the 500 MHz frequency, with longer wavelength, gives deeper signal penetration but poorer resolution, whereas the 800 MHz frequency, with shorter wavelength, provides better resolution but shallower penetration. However, the ranges of penetration depths are highly variable depending on the soil properties for each particular case study. As illustrated in Fig. 4, the combination of both frequencies provides complementary information. The anomalies (reflection discontinuities and changes in the amplitude values of the reflected signals) marked by white circles in the radargrams can be associated to cracking or lack of filling. These anomalies are easily identified due to the higher dielectric constant produced by the presence of air in cracking. The reflections generated by layering are also marked in the radargrams as orange dashed lines. Comparing the results obtained with both frequencies, it can be observed that the 800 MHz frequency allows to identify shallower reflections such as a first layer – L1in Fig. 4(a) – at ~2 ns, which corresponds to the interface between stonepaving blocks and filling. This layer was not distinguished in the radargram obtained with the 500 MHz frequency (Fig. 4(b)) due to the lower resolution that provokes aliasing of the reflection to the direct wave. On the other hand, when taking into account the depth range of penetration, the 500 MHz frequency provides more penetration due to a larger wavelength. Thus, the 500 MHz data produced display deeper anomalies or damages such as n. 5, at ~30 ns in Fig. 4(b), were only detected with the lower frequency. The 800 MHz radargram in Fig. 4(a) was cut at a depth of ~32 ns because the GPR signal was significantly attenuated at these depths due to the higher concentrations of salt water.

2.3. Infrared thermography

The thermographic inspection was performed with a hand-held camera, NEC TH9260 (Fig. 2b), which sensor is 640 × 480 UFPA (Uncooled Focal Plane Array), with a field of view of 21.7° × 16.4°. Data acquisition is performed by a human operator, with the aim at focusing on the most severe details.

Infrared data acquisition included the implementation of the correction of atmospheric effect [38]. The correction consisted of the introduction of the following ambient data in the camera: 26 °C ambient temperature, 50% relative humidity and 1 m distance camera -object. In addition, the emissivity value of the inspected surface was computed through a test based on the comparison of apparent temperatures between the paving and a black tape with known emissivity equal to 0.95, as in [39]. After the test, performed for 10 different blocks of paving, the emissivity value was 0.85. It will be applied to the apparent temperatures measured by the camera in post-processing.

In order to cover its complete surface, the grid was divided in 5 rows and 53 columns, in a total of 265 thermograms. With this division, a minimum overlap of 50% was obtained between consecutive images in the same column, and in adjacent images in the same row. This overlap percentage is adopted following the principles of image registration with lidar and mosaicking in order to allow image registration [40]. The overlap is required for three reasons: first, it is possible to certify that there is no loss of information; second, possible thermal anomalies at the edge of one thermogram appear in the center of its overlapping thermogram; and third, there is overlapping between adjacent thermograms to allow for image registration and mosaicking. In addition, the latter is improved by the placement of different targets at the limits of the grid to be used as ground points. Some examples of the thermograms acquired are shown in Fig. 5.

The processing procedure included the following steps: emissivity correction, correction of exterior temperature, application of color palette, search of thermal anomalies, and image registration.

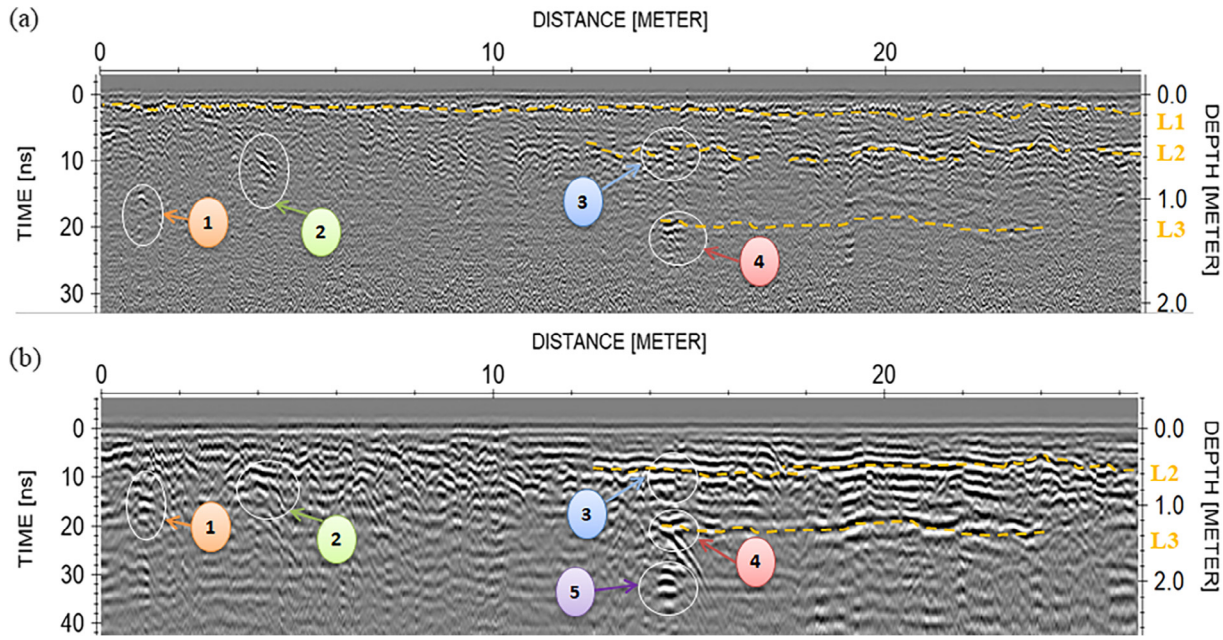


Fig. 4. Comparison of data from (a) 800 MHz and (b) 500 MHz antennas regarding resolution and depth range of penetration characteristics. The reflections highlighted in the radargrams correspond to layering (dashed orange lines) and cracking or lack of filling (white circles). The depth range of penetration, or depth scale, was obtained using the pre-calibrated radar-wave velocity of 12.7 cm/ns. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

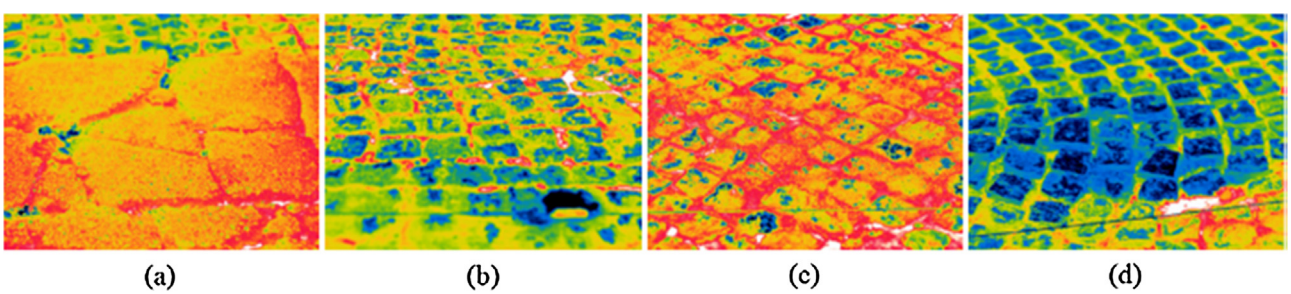


Fig. 5. Examples of thermograms acquired in the inspection of the paving, where the thermal imprints of the different pathologies can be seen.

The emissivity correction was performed through the computation of the real temperatures from the measured values of apparent temperature and Eq. (3), extracted from Stefan Boltzmann law for black bodies and real bodies, as in [41].

$$\varepsilon = T_{bb}^4 / T_{rb}^4 \tag{3}$$

where ε is the emissivity value computed, equal to 0.85, T_{bb} is the temperature of the black body or in this case, the real temperature of the object, measured by a contact thermometer, and T_{rb} is the apparent temperature of the real body, measured by the thermographic camera. Both temperatures expressed in Kelvin.

After emissivity correction, the real temperatures in each thermogram were analyzed in order to correct homogeneous deviations provoked by the change in the ambient temperature occurring during the acquisition. This correction consisted of computation of the difference between maximum and minimum temperatures of the different thermograms. For each thermogram, if the difference between its maximum value and the mean maximum value was equal to the difference between the minimum value and the mean minimum value, it was considered as an offset, and the value of the difference was subtracted from all the temperature values in the thermograms.

The following step was the association of a RGB value to each temperature. For this process, the interval between maximum and minimum temperatures of all thermograms was divided in 256 steps, in order to generate thermographic images of 2^8 bits. Fig. 6 shows the thermograms in Fig. 5 after the application of the corrections explained.

The last step was image registration, consisting in the identification and establishment of a minimum of four corresponding points between images, present in the overlapping areas. The pixel coordinates of corresponding points, together with the knowledge of the inner orientation parameters of the camera obtained through camera calibration as in [42], allows the resolution of the collinearity equations and the computation of the relative coordinates of each image in space [43]. In this way, a thermographic mosaic of the area under study was generated, consequently allowing the detection of thermal anomalies that could be missed if they appeared in only one image, as well as the direct location of the thermal anomalies within the grid.

2.4. Terrestrial laser scanning

Data collection was performed in the area under study using a Faro Focus ^{3D} X330 phase-shift scanner (Fig. 2c) [44]. For phase-based systems, the measurements are taken continuously resulting in a higher measurement frequency and more precise surveys compared to pulse-based systems. Technical characteristics are shown in Table 2. The laser surveying was also supported by photographs realized with an 8Mpix HDR camera integrated in the scanner, with the objective to grant additional RGB information to the intensity values provided by the laser scanner.

Seven scan positions were planned to compromise between minimizing the number of surveys and maximizing the data acquired in order to avoid possible omissions, taking into account the irregularity of the area, with multiple holes and cracks which could not be acquired in enough detail from a lower number of scan positions. Scans were performed with a Horizontal Field of View (HFOV) of 360° and the same scan speed and resolution of 0.03° such as not to exceed a scan time of 10 min. Next, the orientation and position of each scan was modified in several iterations to compute the best overall fit for them and to obtain a single 3D model (more information about the process can be found in [45]). The survey by TLS was also important for the geometrical co-registration of both the

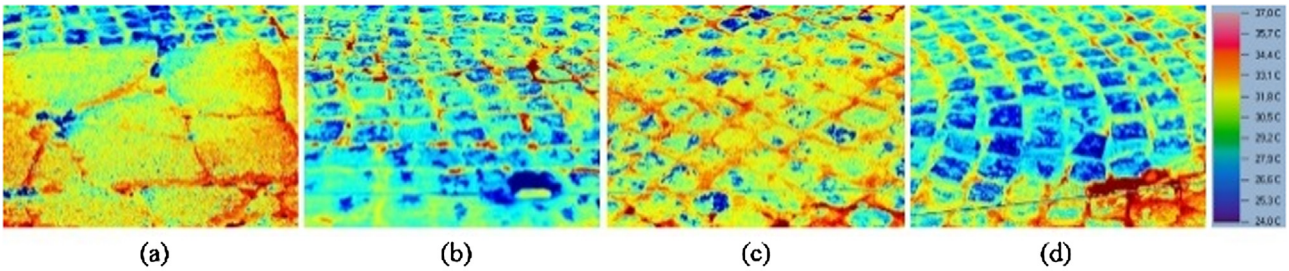


Fig. 6. Examples of thermograms after processing, where the thermal imprints on the surface of inner and superficial pathologies can be seen: a) cracks in paving, where temperature increases with depth of the crack; b) the lack of concrete or grout between paving blocks provokes a temperature increase due to the presence of air; c) presence of pollution covering the blocks, which absorbs ambient heat homogenously; d) holes in paving provoke a sudden and deep temperature increase.

Table 2
Technical data of terrestrial laser scanner FARO Focus 3D X330 according to manufacturer datasheet.

Measurement range	<330 m
Minimum range	>0.6 m
Repeatability (25 m, 10% refl.)	±2 mm
Measurement rate	976,000 pts/s
Laser wavelength	1550 nm
Beam divergence	0.19 mrad
Field of View (V/H)	300°/360°
Step size (vertical/horizontal)	0.009°

thermographic and GPR studies performed over the same area, by means of reflective reference targets located on the ground. This information has subsequently been used to generate the orthoimages for the characterization of cracking by all those NDT techniques (Fig. 7).

3. Results and discussion

The 3D-GPR data produced allowed defining differences in the condition of the inner materials. As seen in Fig. 4, the 800 MHz data provided better results until a depth of 70 cm (v = 12.7 cm/ns for filling) because of the greater resolution of the antenna frequency, whereas the 500 MHz data allowed reaching higher penetration with a maximum depth of 2 m. In the case of the 800 MHz data, interesting reflections were not observed from 1.5 m depth, more certainly due to the attenuation of the signal in contact with salt water or saturated filling. As illustrated in Fig. 8, several anomalous areas were identified in the time-slices produced as areas of contrary hue (white or black) depending on the amplitude values of the reflected signals. These changes in amplitude are caused by a large enough dielectric contrast between adjacent media, which might be most probably produced by internal damages related to a less compaction of the filling or possible hollows between filling. The calibrated dielectric constant obtained for filling was 5.6, while the dielectric constant for air is 1.

Regarding the thermographic inspection, Fig. 7c shows the study area covered with thermographic information, with the same temperature scale as images in Fig. 6, from 24 °C to 37 °C. Results show that temperature values increase in areas with higher depth, being a sign of cracking and loss of grout joining paving blocks (areas 1 (cracking), 7 and 8 (loss of concrete material)). The difference between these pathologies is their width; cracking implies a Gaussian temperature distribution, while loss of grout creates a temperature peak in the temperature distribution. The reason for this is that cracks tend to extend both in length and width, while loss of material is delimited by the paving blocks. Areas with homogeneous temperatures around 30 °C, here imply the presence of material covering the paving blocks (Fig. 7c- areas 6 and 9). Thus, observing the orthothermogram, the distribution of areas with covered paving and loss of grout does not follow a regular trend, being deduced as a random event more than as a systematic problem in the area.

From the TLS survey, three types of orthoimages were created (Fig. 7). The first type uses the RGB information acquired with the 8Mpix HDR camera. The second one uses the Z-values of the point cloud as values of each cell forming the orthoimage: since orthoimages are raster data and point clouds are vector data, the generation of an orthoimage from point cloud data implies its rasterization. Thus, a grid was generated covering the extent of the point cloud, and each cell of the grid was given the mean Z-value of the points that fall within. A color scale set to *Blue* < *Green* was applied to visualize the elevation ramp better. Finally, the third orthoimage includes the thermographic mosaic (orthogonal projection). Orthoimages were generated by applying an affine transformation to each plane of the mesh obtained through the triangulation of the TLS point cloud data; that is, the generation of triangular surfaces which vertex are 3 points of the point cloud in such way that the point cloud is joined by triangles. The same mathematical model directly relates the pixel coordinates of the registered RGB and IRT images and those of the orthoimage. A grid size of 1200 × 3000 pixels was selected, being the ground sample distance (GSD) of 1 cm. The geometric dimensions of the orthoimages generated have been validated through its comparison with geometric measurements performed in situ, showing a deviation within the accuracy of the TLS device.

This way, all the data produced by the three different techniques were jointly analyzed to provide more accurate damage detection in paving. The joint interpretation consisted of, firstly, detecting existing anomalies or pathologies in the external paving surface from the RGB and Z-value orthoimages (Fig. 7a, b). Then, every anomaly observed in the GPR radargrams (Fig. 8) and through temperature anomalies (Fig. 7c) was evaluated to be related to the external defect observed at the same location or nearest surroundings. In this way, the first damage identified was a 12-m longitudinal patch of rigid concrete roadbed (Fig. 8 – area 1-red) at the top left side of the RGB orthoimage showing severe cracking: the longest crack was 110 cm length, while the widest crack was 1.5 cm width (Fig. 7a- area 1); dimensions of the patch and cracks were obtained from the RGB or the IRT orthoimages, that contain the geometric information from the point cloud. Observing the thermographic data in Fig. 7c, high apparent temperatures were obtained in this area (1), especially increasing with depth due to the heating of the air inside the cracking. Finally, in the GPR data (Fig. 8 – area 1-red), this area was associated to a loss of information due to the attenuation of the GPR signal. In addition, Fig. 9a shows a XZ profile line in this area highlighting such attenuated zone. The most probable explanation here was the interfacial polarization losses caused by the composition of the concrete used during maintenance operations, even with fragments of shell mashes.

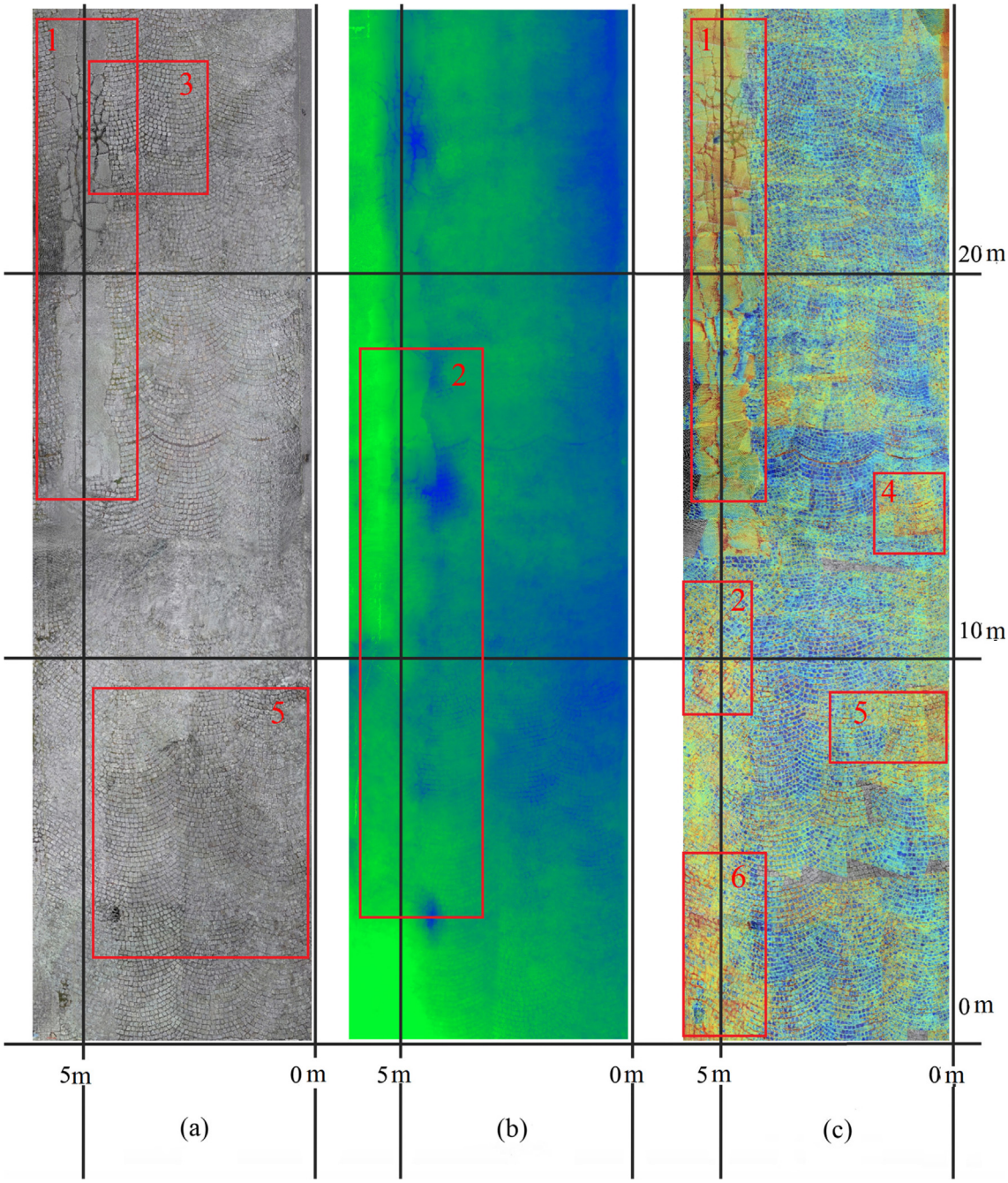


Fig. 7. Orthoimages generated, which values are (a) RGB information, (b) Z or height values of the point cloud and (c) temperature values. In (b) colors correspond to Z-values from 0 cm (dark blue) to 35 cm (dark green), while in (c) colors and temperatures go from 24 °C (dark blue) to 37 °C (dark red), according to the color scale shown in Fig. 6. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

The following defect, immediately at the margin of area 1-red in Fig. 8, and in the same longitudinal direction from 2–3 m to 16–18 m in the direction of data collection, is an anomalous area identified in the GPR data as well as in the height grid (Fig. 8 – area 5-orange and Fig. 7b– area 2, respectively). In the GPR data, the defect is associated to the contrary hue observed in imaging because the scattering (or multiple diffraction events) occurred when the signal encounters emptied spaces in filling. The interpretation here is the existence of subsidence and partial sinking of the terrain that affect the internal structure of paving until a depth of approximately 1–1.2 m (Fig. 8). The lack of thermal footprint of the pathology on the surface, established as a non-anomalous thermal distribution in the surface corresponding to Fig. 7c– area 10, implies that the severity of the subsidence is not enough to cause an important thermal variation inside the pavement. Thus, a significant change on the state of the material or the presence of a cavity wall can be discarded.

Likewise, there are several areas presenting displacement of paving blocks and lack of mortar and grout between joints (area 5 in Fig. 7a, 7c and 10). These areas were also distinguished in the GPR data as heterogeneous zones produced by scattering, which is most likely related to a loss of inner filling or more internal faults such as possible delamination between layers (Fig. 8 – areas 2-yellow and 3-blue). This anomaly in the GPR signal

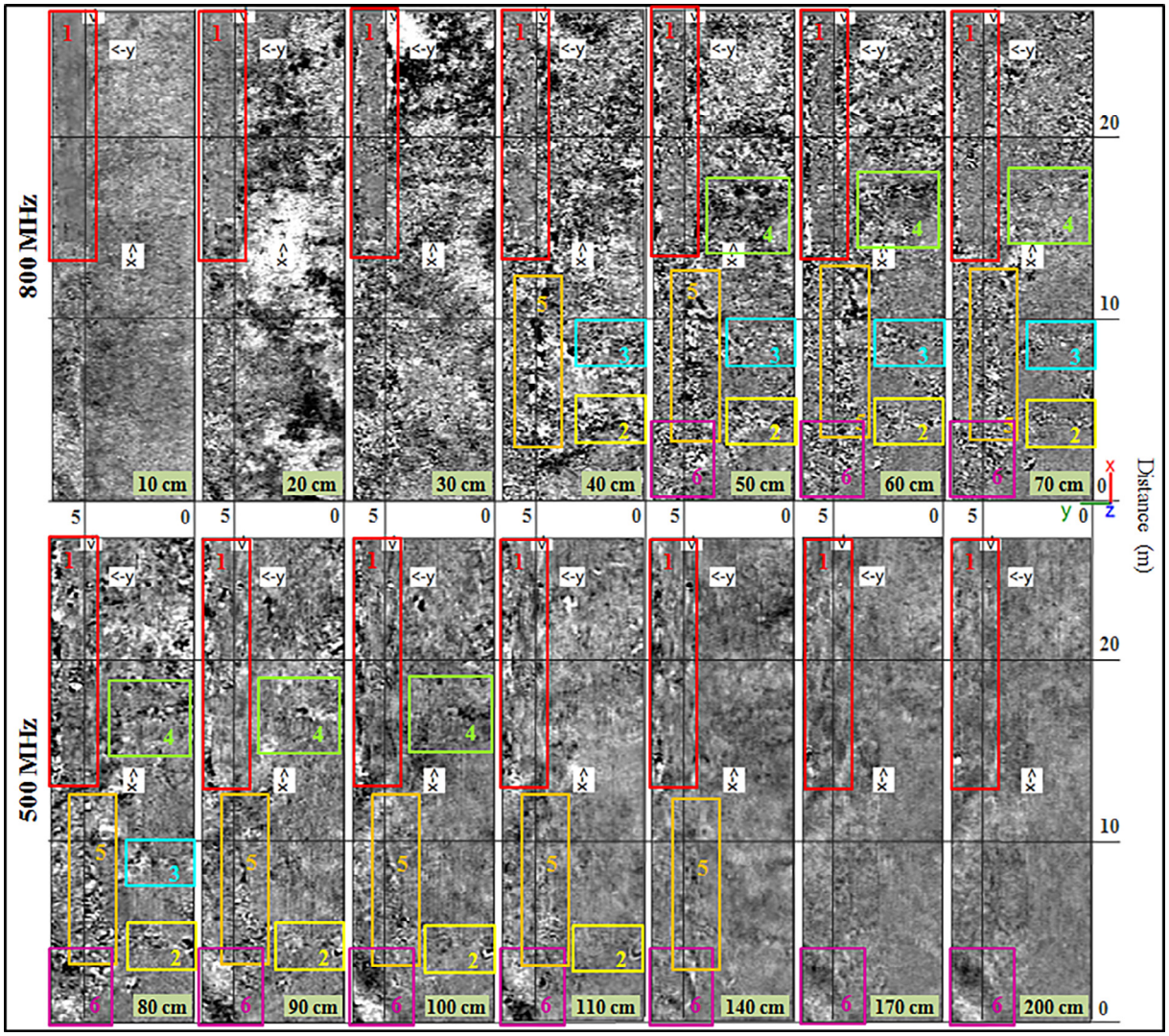


Fig. 8. 3D-GPR data showing the anomalous areas identified as damaged filling. The numbers in the green boxes at the bottom right corner of the slices indicate the depth of each slice, assuming a velocity of propagation of the radar-wave of 12.7 cm/ns (from left to right, and top to bottom: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 140, 170 and 200 cm). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

was observed until a depth of about 1 m. Fig. 9b presents a XZ profile line acquired through these areas showing these events more in detail. Regarding the thermographic results, an intense temperature increase was observed in these areas, not correspondent with a change in the surface material or state. Thus, the cause of this temperature peaks can be the heating of the air in the joints between paving blocks, with highest thermal conductivity than the mortar or grout that should be there. In addition to this, as explained previously, the thermographic inspection was able to detect punctual areas with loss of material, such as that denoted as 8 (Fig. 7c), which was not detected by the GPR due to their superficial nature.

With respect to the area 4-green (Fig. 8) identified in the GPR data as a continuous flat reflection; it could be related to the presence of a buried pipe at a depth of 0.5–0.6 m (which visible limit is shown in Fig. 3). Observing the XZ profile line in Fig. 9c, a hyperbolic reflection was identified in this area that could correspond to the existence of a circular object. Any damage was observed from the orthoimage. Nevertheless, as seen in Fig. 10 (4), two sewers were found in the nearest surroundings that could be indicative of the presence of a pipe crossing the study area into a network discharging sewage under a concrete patch through the longitudinal axis parallel to the port. The lack of thermal footprint in this case is because the pipe is covered by filling material, which homogenizes heat transfer from the surface to the pipe and vice versa, fading the lines of the pipeline thermal footprint.

Finally, the GPR data revealed another anomalous area at the bottom left side (Fig. 8 – area 6-pink), which is most probably associated to the presence of a deep sinkhole, even detected at the maximum depth of 2 m reached by the GPR signal (as observed in the XZ profile line in Fig. 9d). To add more relevance, the damage is also detectable by the thermographic inspection, being a sign of its importance. The depth of the superficial sinkhole provokes the increase of apparent temperature in the area given that the geometry facilitates the reflection of thermal radiation between sides of the hole. However, observing the TLS data, superficial damage does not exist in such location, although a severe subsidence occurred in the nearest paving (Fig. 10(6)). Thus, this pathology shows that the joint interpretation of information from different sensors could be crucial for the development of efficient maintenance plans by allowing the consideration of the reality of the structure: in this

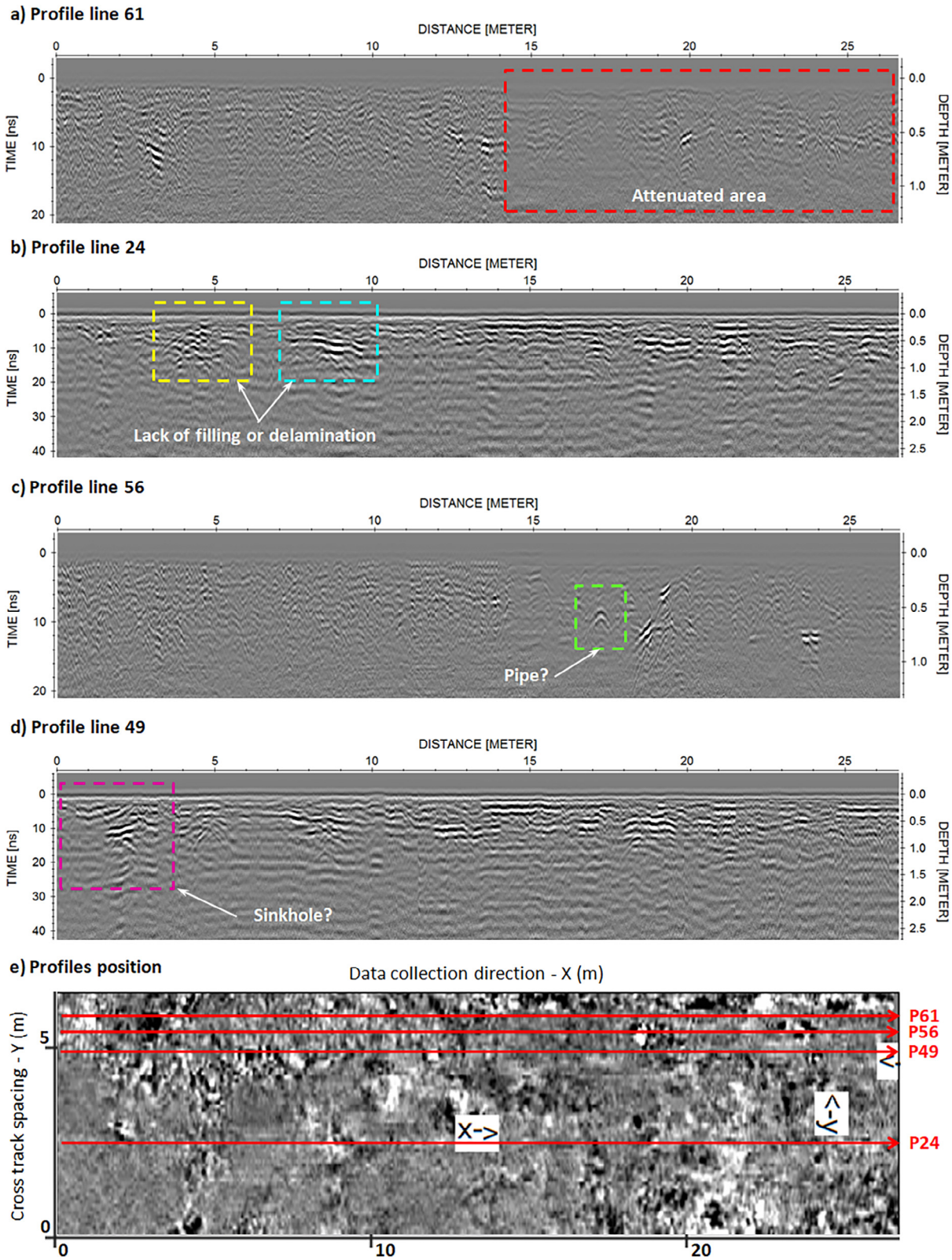


Fig. 9. 2D-GPR data showing different internal faults and utilities interpreted: (a) 800 MHz data showing attenuation in area 1-red, (b) 500 MHz data showing possible lack of filling or delamination in areas 2-yellow and 3-blue, (c) 800 MHz data showing the existence of a probable pipe in area 4-green, (d) 500 MHz data showing the occurrence of a probable sinkhole in area 6-pink, and (e) profiles position. The number of area and colors correspond to the numbers used in Fig. 8. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

case, the damage could be extended into the internal structure of the paving, susceptible to sink under adverse conditions of constant traffic loads, while there is no sign of the damage on the surface.

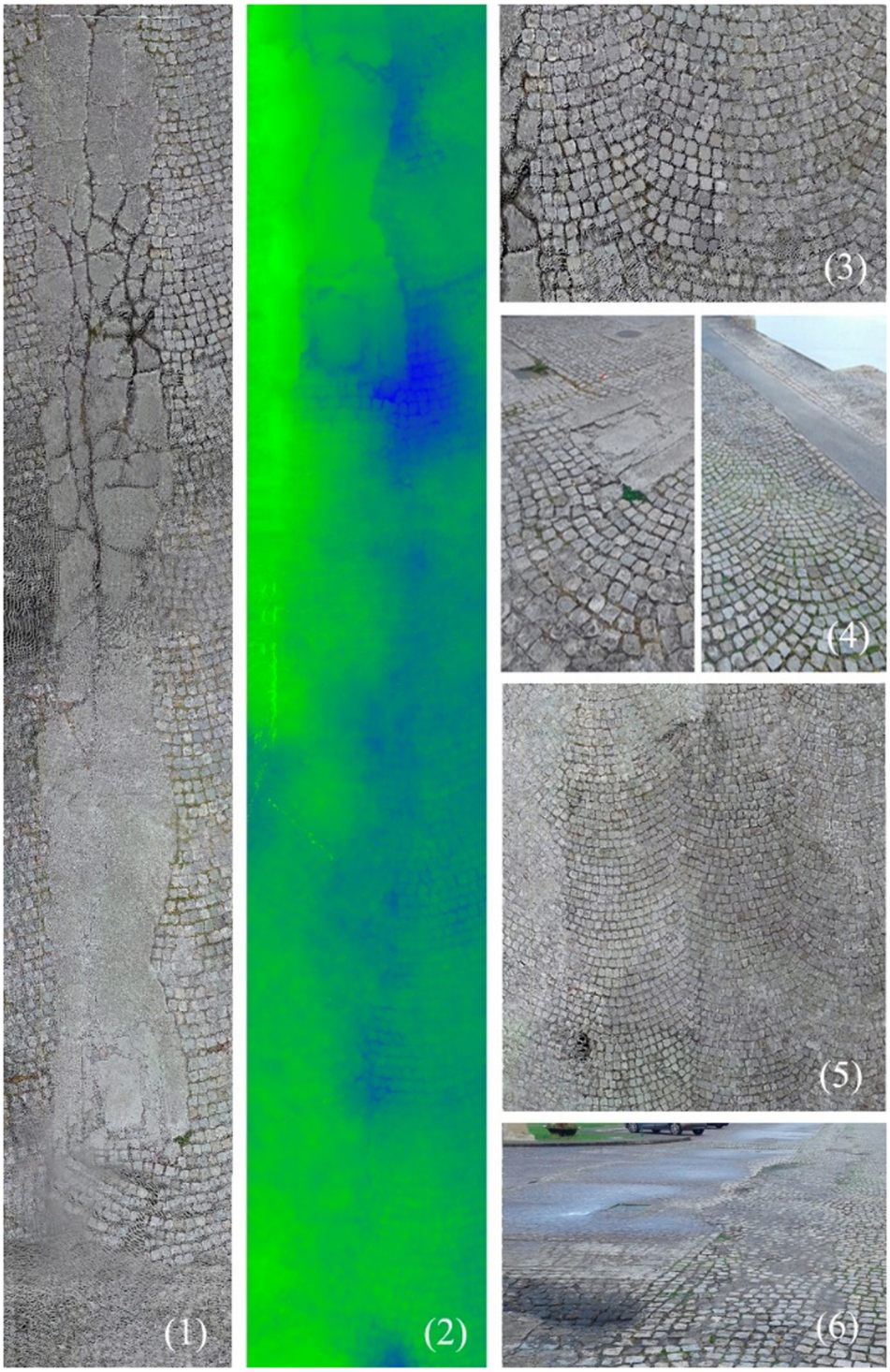


Fig. 10. Pathologies detected in the TLS data (RBG orthoimages and DEM) and additional pictures of the nearest surrounding to add more information to interpretation.

4. Conclusions

This paper presents a joint application of three different non-destructive techniques to inspect the condition state of paving, especially focused on the detection of both the road deterioration and the possible inner faults causing such defects. The three techniques were chosen in such a way that their implementation was complementary. First, GPR was applied due to its suitability to acquire information from the interior of structures, to a depth dependent on the antenna frequency with a maximum depth of penetration of 2 m. Second, IRT was used for its capability to recognize superficial and subsuperficial anomalies that are not possible to detect on a visual inspection, based on their thermal print. Last, TLS was used for the recognition and geometric measurement of several pathologies detected on the visible surface.

The GPR technique has demonstrated its sustainability to detect anomalies in both superficial paving and inner filling. The detection was possible through the attenuation or the scattering of the GPR signal.

The IRT technique has shown its validity for the detection of both superficial and subsuperficial anomalies in the pavement structure. However, in the study case, the presence of paving blocks on the surface of the road complicated the detection of subsuperficial pathologies due to the overlapping between subsuperficial and superficial thermal footprints. Deep cracks or losses of material presented higher temperature than their surroundings at the surface level, whereas zonal and homogeneous temperature increases can be a sign of the presence of covering material in paving blocks.

The use of TLS allowed for the accurate measurement of the width and length of any pathology detected at a superficial level. But also, this method was used as the framework to build and fuse the rest of information gathered by other sensors. Thus, this technique served to estimate the dimensions of subsuperficial anomalies detected by GPR and IRT methods through data correlation (GPR and IRT with TLS), while the association between pathologies detected from TLS data and thermal or GPR anomalies implies a relation between the superficial damages and the possible failure in the internal pavement structure.

The availability of all the complementary data produced by the three techniques allowed for an integrated interpretation, which revealed interesting information previously unknown that would be difficult to obtain otherwise, unless the use of invasive traditional testing. Thus, the process of damage detection through a combined interpretation of the different data is especially useful for engineers, since the individual interpretation of each type of data could lead to the misunderstanding of the real phenomena. Visual and superficial inspection gives information only of the external damage, but this interpretation underestimates the reality because usually failure comes from the internal structure of the pavement. In this study, a previously unknown sinkhole (approximately 2 m deep) was identified at the left bottom of the studied zone, which was only detected through subsuperficial GPR and IRT data.

Future research will deal with the incorporation of GPR antennas of higher frequency (e.g., 1 or 2.3 GHz), in order to obtain GPR data of the same depth range as IRT data, and allow a conjoint detection and evaluation of shallow defects. Moreover, it would be interesting to develop some data fusion technique to merge GPR data coming from different frequency ranges in order to improve both imaging resolution and characterization depth. Equally, the IRT data can be further exploited through the monitoring of the response of the pavement to thermal stimulus from the Sun and the processing with active thermography techniques.

Conflict of interest

None.

Acknowledgments

The Defense University Center and the Military Naval Academy of Spain are acknowledged for the given facilities during this work performance. The authors also want to thank the Applied Geotechnologies Research Group of the University of Vigo and TIDOP Research Group in the University of Salamanca for all the human and material support. Thanks are also given to the Ministry of Industry (Government of Spain), for support given through human resources grant IJCI-2015-24492. Additionally, this study is a contribution to the EU funded COST Action TU-1208 "Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar".

References

[1] A. Benedetto, L. Pajewski, Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar, Springer International Publishing, 2015.
[2] T. Saarenketo, T. Scullion, Road evaluation with ground penetrating radar, J. Appl. Geophys. 43 (2000) 119–138.
[3] J. Hugenschmidt, Concrete bridge inspection with a mobile GPR system, Cons. Build. Mat. 16 (2002) 147–154.
[4] E. Cardarelli, C. Marrone, L. Orlando, Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods, J. Appl. Geophys. 52 (2003) 93–102.
[5] K. Grotte, S. Hubbardb, J. Harveyc, Y. Rubin, Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques, J. Appl. Geophys. 57 (2005) 129–153.
[6] Z.M. Sbartaï, D. Breysse, M. Larget, J.P. Balayssac, Combining NDT techniques for improved evaluation of concrete properties, Cem. Concr. Compos. 34 (2012) 725–733.
[7] J. Stryk, Road diagnostics – Ground penetrating radar possibilities, Interst. Test. Meth. 5 (1) (2008) 48–57.
[8] S. Colagrande, D. Ranalli, M. Tallini, Ground penetrating radar assessment of flexible road pavement degradation, Int. J. Geophys. 11 (2011). ID 989136.
[9] N. Diamanti, D. Redman, Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks, J. Appl. Geophys. 81 (2012) 106–116.
[10] L. Krysinski, J. Sudyka, GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks, J. Appl. Geophys. 97 (2013) 27–36.
[11] Z. Liu, X. Liu, L. Jiang, G. Lu, H. Liu, Study on the heat transfer characteristics performed in the infrared thermography detection of welded structure, Open Mech. Eng. J. 9 (1) (2015) 251–259.
[12] S. Sfarra, E. Marcucci, D. Ambrosini, D. Paoletti, Infrared exploitation of the architectural heritage: from passive infrared thermography to hybrid infrared thermography approach, Mater. Constr. 66 (323) (2016) 1–16.
[13] S. Sfarra, M. Regi, Wavelet analysis applied to thermographic data for the detection of sub-superficial flaws in mosaics, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 74 (2016) 1–11.
[14] C. Ibarra-Castanedo, S. Sfarra, M. Klein, X. Maldague, Solar loading thermography: time-lapsed thermographic survey and advanced thermographic signal processing for the inspection of civil engineering and cultural heritage structures, Inf. Phys. Technol. 82 (2017) 56–74.
[15] X. Lv, L. Yang, Research on apparent temperature difference in infrared imaging system, Acta Armam. 31 (8) (2010) 1059–1062.
[16] M. Clark, D. McCann, M. Forde, Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges, NDT&E Intern. 36 (2003) 265–275.
[17] D. Bouris, T. Theodosiou, K. Rados, M. Makrogianni, K. Koutsoukos, A. Goulas, Thermographic measurement and numerical weather forecast along a highway road surface, Meteor. App. 17 (4) (2010) 474–484.
[18] J. Dumoulin, L. Ibos, M. Marchetti, A. Mazioud, Detection of non-emergent defects in asphalt pavementsamples by long pulse and pulse phase infrared thermography, Europ. J. Environ. Civil Engin. 15 (4) (2010) 557–574.
[19] A. Moropoulou, M. Koui, N. Avdelidis, K. Kakaras, Inspection of airport runways and asphalt pavements using long-wave infrared thermography, Proc. SPIE 4020 – Thermosense XXII, Orlando, USA (200).
[20] I. Puente, B. Akinci, H. González-Jorge, L. Díaz-Vilariño, P. Arias, A semi-automated method for extracting vertical clearance and cross sections in tunnels using mobile LiDAR data, Tunnel. Underground Space Technol. 59 (2016) 48–54.
[21] K.M. Mosalam, S.M. Takhirov, S. Park, Applications of laser scanning to structures in laboratory tests and field surveys, Struct. Control Health Monit. 21 (2014) 115–134.
[22] M.J. Olsen, F. Kuester, B.J. Chang, T.C. Hutchinson, Terrestrial laser scanning-based structural damage assessment, J. Comput. Civ. Eng. 24 (2010) 264–272.
[23] S.J. Gordon, D. Lichti, M.P. Stewart, J. Franke, Modelling point clouds for precise structural deformation measurement, Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. (2004).
[24] M. Milenkovic, N. Pfeifer, P. Gira, Applying terrestrial laser scanning for soil surface roughness assessment, Rem. Sen. 7 (2) (2015) 2007–2045.
[25] E.B. Anil, B. Akinci, J.H. Garret, Characterization of laser scanners for detecting cracks for post-earthquake damage inspection, in: Proc. 30th Intern. Symp. Autom. Rob. Constr. Min., (2013) 313–320.
[26] M. Alba, L. Barazzetti, M. Scaioni, E. Rosina, M. Previtali, Mapping infrared data on terrestrial laser scanning 3D models of buildings, Remote Sens. 3 (9) (2011) 1847–1870.
[27] S. Lagüela, L. Díaz-Vilariño, J. Martínez, J. Armesto, Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes, Autom. Constr. 31 (2013) 230–240.
[28] M. Previtali, L. Barazzetti, R. Brumana, B. Cuca, D. Oreni, F. Roncoroni, M. Scaioni, Automatic façade modelling using point cloud data for energy-efficient retrofitting, Appl. Geom. 6 (2) (2014) 95–113.
[29] C. Meola, R. Di Maio, N. Roberti, G. Carlomagno, Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures, Eng. Fail. Anal. 12 (2005) 875–892.
[30] G. Carlomagno, R. Di Maio, M. Fedi, C. Meola, Integration of infrared thermography and high-frequency electromagnetic methods in archaeological surveys, J. Geophys. Eng. 8 (2011) 93–105.
[31] S. Sfarra, A. Bendada, C. Ibarra-Castanedo, D. Ambrosini, D. Paoletti, X. Maldague, Santa maria di collemagio church (L'Aquila, Italy): historical

reconstruction by non-destructive testing techniques, Intern. J. Archit. Herit. 9 (4) (2015) 367–390.
[32] M. Solla, S. Lagüela, H. González-Jorge, P. Arias, Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: preliminary findings, NDT&E Intern. 62 (2014) 55–65.
[33] B. Riveiro, M. Solla, I. de Arteaga, P. Arias, P. Morer, A novel approach to evaluate masonry arch stability on the basis of limit analysis theory and non-destructive geometric characterization, Autom. Constr. 31 (2013) 140–148.
[34] M.E. Stavroulaki, B. Riveiro, G.A. Drosopoulos, M. Solla, P. Koutsianitis, G.E. Stavroulakis, Modelling and strength evaluation of masonry bridges using terrestrial photogrammetry and finite elements, Adv. Eng. Software 101 (2016) 136–148.
[35] I. Puente, M. Solla, H. González-Jorge, P. Arias, Validation of mobile LiDAR surveying for measuring pavement layer thicknesses and volumes, NDT&E Intern. 60 (2013) 70–76.
[36] M. Solla, S. Lagüela, B. Riveiro, H. Lorenzo, Non-destructive testing for the analysis of moisture in the masonry arch bridge of Lubians (Spain), Struct. Control Health Monit. 20 (2013) 1366–1376.
[37] K.J. Sandmeier, ReflexW manual. http://www.sandmeier-geo.de (accessed 21.05.2016).
[38] G. Bitelli, P. Conte, T. Csoknyai, V. Girelli, E. Mandanici, Aerial thermography for energetic modelling for cities, Remote Sens. 7 (2) (2015) 2152–2170.
[39] P. Fokaides, S. Kalogirou, Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-value) in building envelopes, Appl. Energy 88 (2011) 4358–4365.
[40] S. Lagüela, J. Martínez, J. Armesto, P. Arias, Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies, En. Build. 43 (2011) 1216–1221.
[41] S. Lagüela, N. Caparrini, L. López, Evaluation of infrared thermography as standalone technique for the detection of sediment-pollution in water, Adv. Infrared Technnol. Appl. (2015). Pisa, Italy.
[42] S. Lagüela, H. González-Jorge, J. Armesto, J. Herráez, High performance grid for the metric calibration of thermographic cameras, Meas. Sci. Technol. 23 (2012) 015402.
[43] M. Deseilligny, I. Clery, Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images, ISPRS Int. Arch. Photog. Remote. Sens. Spat. Sci. (2011) 38–42.
[44] Faro Technologies, Inc. Available online http://www.faro.com/ (accessed on 12.10.2016).
[45] I. Puente, M. Solla, H. González-Jorge, P. Arias, NDT documentation and evaluation of the Roman Bridge of Lugo using GPR and mobile and static LiDAR, J. Perform. Constr. Facil. 29 (2013) 06014004.

Capítulo 3. Detección de servicios enterrados

Adquisición eficiente de datos GPR para la detección de tuberías enterradas

Resumen

Este artículo presenta el método del radar de subsuelo o georradar (*Ground Penetrating Radar*, GPR) como una solución no destructiva para la localización de tuberías enterradas, minimizando el impacto en los servicios de las zonas de intervención, como son las fugas en las canalizaciones enterradas, particularmente numerosas en áreas urbanas. Se construyó un área experimental con varios tipos y configuraciones de conducciones y/o tuberías, en la que se probaron diferentes frecuencias y ajustes de parámetros con el fin de aportar un método eficiente de adquisición de datos GPR que garantizase la obtención de resultados de calidad y precisión para la detección de servicios enterrados. En el caso de las tuberías más superficiales, la antena que aportó mejores resultados fue la de 2,3 GHz, con 2 cm de distancia entre trazas. No obstante, las antenas de 1 GHz y 800 MHz han mostrado información complementaria de gran interés a la hora de localizar tuberías a mayor profundidad.

Palabras clave: georradar; Ingeniería Civil; conducciones; ajuste de parámetros.

NDT and E International 91 (2017) 22–31

Contents lists available at ScienceDirect

NDT and E International

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ndteint

Efficient GPR data acquisition to detect underground pipes

F.J. Prego [a,*], M. Solla [b,c], I. Puente [b,c], P. Arias [c]

[a] PhD Program in Geotechnologies Applied to Construction, Energy & Industry, University of Vigo, 36310 Vigo, Spain
[b] Defense University Center, Spanish Naval Academy, Plaza de España s/n, 36900 Marín, Spain
[c] Applied Geotechnologies Research Group, School of Mining, University of Vigo, Rúa Maxwell s/n, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:
Ground penetrating radar
Civil engineering
Piping
Parameter setting

ABSTRACT

This work presents the ground penetrating radar as a non-destructive solution to detect buried pipes and minimize the impacts to the services in the intervention area such as leakages in the buried utilities, particularly massive in urban areas. An experimental zone was built including various types and configurations of piping. Different antenna frequencies and parameter setting were tested in order to provide an efficient field data acquisition that guarantees accurate results in detection. For shallower pipes, a 2.3 GHz antenna with 2 cm of trace-interval has provided the best results. However, 1 GHz and 800 MHz data have revealed complementary information when surveying deeper pipes.

1. Introduction

The construction of underground works usually implies lower environmental impacts but sometimes there are negative aspects as well, such as a local increase in vibrations during the operating phases and higher construction and maintenance costs. In this regard, detection and location of buried pipelines in the design of a building work is extremely important to ensure faultless working processes and minimize the impacts to the buried services in the intervention area, avoiding for example, undesirable fluid losses due to leaks, with occasionally enormous environmental and economic repercussions.

The setting-out on site, before the start of a project, delimits the fields to be exploited, and guarantees that the terrains are expedited and available to work on the execution of the work in optimal conditions. From that moment on, the Law forces contractors to contact their service companies (water and sewage, electricity, gas, voice and data networks, etc.) to provide truthful and objective information on the pipelines location. There is still a need to relocate specialized personnel on site, apart from providing updated site plans, in order to check where the services run: in most cases, those services are buried in pipelines, and it is mandatory to locate them accurately to avoid deterioration with time and guarantee the safety of users (especially in cases of pipelines containing potentially hazardous items, such as natural gas or propane).

In this context, there is an increasing need to use non-destructive techniques to explore and investigate about the subsoil. They can be applied in situ to plan safe works and do not require destructive sampling, which is preferred to avoid hitting these underground utilities [1]. Non-destructive testing techniques, such as pulse induction, resistivity methods, acoustic techniques, as well as magnetic or electromagnetic methods offer unique capabilities for pipe detection [2].

Ground Penetrating Radar (GPR) is a widely used non-destructive and evaluation technique valuable for the investigation of buried structures thanks to its high penetration depth, which in turn depends on the soil nature and the chosen antenna frequency. This NDT technique has been established as one of the most recommended for routine sub-surface inspections, especially for the evaluation of road infrastructure, and more particularly in pavement measurements, cracking monitoring, rebar and pipe location, as well as structural inspection of bridges and tunnels [3–9]. Although some authors have advocated the capability of GPR in detecting underground pipes [10–14], its effectiveness is still questioned due to an environmental background dependence, which can involve some difficulties in the collection, analysis and interpretation of the GPR data. Moreover, a good interpretation could be particularly difficult when soils contain high concentrations of rocks, gravel and roots that result in false anomalies or clutter [15]. In fact, soil properties greatly influence the appropriate transmission of the radar-wave and for example, in highly conductive clay-rich subsoils, the GPR signal will be attenuated making the detection of underground features difficult [16]. Other key factors influencing the effectiveness of the method are the material properties as well as the position, orientation and size of the reflector [17,18]. Lastly, the resulting GPR data quality greatly depends on the configuration and parameters used in field data acquisition.

* Corresponding author.
E-mail addresses: javiprego@gmail.com (F.J. Prego), merchisolla@cud.uvigo.es (M. Solla), ipuente@cud.uvigo.es (I. Puente), parias@uvigo.es (P. Arias).

http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.06.002
Received 18 January 2017; Received in revised form 26 May 2017; Accepted 5 June 2017
Available online 7 June 2017
0963-8695/© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

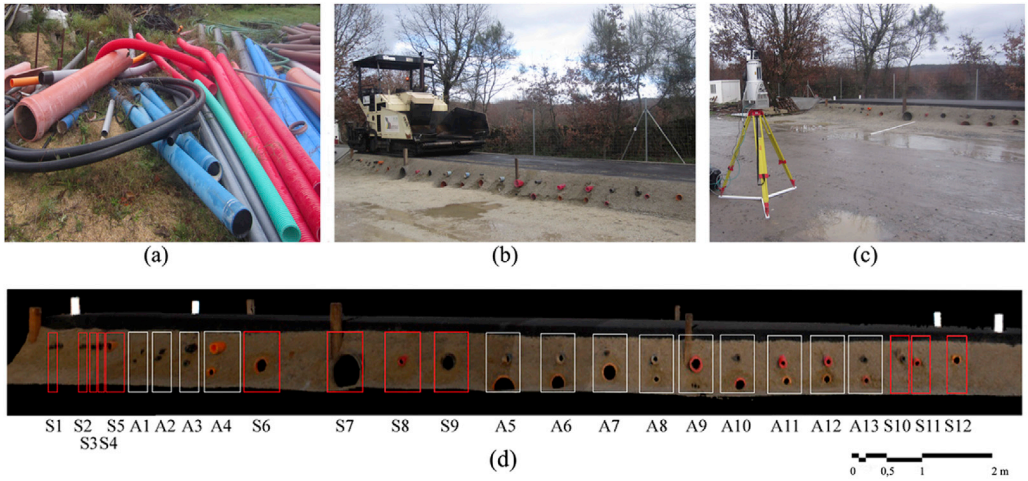


Fig. 1. Design of the experimental test site: (a) Example of the different types of pipes considered; (b) Construction of the test site; (c) RIEGL LMS Z390i during the survey; (d) Orthophoto obtained with the laser scanner.

Table 1
Summary of materials, diameters (cm) and depths (cm) employed in the pipe layout. The combinations used to analyze the effect of aliasing in vertical distance are also shown.

Pipes	Z	Ø	MAT	Aliasing	Z	Ø	MAT
S1	45	2.5	PUR	***A1***	30	2.5	PUR
					45		
S2	30	2.5	PUR	***A2***	30	4	PUR
					45		
S3	30	4	PUR	***A3***	30	7.5	PUR
					50		
S4	30	7.5	PUR	***A4***	30	11	PA
					60		
S5	30	11	PVC	***A5***	30	12.5	DI
					70	31.5	PVC
S6	50	20	PVC	***A6***	30	12.5	DI
					60	20	PVC
S7	55	50	C	***A7***	25	4	PUR
					50	20	PVC
S8	40	9	PP	***A8***	30	10	DI
					55		DI
S9	45	20	PUR	***A9***	30	16	PP
					60	6.3	PUR
S10	30	6.3	PUR	***A10***	30	6.3	PUR
					60	16	PP
S11	30	9	PP	***A11***	35	9	PP
					50	11	PA
S12	30	11	PA	***A12***	30	9	PP
					50	11	PA
				A13	30	6.3	PUR
					50	9	PP

This paper presents an experimental model to simulate several possible configurations of multiple buried pipes, with different coverings that mimic the most frequent real cases. The study determines the effects of different depths, materials and proximity or overlapping in both horizontal and vertical directions on the radar-wave signal in order to characterize it and analyze its capability to detect, locate and distinguish subsoil utilities such as piping among different objects. Amongst those urban services that are channeled through buried pipelines, and are consistently located every day on urban works, we can highlight water supply and sanitation systems (through ductile iron and polyethylene pipes or PVC, polyethylene and polypropylene pipes, respectively), as well as gas pipes using polyethylene and steel reinforced pipes. Regarding the configuration of the GPR system, four antenna frequencies and different parameters settings (total time window, spatial sampling interval, etc.) were tested, which influence the penetration and resolution of the GPR signal and its effectiveness in detection.

2. Materials and methods

2.1. Experimental test site

An experimental zone was designed (Fig. 1b), including meaningful real-life pipeline layouts. The entire scene was 14 × 1 m size, which was composed of three pavement layers: 75 cm of sub-base course (compacted aggregate ZA 20), 10 cm of intermediate course (AC 22 S asphalt), and 5 cm of surface course (AC 16 S asphalt).

Fig. 1d presents the overall orthoimage of the test site obtained by Terrestrial Laser Scanning (TLS), where the main parameters that define the scene geometry can be measured. For surveying, a RIEGL LMS Z390i laser scanner was used as in Refs. [19,20]. The obtained point cloud was textured with the RGB information recorded by a digital camera attached to the laser scanner system. Data acquisition and processing were done using the Riscan software from RIEGL manufacturer [21]. Knowing the accurate geometry of buried pipes allows for better understanding of the radar-wave propagation phenomena and for the determination of the most appropriate radar-wave velocity involved in medium.

As shown in Fig. 1a, several types of pipes were considered, namely: diameters ranging from 25 to 315 mm and coverings (polyurethane, PVC, etc.). The quantity of filling media above the pipe as well as the pipe layout, such as position and proximity between two different pipes in both horizontal and vertical directions, can also affect the propagation of the radar-wave and its subsequent detection. Therefore, several depths and combinations were probed (see Table 1) to understand the influence of the vertical proximity for detection in terms of resolution. Different horizontal separations between pipes were also considered for testing.

2.2. GPR survey

The Ground Penetrating Radar (GPR) is a geophysical method based on the propagation of a very short electromagnetic pulse (1–20 ns) in the frequency band of 10 MHz–2.5 GHz. The GPR antenna is moved over the investigation target along a specific direction with a constant distance between the transmitter and the receiver. The transmitting antenna emits an electromagnetic pulse into the ground, which is partly reflected when it encounters media with different dielectric properties, and partly transmitted into deeper layers. Next, the reflected signal or trace (radar-wave containing all the reflections in depth) is recorded from a receiving antenna in an independent way. Nevertheless, the control unit enables to process all the individual traces (A-Scans) into a 2D image (B-Scan or radargram) by applying a color palette to the amplitude (strength or intensity of the reflection) values registered. Commonly, a grayscale color palette is applied, which assigns the black color to the minimum

Table 2
Obtained values of penetration in-depth (under optimum conditions), and both horizontal and vertical resolutions calculated for each antenna frequency evaluated.

Frequency (MHz)	Penetration (m)	Resolution (cm)			
		Horizontal			Vertical
		d = 30 cm	d = 50 cm	d = 70 cm	
2300	1	25	35	40	4
1000	2	40	50	60	8
800	3	45	55	65	11
500	6	60	75	85	17

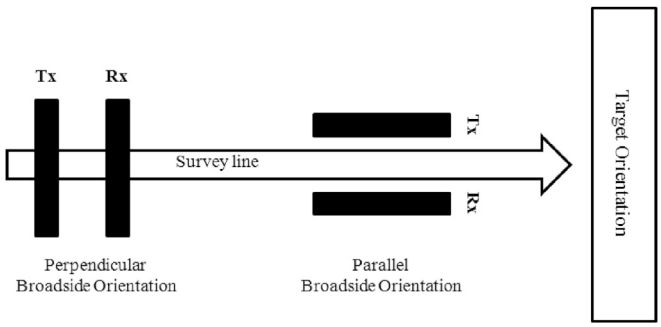


Fig. 2. Common GPR antenna orientations.

Table 3
Total time windows, temporal sampling intervals, number of stacks and spatial sampling intervals evaluated for each antenna frequency used.

Frequency (MHz)	Parameters			
	Total time window (ns)	Temporal sampling	Stack number	Trace-intervals (cm)
2300	10	256	4	2, 5, 8, 10
	15	380		
1000	30	512	1	2, 5, 8, 10
	45	512		
800	30	553	32	2, 5, 8, 10
	45	553		
500	30	512	8	2, 5, 8, 10
	45	512		

amplitude and the white color to the maximum amplitude. The intermediate values are converted into gray colors of different tonality. Thus, by moving the antenna over the ground, an image of the shallow subsurface under the displacement line is obtained. These two-dimensional images, called radargrams, are XZ graphic representations of the reflections detected. The X axis represents the antenna displacement along the survey line, and the Z axis represents the total time window (also called two-way travel-time of the pulse emitted in terms of nanoseconds). If the time required for the electromagnetic pulse to go from the transmitting antenna to the reflector into the ground and return to the receiving antenna is measured, and the velocity of this pulse in the subsurface medium are known, the position of the reflector can be therefore determined. More details on the basic principles of GPR can be found in Refs. [16,22].

In this work, a MALÅ ProEx system was used, and different approaches for field data acquisition were evaluated to establish an optimal parameter setting to properly detect buried pipes.

2.2.1. Antenna frequencies and spatial resolution

An important parameter controlling the depth range of the radar-waves is the transmitting antenna frequency. Therefore, before field data acquisition, the working frequency of the GPR antenna should be carefully selected to ensure a favorable compromise between spatial resolution and depth of detection. The spatial resolution of the GPR system seems the most important factor influencing the success of the technique to obtain the appropriate geometry of the buried objects [23]. Horizontal resolution indicates the minimum distance between two horizontal reflectors to be detected as separate events. This parameter mainly depends on the number of traces (per distance (m) or per time (s)) that is directly adjusted before data acquisition, the beam width, and the depth of the reflector. Regarding the vertical measures, the most important factor is based on the proper knowledge of the radar-wave velocity of propagation in the prospected media. The vertical resolution, which allows for the differentiation of two adjacent signals in time domain like different events without overlapping, mainly depends on the central frequency of the antenna and the radar-wave velocity.

Table 2 describes the different antenna frequencies evaluated in this work. This table shows the penetration in-depth achieved by the GPR signal for each frequency (under optimum conditions), and the spatial resolution (both horizontal and vertical imaging resolutions) provided. These resolution values were determined by considering an average radar-wave velocity of 12.0 cm/ns for the compacted aggregate medium or sub-base course. The velocity obtained for the asphalt concrete medium resulted in 15.5 cm/ns. These transmission velocities were estimated from the field GPR data by using the difference pick application in ReflexW software [24]. Knowing the travel-time differences at known distances (i.e. the reflection from the air-asphalt interface to the reflection at the asphalt-aggregate interface), the average velocity can be directly derived as in Ref. [25]. The vertical resolution (also called range resolution) was calculated from (1), which was proposed by other authors [26] in order to correct the most probable deviation of the theoretical range experimented during fieldworks. In addition, the horizontal resolution for each antenna was estimated from (2) [27] based on a distance of 30 cm between the antenna and the reflector surface.

$$Rv = \frac{1.39 \quad v\,\Delta t}{2} \tag{1}$$

where, v is the radar-wave velocity (cm/ns) and Δt is effective duration of the radar pulse (ns).

$$Rh = 2\left(\frac{\lambda^2}{4} + d\lambda\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

where, λ is the wavelength and d is the vertical distance between the antenna and the reflector surface.

2.2.2. Direction of data acquisition and antenna orientation

The GPR survey was carried out using the common-offset mode [16] with the antenna perpendicular to the long axis of the target to guarantee the diffraction hyperbola generated from buried pipes (circular objects) that makes easier the detection.

In addition, some tests were carried out to probe the optimal antenna dipoles orientation in data acquisition. For the case of linearly polarized bow-tie antennas, the most commonly used GPR antennas, the electric field is polarized parallel to the long axis of the target or perpendicular to the survey line direction (perpendicular broadside orientation) [16]. Nevertheless, a parallel broadside orientation (with the antennas or dipoles parallel to the survey line direction) was analyzed in this work in order to improve imaging resolution and interpretation. Fig. 2 illustrates both perpendicular and parallel broadside orientations. Measurements with both modes of dipole orientation provide supplementary information about the reflector sensitivity to the incident wave polarization.

2.2.3. Total time window and temporal sampling interval

The following step, once the GPR antenna was selected, is to configure the most efficient data acquisition and optimal survey parameters in field for suitable pipe detection and accurate definition of its signature. The different acquisition parameters tested are described in Table 3.

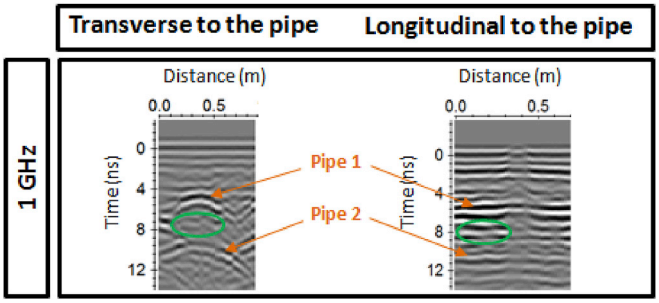


Fig. 3. 1 GHz data acquired over two pipes in both transverse (left) and longitudinal (right) direction to the pipe. The radargrams show the different patterns of reflections obtained: hyperbolic or continuous flat reflections for transverse and longitudinal directions, respectively.

Two different total time windows (or two-way travel-time) were analyzed for each frequency, which were selected based on the burial depths of all pipes contained in the experimental zone. The values assumed were estimated following Equation (3) proposed in Ref. [16], which is a function of the travel distance to and from the target required and the velocity of propagation in media, and assuming a constant (1.3) to mitigate possible signal attenuation or energy decay. Regarding this two-way travel-time (*twtt*) defined, it is necessary to consider the optimal number of samples (N) in which the total time window assumed is divided. The minimum number of samples (N_{min}) is determined by (4) [16], although, when more precision is required for detection, the number of samples must be doubled resulting in the maximum number of samples (N_{max}). This value was adjusted since the MALÅ GPR ProEx system uses a 16 bit A/D converter to transform the continuous GPR signal into digital values that represent the quantity's amplitude. As seen in Table 2, the measured GPR data were collected using the default number of samples for the system, which typically goes from 128 to 2048.

$$twtt = 1.3\,\frac{2\,d}{v} \tag{3}$$

where, d is the vertical distance between the antenna and the reflector surface and v is the radar-wave velocity.

$$N_{min} = \frac{6\,f\;twtt}{1000} \tag{4}$$

where, f is the central frequency of the antenna in MHz and *twtt* is the two-way travel-time in ns.

The stacking, or the number of stacks, used during the GPR tests is also indicated in Table 3. This stacking is the number of repeated measurements at each trace, and sum of the return signals, which allowed generating larger amplitude while minimizing noise.

2.2.4. Spatial sampling interval or trace-interval

As pipes have different diameters, the spatial sampling interval must be also carefully selected for a proper sampling of the hyperbolic pipe signature. The most appropriate spacing or trace-intervals should not exceed the Nyquist condition or the Shannon sampling theorem, which is one quarter of the wavelength in the host medium and expressed as in (5)

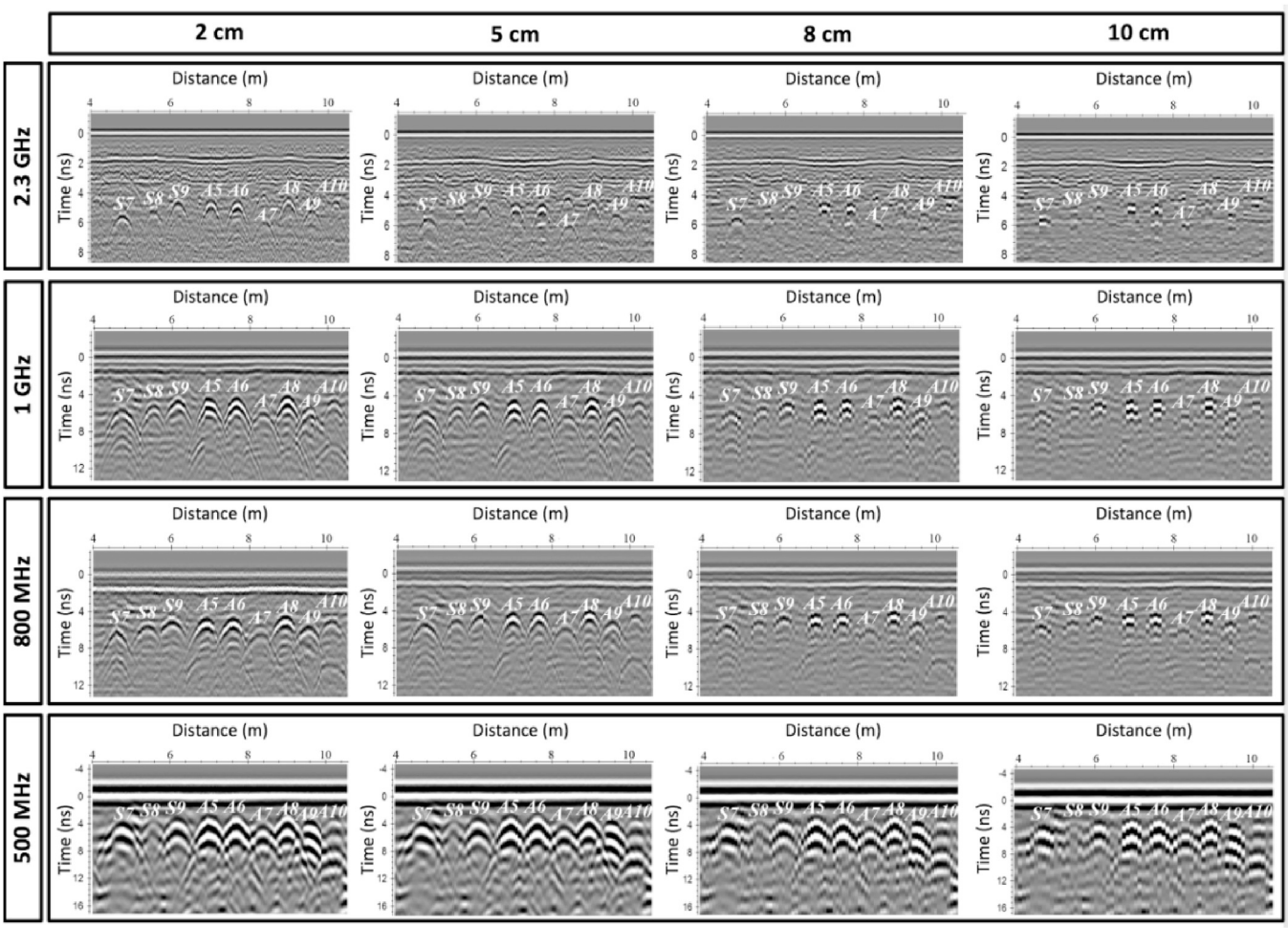


Fig. 4. GPR data acquired with different antenna frequencies to analyze the influence of the trace-interval on the hyperbolic reflection produced.

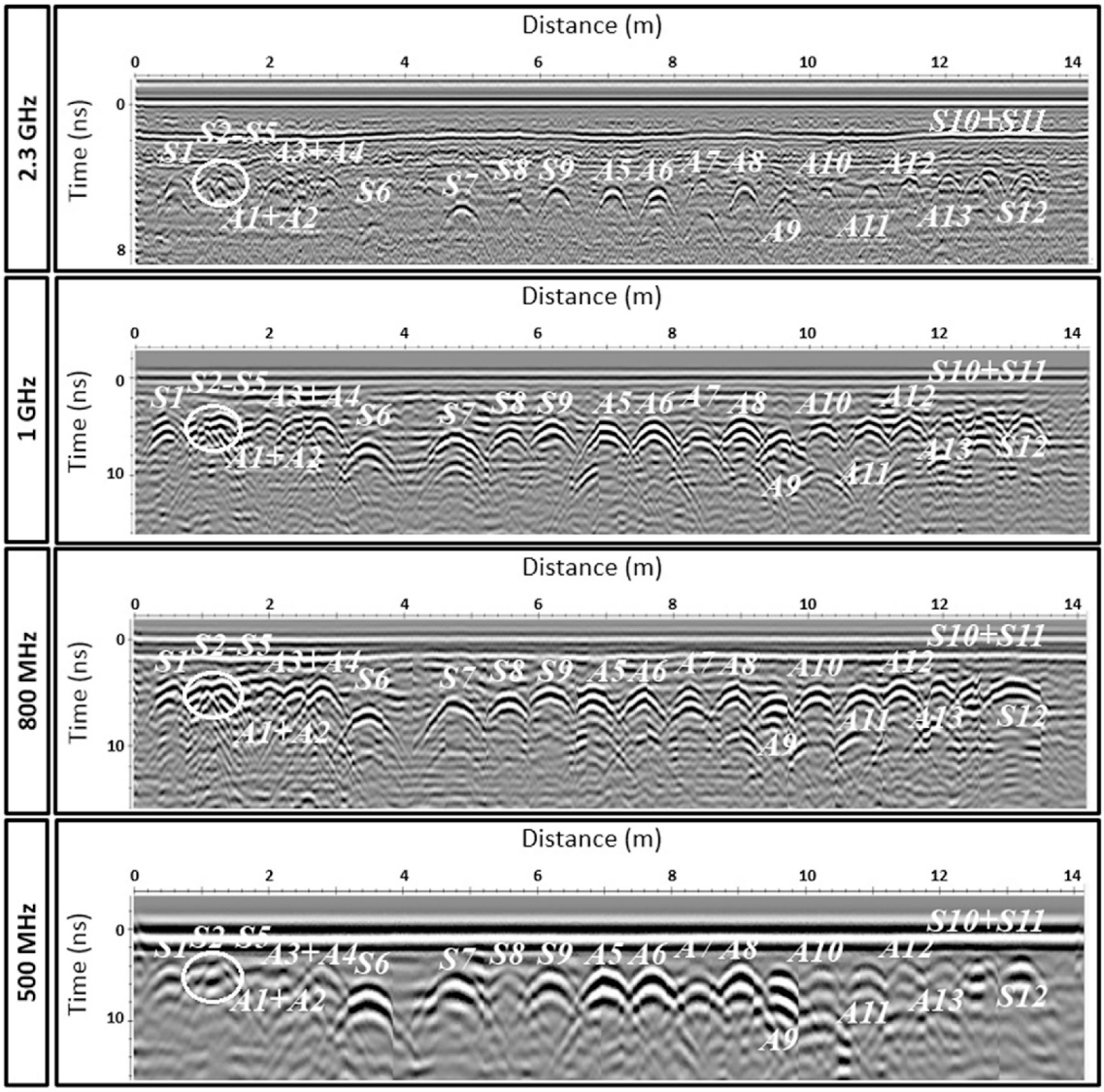


Fig. 5. GPR data produced and identification of pipelayouts for each antenna frequency and different setting parameters: 2.3 GHz (10 ns of total time window and trace-interval of 2 cm), 1 GHz (30 ns and 2 cm), 800 MHz (30 ns and 2 cm) and 500 MHz (30 ns and 2 cm).

[16]. Thus, the maximum spatial sampling intervals by considering a dielectric constant of about 3.5 for the asphalt concrete medium used in this work are: 2 cm (2.3 GHz), 4 cm (1 GHz), 5 cm (800 MHz) and 8 cm (500 MHz). However, as seen in Table 3, different spaced intervals were evaluated for each total time window in order to analyze their influence on pipe detection. In this work, for trace-interval distance calculation, the GPR antenna was mounted on a survey cart with encoder (odometer wheel).

$$\Delta x = \frac{c}{4f\sqrt{K}} = \frac{75}{f\sqrt{K}}(\mathrm{m}) \tag{5}$$

where, f is the central frequency of the antenna in MHz and K is the dielectric constant of the host medium.

3. Results and discussion

The different acquisition parameters analyzed and the results obtained are discussed in this section. Before interpretation, all GPR data were processed with the ReflexW software [24].

3.1. Direction of data acquisition

The direction of the GPR survey line with respect to the pipe orientation has a relevant influence on the quality of the data produced. Commonly, the antenna is moved to collect transverse (or perpendicular) lines to the pipe direction, and the expected pattern of reflection to interpret from the pipe is a hyperbolic-shape reflection (Fig. 3-left). However, when the profile line is collected by moving the antenna in longitudinal (or parallel) to the pipe direction, the reflection obtained is a continuous flat reflection (Fig. 3-right). When a flat reflection is produced, it is not easily distinguished if this reflection corresponds with a pipe, an interface between two different layers in the subsoil or just a reflection multiple (green circle in Fig. 3). It was therefore demonstrated that the most appropriate approach is to acquire data in perpendicular to the pipe direction, since the hyperbolic reflection is better identified and facilitates the interpretation.

3.2. Spatial sampling interval

Different values of trace-interval were analyzed for each frequency evaluated (Table 3). The purpose was to check how is the reflection

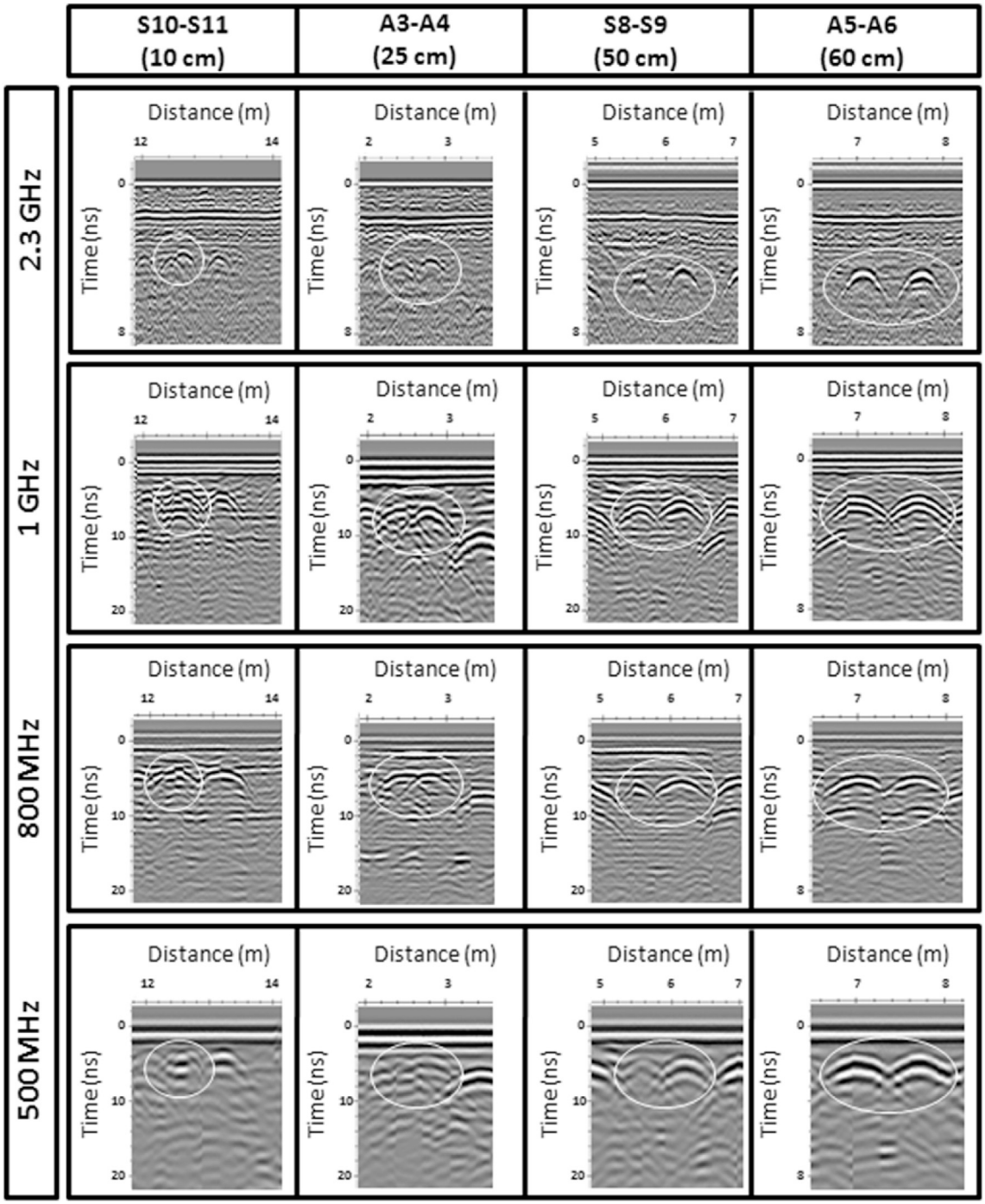


Fig. 6. Analysis of the horizontal resolution: measured data with the antenna frequencies evaluated showing the pipe signatures obtained when considering different horizontal separations between consecutive pipes (the headings of column indicate the piping in Fig. 1 and distance between them).

obtained with each interval to establish the optimal value that ensures the identification of the hyperbolic reflections generated from pipes, even the smallest ones, with a non-excessive number of traces. Fig. 4 shows the radargrams recorded with the four antenna frequencies used when considering trace-intervals of 2, 5, 8 and 10 cm. A sequence of 9 pipes with different diameters is shown (S7 (500 mm), S8 (90 mm), S9 (200 mm), A5 (125 mm), A6 (125 mm), A7 (40 mm), A8 (100 mm), A9 (160 mm), A10 (63 mm)). The best results were obtained for a trace-interval of 2 cm showing a well-defined hyperbola. Nevertheless, these results obtained are not far from those obtained with a trace-interval of 5 cm. The difference between these two configurations is especially dependent on the diameter of the pipe, as it was observed that diameters less than 70 mm were only well-defined with a trace-interval of 2 cm. The GPR profiles collected with trace-intervals of 8 and 10 cm showed a significant loss of information, particularly for those pipes whose diameters were less than 100 mm.

3.3. Total time window

As seen in Fig. 1, in addition to the different pipe layouts simulated, several materials were considered: polyurethane (PUR), polypropylene (PP), nylon (PA), PVC, ductile iron (DI), and concrete (C). Fig. 5 illustrates the GPR data produced, with each antenna frequency, for the entire experimental zone, showing the hyperbolic reflections generated by the

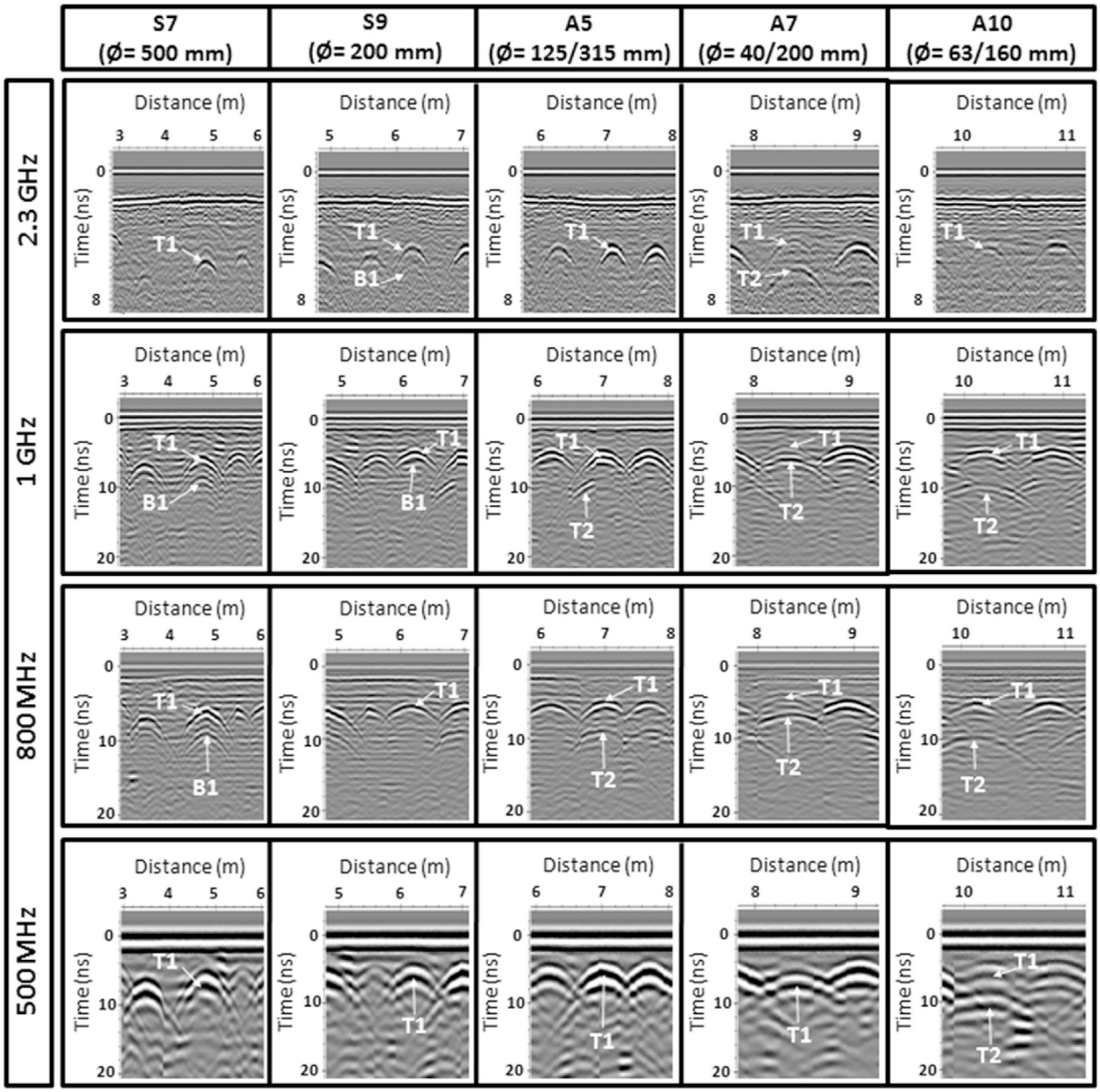


Fig. 7. Analysis of the vertical resolution for both measurements of the pipe diameter and differentiation of pipes aligned vertically but at different depths.

diverse pipes contained. The parameters settings shown in Fig. 5 for each antenna frequency are those providing the best results. These results demonstrate that the technique is effective to detect any pipe for telecommunication, electricity, natural gas, etc. Nevertheless, the ductile iron pipes (A5, A6 and A8) have produced higher strength or intensity of the reflection and a shift (inversion) of the signal polarity, certainly because the metal is the perfect reflector.

Two different values of total time window were tested for each antenna frequency (Table 3) to investigate its influence on the resolution of the GPR imaging and, particularly, to achieve the depth of penetration desired while providing an accurate definition of the pipe signatures. Observing the radargrams in Fig. 5, the 2.3 GHz antenna allowed for the differentiation of more pipes in the horizontal direction, although this frequency has not reached the deeper pipes. On the other hand, the 800 MHz antenna has provided poorer resolution to distinguish consecutive pipes in the horizontal direction without overlapping. However, this frequency allowed reaching more information in depth. These data and the capabilities of the spatial resolution provided by each central frequency under evaluation are widely analyzed in the next subsections.

3.4. Horizontal resolution

All pipes were buried considering diverse horizontal separations between them, which are grouped in four ranges: <10, 10–25, 25–60, >60 cm. The GPR data acquired showed different responses depending on the frequency used for surveying. Observing the 2.3 GHz data in Fig. 6, for a separation of 10 cm between two consecutive pipes in the horizontal direction, the two hyperbolic reflections generated were recognized but showing partial overlapping. These reflections were completely overlapped in the data collected with the other frequencies evaluated, in which the hyperbolic reflections were not easily recognized. In the case of pipes with a separation of 25 cm (Fig. 6), although overlapped, the hyperbolic reflections were distinguished in the 2.3 GHz, and slightly outlined in the 1 GHz and 800 MHz data. The pattern was unrecognized in the 500 MHz data. Different responses were observed for a separation of 50 cm (Fig. 6), where individual reflections were identified in the 2.3 GHz data; whereas in other frequency ranges the reflections were partially overlapped but with a proper recognition of the hyperbolic pipes signatures. Finally, similar results were obtained for separations

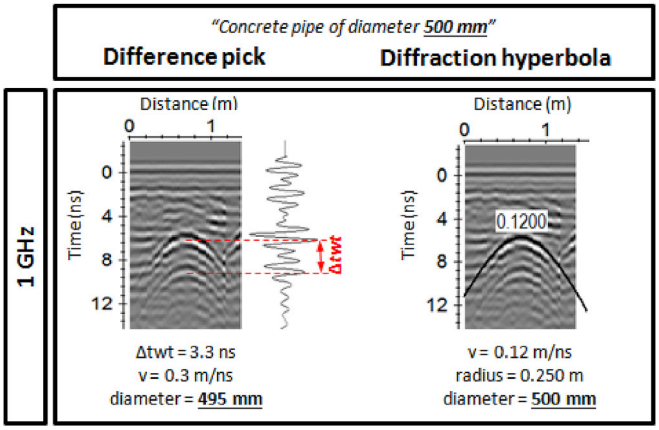


Fig. 8. 1 GHz GPR data acquired over a 500 m diameter concrete pipe illustrating two different approaches to measure diameters: difference pick (left) and diffraction hyperbola (right) applications.

of 60 cm.

These results (Fig. 6) are in concordance with the theoretical horizontal resolution obtained for each frequency (Table 2). For the 2.3 GHz frequency, the horizontal resolution resulted in 25 cm, and it was observed that, for distances less than 25 cm of separation between pipes, the reflections produced showed a minimum overlapping, while with a separation greater than 40–50 cm, these reflections were independently identified. For the 1 GHz frequency, the horizontal resolution was 40 cm, and the reflections were detected without overlapping only for separations greater than 50–60 cm. The same results were obtained for the 800 MHz frequency, with 45 cm of horizontal resolution. For the 500 MHz frequency, overlapping was also observed at separations of 60 cm, being this value the horizontal resolution of the antenna frequency. The reflections were well-distinguished only when the separation between two consecutive pipes was larger than 70–80 cm.

3.5. Vertical resolution

An appropriate vertical resolution, which is dependent on the antenna frequency, implies the differentiation of two or more pipe signatures aligned vertically but at different depths. If the vertical separation between these consecutive pipes is lower than the vertical resolution provided by the antenna frequency used, the hyperbolic reflections will be overlapped, giving an erroneous interpretation. Fig. 7 shows three cases of vertical aliasing: A5 (with a vertical separation between pipes of 10 cm), A7 (with a vertical separation between pipes of 8 cm) and A10 (with a vertical separation between pipes of 18 cm). It is observed how the higher frequency (2.3 GHz) allowed for the differentiation of the reflections produced by the two different pipes (T1 and T2, respectively) when the vertical separation between them was less than 10 cm (A7). However, these reflections were poorly differentiated with the 1 GHz and 800 MHz and totally overlaid with the 500 MHz antenna. On the other hand, for pipes separated about 20 cm (A10), the higher frequency (2.3 GHz) was not able to reach the lower pipe at a depth of approximately 50 cm, while the other frequencies allowed distinguishing both pipes signatures. Regarding the ductile iron pipes in A5, the reflections produced by the two pipes were only distinguished with the antenna frequencies of 1 GHz and 800 MHz. With the 500 MHz antenna, these reflections were overlapped; whereas the potential of penetration provided by the 2.3 GHz antenna was not enough to achieve the lower pipe at 55 cm in-depth.

Additionally, a well-defined hyperbolic reflection allows obtaining the diameter of the pipe. However, this measurement is only effective in such cases where both reflections at the top and bottom of the pipe are detectable. In this work, all pipes considered were air-filled, which is the most unfavorable case. Thus, water-filled pipes present advantages with respect to air-filled because the radar-wave velocity of propagation in fresh water (3 cm/ns) is much slower than the velocity in free-space (30 cm/ns), which allows for better differentiation of independent reflections without vertical aliasing. Nevertheless, it is also important to take into account that a higher total time window is needed to inspect water-filled pipes in order to mitigate the signal delay.

Fig. 7 presents the GPR data produced, with the four different frequencies analyzed, for two single pipes: S7 (a 50 cm diameter concrete pipe) and S9 (a 20 cm diameter polyurethane pipe). The 2.3 GHz data (with vertical resolution of 4 cm), allowed distinguishing both reflections at the top (T1) and bottom (B1) of the S9 pipe. Regarding the data produced with the 1 GHz antenna (with vertical resolution of 8 cm), these two reflections were almost overlaid. Finally, observing the data produced with the 800 MHz and 500 MHz data (with vertical resolutions of 11 and 17 cm, respectively), these reflections appear totally overlaid, making impossible the measurement of the pipe diameter. On the other hand, the reflection generated at the bottom of the S7 pipe was not detectable with the 2.3 GHz antenna because the total time window assumed for this frequency was not deep enough. On the contrary, the 1 GHz and 800 MHz data allowed for the differentiation of both top (T1) and bottom (B1) of the S7 pipe. Lastly, the vertical resolution of the 500 MHz antenna frequency was inadequate to avoid the aliasing between these reflections.

There are two different possibilities to estimate pipe diameters from the measured GPR data: the difference pick application and the

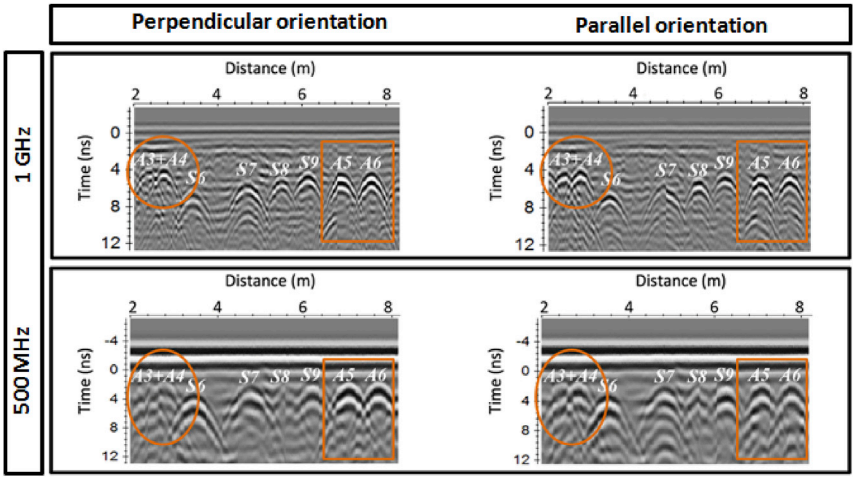


Fig. 9. 1 GHz and 500 MHz GPR data acquired in the same section using both the perpendicular and parallel broadside orientations in Fig. 2.

Table 4
Summary of optimal parameters settings for an efficient GPR data acquisition on pipe detection obtained from the experiments in Section 3.

Parameters settings	Antenna frequency (MHz)			
	2300	1000	800	500
Total time window (ns)	10	30	30	Low resolution –improper pipe
Pipes depths (cm)	<40	>40	>40	signatures
Spatial sampling (cm)	2	2	2	
Horizontal resolution (cm)	25	50	50	
Vertical resolution (cm)	10	20	20	

diffraction hyperbola application.

Using the manual difference pick application [24], the diameter can be determined by considering the wave travel-time distance ($\Delta twtt$) from the reflections generated at the top and bottom of the pipe as illustrated in Fig. 8. This travel-time distance was determined as the distance (ns) between the maximums (positive or negative) of the reflected pulses at the top and bottom of the pipe. Knowing this travel-time distance and the radar-wave velocity of propagation into the pipe, the diameter (d) can be derived as follows:

$$d = v\frac{\Delta twtt}{2} \tag{6}$$

Regarding the diffraction hyperbola application [24], as shown in Fig. 8, the radius value for a circular underground object is estimated by the adaptation of a diffraction hyperbola to the hyperbolic reflection generated at the top of the pipe (Fig. 8). To define the hyperbolic shape to fit, it is necessary to know the radar-wave velocity of propagation in the host medium.

3.6. Antenna orientation

GPR profiles were also acquired by considering different dipoles orientation in order to see how important the polarization factor may be for optimizing the potential detection of pipes: with the transmitting and receiving dipoles perpendicular to the data collection direction (perpendicular broadside orientation), and with the dipoles parallel to the data collection direction (parallel broadside orientation). Fig. 9 presents the results collected with frequencies of 1 GHz and 500 MHz over the same section of the experimental zone.

These results showed a hyperbola better defined in-depth (vertical resolution) with the perpendicular dipoles orientation than with the parallel dipoles orientation (the square areas in Fig. 9). With the parallel orientation, the pipe signature is less detectable. Nevertheless, this dipoles orientation provided better horizontal resolution in the nearest subsurface. It was possible to distinguish underlying pipes with a separation of 25 cm (the circle areas in Fig. 9).

This effect was more pronounced for low frequency antennas because the horizontal resolution provided is lower than for high frequency ones. The horizontal resolution of the 2.3 GHz antenna in the host medium is 25 cm, while this value for a 500 MHz antenna results in 60 cm (Table 2).

4. Conclusions

In this paper, we have presented an efficient GPR data acquisition for pipe detection. The use of GPR techniques to locate all those buried utilities represents a key tool for validating their right location and cross-checking the accuracy of the information provided by the services companies, therefore improving the work safety while ensuring supplies during the planned activities.

Four antenna frequencies (2.3 GHz, 1 GHz, 800 MHz and 500 MHz) and different parameters settings (total time window, temporal and spatial sampling intervals, and antenna orientation) were analyzed. Special attention was paid to the vertical and horizontal resolutions provided by each antenna frequency. For testing, an experimental site was built by considering various pipe diameters and diverse vertical and horizontal separations between consecutive pipes. Table 4 provides a summary of the efficient parameters settings obtained for each antenna frequency from the experimental tests. It was observed that the 2.3 GHz data allowed for a better outlying of the pipe signature for shallower pipes (less than 40 cm in-depth), whereas the 1 GHz and 800 MHz data allowed reaching pipes at depths more than 40 cm. Regarding the spatial sampling interval, the best results were obtained with 2 cm of trace-interval.

With respect to the spatial resolutions, although with a limited penetration of 40 cm, the 2.3 GHz frequency allowed to differentiate pipes in both vertical and horizontal directions with separations of about 10 and 25 cm, respectively. On the other hand, the 1 GHz and 800 MHz frequencies allowed for the differentiation of pipe signatures with minimum separations of 50 and 20 cm in the horizontal and vertical directions, respectively. The 500 MHz frequency did not provide proper pipe signatures due to its lower resolution. Finally, it was concluded that the perpendicular dipoles orientation is recommended to improve the vertical resolution while the parallel dipoles orientation is preferred when better horizontal resolution is required.

Acknowledgments

The authors wish to acknowledge the companies Extraco, S.A. and Misturas, S.A. for all the help that made this research possible. Additionally, this study is a contribution to the EU funded COST Action TU1208, “Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar”.

References

[1] Nissen J, Johansson B, Wolf MJ, Skoog L. Ground penetrating radar – a ground investigation method applied to utility locating in no-dig technologies. Stockholm: Mala Geoscience Raycon; 2001. p. 1–6.
[2] Cist DB, Schutz AE. State of the art for pipe and leak detection. Geophysical Survey Systems, Inc.; 2001.
[3] Saarenketo T, Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar. J Appl Geophys 2000;43:119–38.
[4] Solla M, Lagüela S, González-Jorge H, Arias P. Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: preliminary findings. NDT E Int 2014;62:55–65.
[5] Puente I, Solla M, González-Jorge H, Arias P. Validation of LiDAR surveying for measuring pavement layer thicknesses and volumes. NDT E Int 2013;60:70–6.
[6] Alani AM, Aboutalevi M, Kilic G. Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment. J Appl Geophys 2013;97:45–54.
[7] Prego FJ, Solla M, Núñez-Nieto X, Arias P. Assessing the applicability of ground penetrating radar to quality control in tunneling construction. J Constr Eng Manag 2016;142(5).
[8] Benedetto A, Pajewski L. Civil engineering applications of ground penetrating radar. Springer Trans Civ Environ Eng 2015.
[9] Riveiro B, Solla M. Non destructive technologies for the evaluation of structures and infrastructures. London: CRC Press/Balkema. Taylor & Francis Group; 2016.
[10] Gamba P, Lossani S. Neural detection of pipe signatures in ground penetrating radar images. IEEE Trans Geosci Remote Sens 2000;38(2):790–7.
[11] Pettinelli E, di Matteo A, Mattei E, Crocco L, Soldovieri F, Redman JD, et al. GPR response from buried pipes: measurement on field site and tomographic reconstruction. IEEE Trans Geosci Remote Sens 2009;47(8):2639–45.
[12] Bonomo N, de la Vega M, Martinelli P, Osella A. Pipe-flange detection with GPR. J Geophys Eng 2011;8:35–45.
[13] Ismail NA, Saad R, Muztaza NM, Ali N. Predictive mapping of underground utilities using ground penetrating radar. Casp J Appl Sci Res 2013;2:104–8. AICCE'12 & GIZ'12.
[14] Porsani L, Ruy YB, Ramos FP, Yamanouth GRB. GPR applied to mapping utilities along the route of the Line 4 (yellow) subway tunnel construction in São Paulo City, Brazil. J Appl Geophys 2012;80:25–31.
[15] Congram DR. A clandestine burial in Costa Rica: prospection and excavation. J Forensic Sci 2008;53(4):793–6.
[16] Annan P. Ground penetrating radar: principles, procedures and applications. Mississauga, Canada: Sensors & Software Inc; 2003.
[17] Shaari A, Ahmad RS, Chew TH. Effects of antenna-target polarization and target-medium dielectric contrast on GPR signal from non-metal pipes using FDTD simulation. NDT E Int 2010;43:403–8.
[18] Sagnard F, Norgeot C, Derobert X, Baltazart V, Merliot E, Derkx F, et al. Utility detection and positioning on the urban site Sense-City using ground-penetrating radar systems. Measurement 2016;88:318–30.

[19] Solla M, González-Jorge H, Álvarez MX, Arias P. Application of non-destructive geomatic techniques and FDTD modeling to metrical analysis of stone blocks in a masonry wall. Constr Build Mater 2012;36:14–9.
[20] González-Jorge H, Puente I, Eguía P, Arias P. Single-image rectification technique in forensic science. J Foren Sci 2013;58(2):459–64.
[21] RIEGL. Homepage of the company RIEGL laser measurement systems GmbH. Available from: http://www.riegl.com (Accessed 12 January 2017).
[22] Daniels DJ. Ground penetrating radar. London: Institution of Electrical Engineering; 2004.
[23] Rial FI, Pereira M, Lorenzo H, Arias P, Novo A. Resolution of GPR bowtie antennas: an experimental approach. J Appl Geophys 2009;67(4):367–73.
[24] Sandmeier KJ. ReflexW manual v.4.5. Sandmeier Scientific Software; 2007. Available from: http://www.sandmeier-geo.de.
[25] Solla M, González-Jorge H, Lorenzo H, Arias P. Uncertainty evaluation of the 1 GHz GPR antenna for the estimation of concrete asphalt thickness. Measurement 2013; 46:3032–40.
[26] Jol HM. Ground penetrating radar: theory and applications. Elsevier Science; 2009.
[27] Pérez-Gracia V, Di Capua D, González-Drigo R, Pujades L. Laboratory characterization of a GPR antenna for high-resolution testing: radiation pattern and vertical resolution. NDT E Int 2009;42(4):336–44.

Capítulo 4: Inspección de estructuras de obra: túneles

Evaluación de la aplicabilidad del radar de subsuelo para el control de calidad en la construcción de túneles

Resumen

El radar de subsuelo o georradar (*Ground Penetrating Radar*, GPR) ha demostrado ser una técnica adecuada para el control y evaluación de la calidad en obras de túneles. La literatura científica incluye muchos trabajos exitosos que abordan el empleo de esta técnica de inspección con el objetivo de detectar la existencia de patologías y anomalías internas en este tipo de infraestructuras. Sin embargo, la mayor parte de estos estudios se han llevado a cabo sobre túneles que ya están en servicio. En estas situaciones, la identificación de elementos internos, así como de posibles daños en las estructuras, se ha visto seriamente limitado debido a la presencia de armaduras de acero poco profundas, que complican el proceso de interpretación de los radargramas obtenidos. Por este motivo, este artículo presenta la evaluación de un túnel de alta velocidad ferroviaria excavado, en sus fases más iniciales de construcción, en lugar de estudiarlo ya terminado. El propósito de este estudio ha sido demostrar la potencialidad de este método de inspección cuando se emplea en etapas tempranas críticas del proceso constructivo. Los resultados han aportado información relevante, concretamente: espesores de la capa de gunitado, presencia de oquedades y delaminaciones en el recubrimiento del túnel, problemas de humedades y localización de las estructuras de refuerzo en el revestimiento. Toda esta información resulta de gran utilidad para los ingenieros civiles, principalmente a la hora de tomar decisiones relativas a las labores de prevención y mantenimiento de la infraestructura.

Palabras clave: georradar, construcción de túneles; espesor de gunitado; humedad; oquedades; tecnologías de inspección.

Prego, F. J., Solla, M., Núñez-Nieto, X., & Arias, P. (2016). Assessing the applicability of ground-penetrating radar to quality control in tunneling construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, *142*(5), 06015006.

https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001095

Abstract

Ground-penetrating radar (GPR) has proved to be a valuable method for tunneling quality management and evaluation. The research literature includes many successful works addressing the use of this technique with the aim to detect the existence of internal pathologies and anomalies. However, most of them have been carried out on tunnels in operation. In these situations, the identification of inner elements and possible damage has been severely limited due to a shallower rebar mesh that complicates the radar data interpretation process. Therefore, this paper presents the evaluation of an excavated high-speed railway tunnel during the early stages of construction instead of considering a finished one. The purpose of the study was to demonstrate the potential of this method when applied during these first critical phases. The results provided noteworthy information: namely, thickness of the gunite layer, lining voids and delamination, moisture problems, and the presence of reinforcing in the tunnel lining. All this information may be useful for civil engineers when they must make a decision on maintenance and prevention tasks.

Capítulo 5: Técnicas de procesado y software de aplicación

Herramienta Android para móviles para el procesado simplificado de datos GPR en aplicaciones de construcción

Resumen

Este trabajo presenta una nueva herramienta para el procesado de señales GPR en dispositivos móviles que empleen la plataforma gratuita Android en smartphones (teléfonos inteligentes) y tabletas. La aplicación desarrollada es capaz de mostrar y procesar radargramas sin recurrir a los programas comerciales más comunes de procesado de la señal GPR. Estas aplicaciones comerciales han sido desarrolladas para un tratamiento avanzado de la señal, dando lugar a procesados muy complejos que necesitan de muchos recursos computacionales. Por este motivo, el objetivo de este trabajo ha sido desarrollar una herramienta de procesado simplificada e intuitiva, que permita al usuario agilizar el procesado de la señal GPR. Para este propósito, la aplicación lleva implementados una serie de filtros básicos que optimizan el análisis de las señales GPR, facilitando su interpretación. Asimismo, se han implementado diferentes aplicaciones de apoyo a la medición de aspectos geométricos de interés, tales como espesores y diámetros de barras de acero y/o tuberías enterradas. De este modo, cualquier usuario no experto en el manejo del método GPR podría generar resultados preliminares *in situ*, empleando un simple dispositivo convencional del tipo smartphone o tableta.

Palabras clave: radar de subsuelo (GPR); análisis de onda radar; Ingeniería Civil; infraestructuras del transporte; control de calidad.

Automation in Construction 89 (2018) 170–182

Contents lists available at ScienceDirect

Automation in Construction

journal homepage: www.elsevier.com/locate/autcon

A mobile android tool for simplified GPR data processing in construction applications

Francisco Javier Prego[a,b,*], Luis Nieto[c], Mercedes Solla[d,e], Iván Puente[d,e]

[a] Programme in Geotechnologies Applied to Construction, Energy and Industry, University of Vigo, Rúa Maxwell s/n, 36310 Vigo, Pontevedra, Spain
[b] Department of R&D, Extraco S.A. and Misturas S.A. Camiño da Cima 24, 32004 Ourense, Spain
[c] Department of R&D, Abakal Ingenieros S.L. Camino de la Carrera Toledana 33, 28500 Arganda del Rey, Madrid, Spain
[d] Defense University Center, Spanish Naval Academy, Plaza de España S/N, 36920 Marín, Pontevedra, Spain
[e] Applied Geotechnologies Research Group, School of Mining, University of Vigo, Rúa Maxwell S/N, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo, Pontevedra, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:
Ground penetrating radar
Radar-wave analysis
Civil engineering
Transport infrastructure
Quality control

ABSTRACT

This work presents a new GPR signal processing tool for mobile devices, which uses the free Android platform in smartphones and tablets. The developed application is able to display and process radargrams without using the most common commercial software applied for GPR signal processing. These existing applications have usually been developed for advanced signal processing, which results in complex processes and requires large computational resources. Therefore, the aim of this work was to develop a simplified and intuitive tool, which allows speeding up the GPR signal processing. For such purpose, the application implements basic filters to optimize the GPR images analysis and to facilitate data interpretation. Different tools have also been implemented to obtain interesting geometric measurements, such as thicknesses and diameters in rebar or piping. Thus, any non-expert user on the GPR technique could generate preliminary in-situ results using conventional smartphone or tablet devices.

1. Introduction

The use of Ground Penetrating Radar (GPR) systems to control and study civil engineering works has gained a great development for last years, especially for road and rail infrastructure evaluation and, more particularly, in pavement thickness measurements, cracking monitoring, rebar detection and structural inspection in bridges and tunneling [1–7]. Thus, it was demonstrated that the GPR technique is an effective method for road inspection because it has proved to be a reliable and affordable nondestructive testing (NDT) technique, comparing with other inspection techniques such as drill coring [8–9].

However, obtaining the processed GPR signal is a complex task [10–11], and it requires using specific commercial software, especially complex and not always free [12–13]. Thus, there are required simple and easy-to-use processing tools to allow any operator or road maintenance agent, without specific knowledge in commercial software, to perform a basic signal processing and a first data interpretation in fieldwork [14]. In this work, an Android app has been developed to allow a basic GPR signal processing in smartphone or tablet devices. The main aim was to create a free tool endowed with an intuitive and interactive interface for near real-time, onsite activities. Unlike other previously developed applications [15–16], in this work the GPR signal has been considered as an exponentially attenuated sinusoidal function in time domain distorted by the reflections produced through propagation. The app includes several filters to analyze and process the GPR signal. Moreover, some tools have been developed to easily identify and measure interesting aspects that should be evaluated during road inspections, such as cracking or void detection, thicknesses in pavements and rebar or pipe diameter estimations.

Smartphones and tablets can be considered as pocket computers, always handy and endowed with internet connection, which makes easier the app distribution in platforms or stores in the net, also providing easy access to demonstrations and tool tutorials stored in the cloud [17]. This is a remarkable fact as it let us to develop a greatly didactic app. However, disadvantages of this type of devices must not be forgotten. They have small screens and imprecisions because of using touch screens (instead of a mouse) and a lower computing capacity and storage memory, especially in the most basic models. These limitations have been taken into account when designing this app, in order to obtain a more efficient application.

2. Software architecture: filters and tools

This work presents an entirely free application developed for GPR

* Corresponding author at: Programme in Geotechnologies Applied to Construction, Energy and Industry, University of Vigo, Rúa Maxwell s/n, 36310 Vigo, Pontevedra, Spain.
E-mail address: javiprego.extraco@gmail.com (F.J. Prego).

https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.017
Received 28 January 2017; Received in revised form 21 November 2017; Accepted 16 January 2018
0926-5805/ © 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

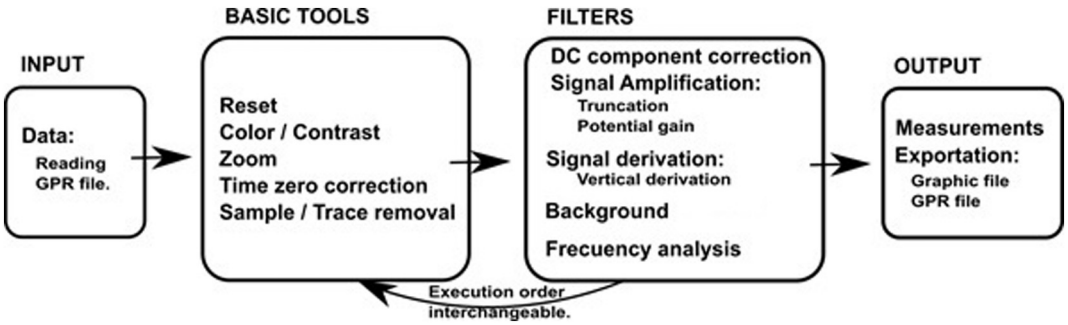


Fig. 1. General flow chart of the developed app.

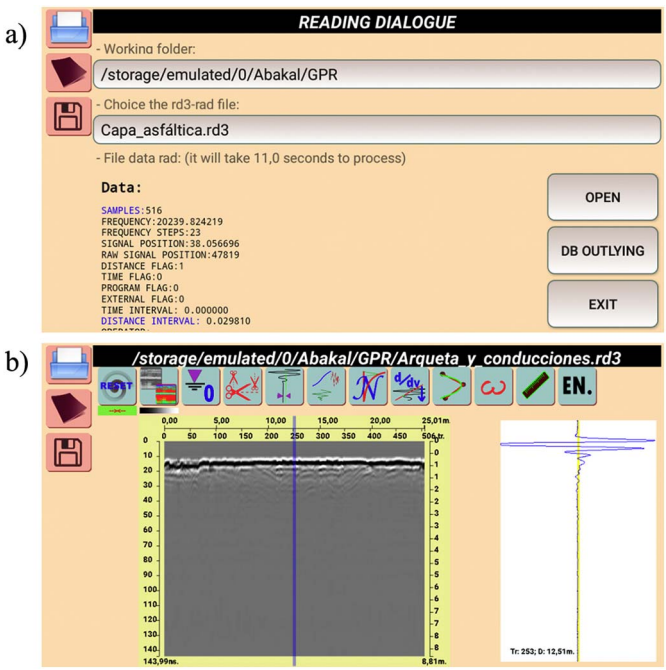


Fig. 2. General app interface: (a) opening .rad files with field data acquisition configuration and (b) radargram displayed from the .rd3 file.

signal processing (similar in some aspects to the apps in [18–20]), but specifically designed for conventional Android-based smartphones and tablets (from Android version 4.4 to the latest version 8.0). Particularly, this app includes basic tools (reset, color contrast, zoom, time zero correction and sample/trace removal) and specific filters to raw GPR signal processing: DC component correction, signal amplification, signal derivation, background removal and frequency analysis.

Fig. 1 shows the flow chart with the steps followed to develop the app. Its main novelty lies in the optimization of programming algorithms that have been adapted to the computing power, storage capacity and functional characteristics of these devices, developing specific filters to simplify the GPR signal processing in comparison with conventional software tools designed for desktop computers [20]. The app was implemented using a dynamic programming algorithm based on a multi-threaded program execution model on central processing unit (CPU) cores within the smartphone. In this regard, if the app runs on a single main thread of execution, it means every long-running operation such as database initialization or heavy calculation will block the user interface (UI) thread. Consequently, it will cause the app to seem slow and the response time for input events delayed, having serious performance problems. Luckily, this new GPR signal processing tool is a multi-threaded app. This is an approach of solving complicated problems by expressing it as an optimal combination of smaller-sized subproblems. Moreover, multithreading allows users to start and manage multiple threads running concurrently without blocking the main thread or UI thread, which remains responsive when doing lengthy operations. Therefore, it improves the performance of the program by optimizing the usage of system resources.

Nowadays, it is usual that smartphones and tablets have more than one core, so this newly developed GPR tool can also process large GPR raw data by benefiting from parallel processing on different cores, reducing the computing time greatly and providing a better interactivity with the users. This fact multiplies the operating cores potential in the smartphone or tablet, because they work independently. When working by blocks for threads, computational time is proportionally reduced to the number of cores used by the device. For example, working with 2 cores, the processing time is approximately reduced to the half (50%); working with 4 cores, the time is reduced to one fourth of time (25%), etc. The final computing time will depend on the number of processed data each time and on the available cores in the device. Lastly, it is worth mentioning that, to implement multithreading in Android apps is relatively easy for developers with a basic knowledge of Java language.

2.1. Import data and radargram displayed

The first task of the application is to read raw signals obtained with a typical GPR system. Particularly, the app has been developed for Malå Geoscience Equipment (.rad and .rd3 extensions), for any antenna amplitude pattern, but it could be easily adapted to operate with other extensions from alternative GPR systems. The GPR profile line should be acquired using specific software from the GPR system (Ground Vision software in the case of Malå Geoscience systems) but, once the profile line data were registered, it is easily transferred to the smartphone or tablet through a USB cable. The .rad files are ASCII files, containing information of the field data acquisition, while the .rd3 file is a binary file that stores registered data (see Fig. 2). Once the raw data (or .rd3 file) are imported into the app, they are encoded in an "Initial Data Matrix", called matrix A, containing binary data with the total number of samples and traces transferred by the GPR system: samples are stored in i rows and traces in j columns of this matrix A.

The app has been developed in Java programming and designed for Android devices because they are free and easily available. This first task of data reading is a basic programming and more explanation can be found in [21].

After reading the GPR files, the matrix A will be denoted by subscripts i and j (Matrix Aij), so $i \in$[1.SAMPLES], $j \in$[1.LAST_TRACE]. Next, the raw data encoded in matrix A will be processed in order to obtain a graphic representation of the GPR signals. This is obtained by converting the amplitude values (or strength of the reflection) into a known color scale (rainbow color or grayscale). This graphic representation has two coordinate axes, i and j (whose values are coincident with the elements of matrix A). This GPR signal representation is necessary to study Android platform limitations. In the latest Android versions, the maximum graph dimension that does not lead to mistakes was 4096 pixels, whereas for previous versions it was 1024 pixels. Thus,

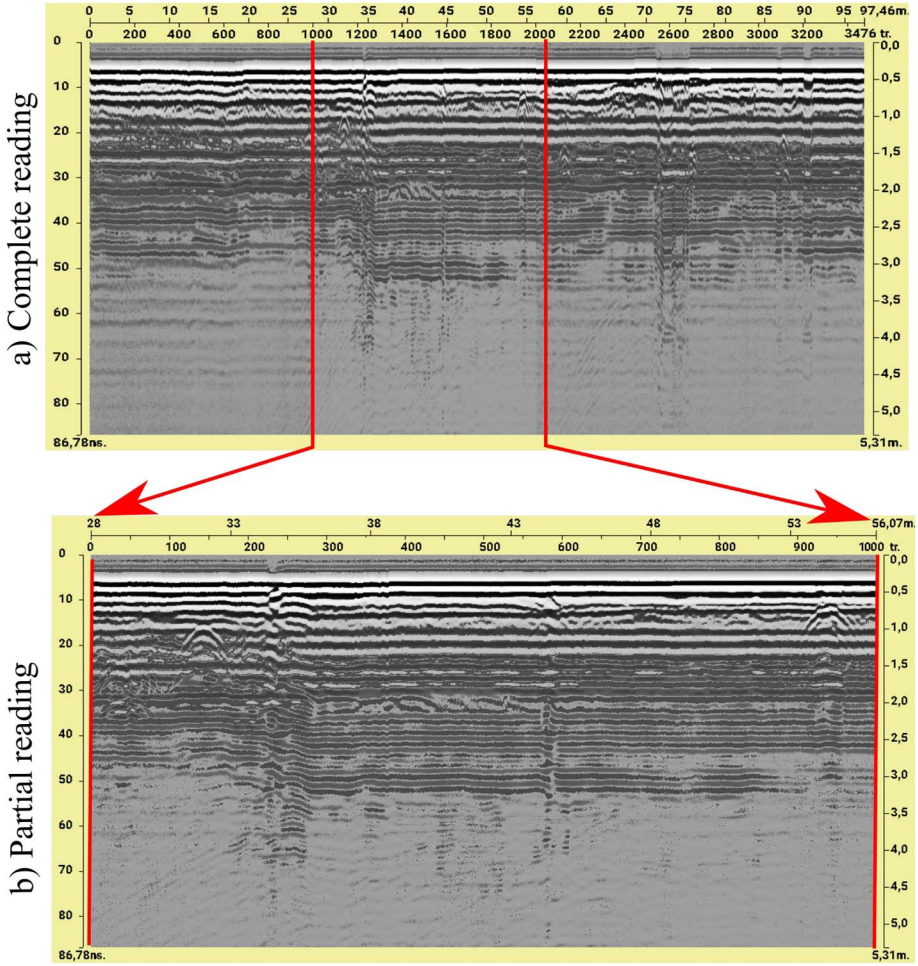


Fig. 3. Difference between a complete (a) and a partial (b) reading of the radargram.

in order to avoid these mistakes during this phase while operating in both old and new devices, the maximum dimensions have been limited to 1024 pixels. Because of this restriction, if indexes *i* or *j* are higher than 1024 (any of them), the plot will automatically rescale its final height or width to a fixed value of 1024, in both indexes *i* and *j*.

Other disadvantages of using Android devices for GPR signal processing are the limited memory and low power of calculation in some smartphone and tablet devices. After testing some low-cost devices, it was found that memory problems appear when samples with more than 2000 traces are processed. To overcome this limitation, the app incorporates a previous interface that lets to choose between opening the complete file or only part of it, limiting the file to 1000 traces. Fig. 3 shows an example of comparative visualization between an original signals composed of 3476 traces (a) and a partial opening limited to 1000 traces (b). This partial reading resulted in a reduction of computer memory and processing time, while focusing in detail on a specific part of the processed radargram.

2.2. Visualization and pre-filtering basic tools

The developed app has several commands that are displayed as buttons on the smartphone screen, improving the GPR signal filtering without modifying the original raw data. This pre-filtering is only focused on the graphical representation of the signal.

2.2.1. Undo, save and reset

An undo tool has been included to return to the original raw data saved in the initial matrix A. That means storing simultaneously the original matrix A and other subsequent matrices generated during every data change or filtering process. Taking into account the memory limitations in Android devices, it is required to look for other operating procedures to avoid storing systematically each modified matrix (Matrix A′, A″, A‴, etc.). Because of it, this work proposes to operate with only three data matrices, namely: A (initial matrix with original binary data saved in A_{ij}), T (temporary matrix used in each filtering process) and lastly, when the applied changes/operations are agreed, a matrix F (a new matrix containing the final solution). In this way, filters will be applied on matrix F and changes will be visualized and saved in matrix T while working. Therefore, by selecting the option “Fix”, the app will assume the operation F = T. On the other hand, if changes are not finally saved, matrix T will disappear and the app will only keep last values of matrix F. Finally, pre-filtering tools incorporate a RESET command (with a specific button on the screen), that allows users to fix F = A (returning to the initial raw data, without applying modifications or filtering the GPR signal).

2.2.2. Filtering modifiers

When filtering occurs, there will appear five buttons on the screen to change their intensity (Fig. 4). These filtering modifiers are shown as “≪”, “≫”, “_”, “Save” and “Exit” on the screen, and they will have

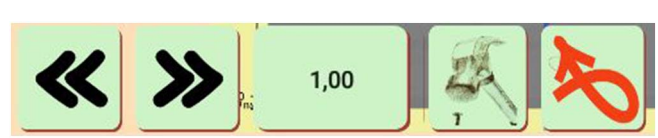


Fig. 4. Filtering buttons (from left to right): decrease/increase intensity, fix a numerical value, save changes and, finally, exit or exit without changes.

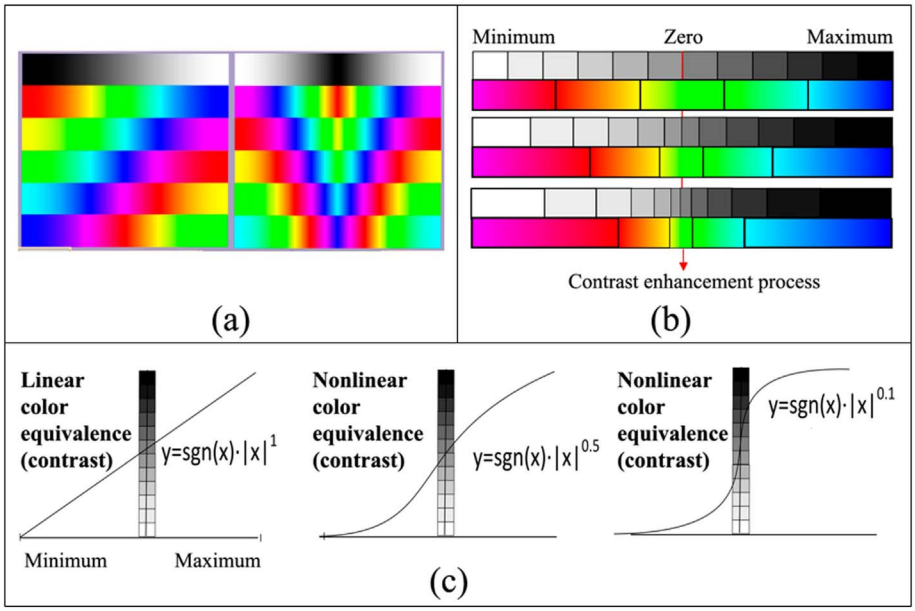


Fig. 5. Color spectrum applied (a); contrast enhancement of the GPR signal into central values (b) and contrast enhancement process of the central values of the color spectrum (c).

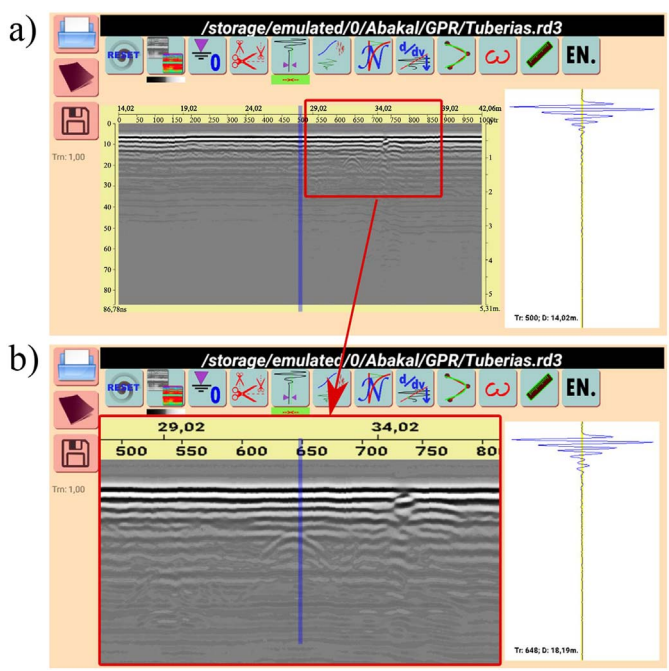


Fig. 6. Comparison between an original raw signal representation (a) and its zoomed version (b).

common meanings for all filters: decrease or increase intensity, fix a numerical value, save changes and exit without modifying the original signal that has been processed.

2.2.3. Palette color and contrast

Radargrams will be colored according to a color code in order to aid their processing and interpretation. Additionally, a pre-filter tool has been included to represent the pre-processed signal in grayscale, improving its contrast. Fig. 5 shows the assumed scales, including the possibility of highlighting the existence of symmetries in the signal with respect to the applied color spectrum.

2.2.4. Zoom

One of the main limitations on smartphones is their small-size screen (8–10 in.). Thus, it is commonly impossible to show the entire radargram on a large scale on the screen. A pre-filter has been therefore incorporated to zoom in certain zones or sections of the image and display them in more detail. There is not a specific zoom button because this option is intrinsically present in the app through the touch screen technology of Android apps.

2.2.5. Time zero correction and sample/trace range removal

The "time zero correction" pre-filter will set a starting point in the vertical (or time window) axis, from which GPR values will be considered. Traces require adjusting to a common time zero position since thermal drift, instability or variations in antenna airgap can cause jumps in the air/ground wavelet first arrival time.

The app has been developed to automatically detect the first maximum amplitudes, in absolute value, in each trace composing the radargram. It works taking into account the first peak of the signal preceding the maximum amplitude in the sinusoidal function. This algorithm reads the signal A_{ij} in each trace. Once the maximum value of traces has been established, i_0 will be the new time zero level, and the matrix A_{ij} (where $i \in$[1.SAMPLES], $j \in$[1.LAST_TRACE]) will change to a new matrix A_{ij} matrix (where $i \in [i_0$.SAMPLES], $j \in$[1.LAST_TRACE], deleting the i elements lower than i_0. This is an automatic process, so users should analyze previously the original values to be processed, in case they may find exceptions in the searching process of maximum values (for example, existence of limit values, indeterminations, etc.).

The 'time zero correction' can be also manually adjusted by users. The visualization of the trace on the screen allows the user to click on the first peak of the wave using the touch screen and with the help of the zoom options and the other modifiers buttons implemented in the app (Figs. 4 and 6). Nevertheless, the position of the time zero manually set might be inaccurate and the automatically detection is recommended.

The app also includes the option to select and remove ranges of samples and/or traces, which result in a reduction of the depth and/or the length of the radargrams. This allows focusing exclusively on the most interesting sections of the radargrams before a detailed post-processing. Fig. 7 shows a general overview of these pre-filtering options.

2.3. Signal processing filters

2.3.1. DC component correction

A common feature in commercialized GPR equipment is the

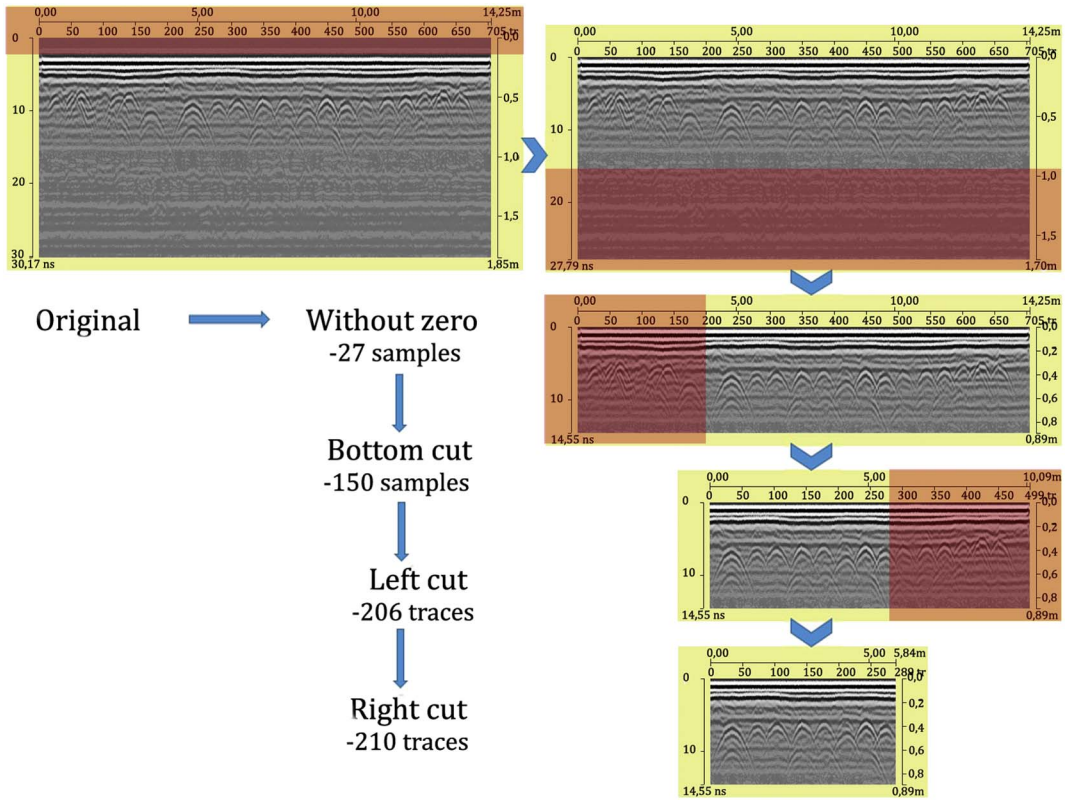


Fig. 7. Illustration of time zero correction and samples/traces ranges removal.

appearance of a continuous or very low frequency component (DC component) in the traces recorded by the radar, since the average level of the signal is moved from zero amplitude to a different value. The appearance of this component is usually associated with either inductive phenomena or possible instrumentation dynamic range limitations.

The filter of signal centering (or vertical filter) eliminates the interferences or noises produced by the coupling of the internal GPR signal with its component DC-Shift, which is more critical with signals of high frequency antennas. Following Eq. (1), this filter was elaborated considering the electromagnetic signal as a mathematical function that, at indefinite depths (where z tends to infinite), joins with its own symmetry axis. It is mathematically proved that the signal decoupling value with respect to the vertical axis, with an error less to 0.5%, is coincident with the average value of a temporal rate coinciding with the last quarter of the signal wavelength for each trace in matrix A. The app was designed based on matrix algorithms and more particularly a thread block programming. Thus, it was possible to operate on submatrices (organized into blocks) of the initial matrix A, which allowed subtracting the average value of the last quarter of the wavelength.

$$\frac{\sum_{i=SAMPLES}^{i=\frac{3}{4}\cdot SAMPLES}\sum_{j=LT}^{j=1} A_{ij}}{SAMPLES\cdot LAST_TRACE/4} \quad (1)$$

Fig. 8 presents an example of application showing the elimination of this undesired DC component.

2.3.2. Signal amplification

GPR signals are rapidly attenuated as they propagate into the ground. Signals at greater depths have very low energy because of the signal attenuation and geometrical spreading. The amplification of the received signals compensates this attenuation. Two different filters were implemented for signal amplification: truncation filter and potential gain filter.

2.3.2.1. Truncation filter. It is a simple filter developed to limit the maximum values of the GPR signal. Thus, the signal is forced to fit between the maximum amplitude values registered. Thus, lower amplitude values will be increased and amplified. The truncation value is manually set by the user when applying the filter. This value indicates how to distribute the maximum values of the signal, from 0 to 100%. A truncation value of 0 means that the signal is completely removed, whereas a value of 100% means that the signal is totally preserved and the maximum values of the GPR signal are not limited. This filter is usually the most appropriate when dealing with a gray scale radargram. This is because this filter exaggerates the extremes of the amplitudes which is adequate for an accurate separation of black and white colors in the radargram. Fig. 9b shows an example of application of the truncation filter assuming a truncation value of 12.

2.3.2.2. Potential gain filter. When substituting the simple truncation transformation function by a simple power function: $y = x^{\beta}$, where β is a simple exponent that is required by the app when applying the filter. Its values go from 0 to ∞ and, by default, the app assumed a value of 1. If β = 0, the signal is canceled, while if β tends to ∞ the signal is amplified. The higher value of β depends on the computational power of the device.

In order not to rely on a function that varies with the sign, this function is modified to an equivalent one:

$$y = \mathrm{sgn}(x)\cdot|x|^{\beta} \quad (2)$$

This new function will be used to model the GPR signal in the app. By considering the negative power functions inferior to the unit, the most interesting regions of the signal spectrum could be improved. Thus, this filter allows amplifying the electromagnetic signal, but this filter is preferable when using a color spectrum radargram since the amplification is distributed in a wider range of colors. It is important to mention that this potential gain filter is similar to the lineal-exponential filters available in commercial software and commonly applied for

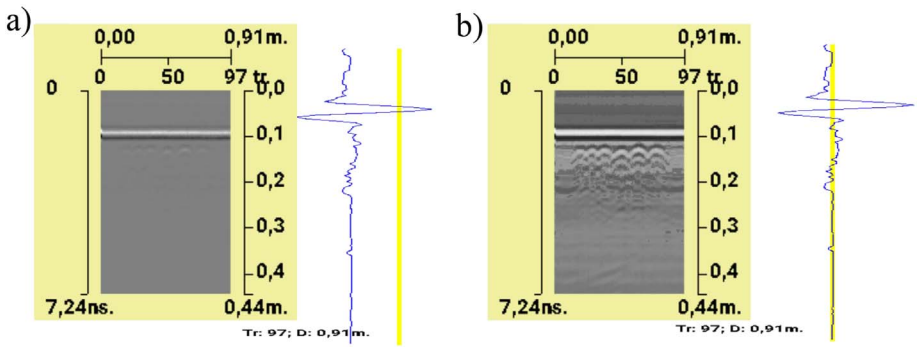


Fig. 8. Example of the DC component correction: (a) raw data and (b) radargram after filtering.

signal amplification. Fig. 9c shows an example of application of the potential gain filter using a gain value of 24.

2.3.3. Signal derivation

A vertical derivation filter was implemented to emphasize the amplitude values of the signal. More particularly, this filter allows analyzing signal amplitude variations in the z-axis, in particular in those points of change in curvature of the theoretical curve representing the signal. It is therefore focused on the vertical component "trace". For developing this filter, the initial matrix A_{ij} will be considered as a group j of vertical functions A_i. It will be also considered a vertical variable z, affected by a proportionality factor k that takes into account the wave amplitude, representing the signal and its direction. Thus, $z \equiv k \cdot i$. The value of the factor k is related to the radar-wave velocity in the host medium. However, in this work, it will only represent an adjustment factor, working as a vertical constraint parameter. The proportionality factor k is adjusted by the user when applying the filter and its value ranges from 0 to ∞. If k = 0 the amplitude is maintained in each direction and if k = 1 the proportionality between the z and x axes is not affected. While increasing the value of k, the signal amplitude will change in each direction.

When implementing the algorithm, the j functions A_i will become j functions A(z), and the new processed matrix will be:

$$D_{ij} = dA(z)/dz \tag{3}$$

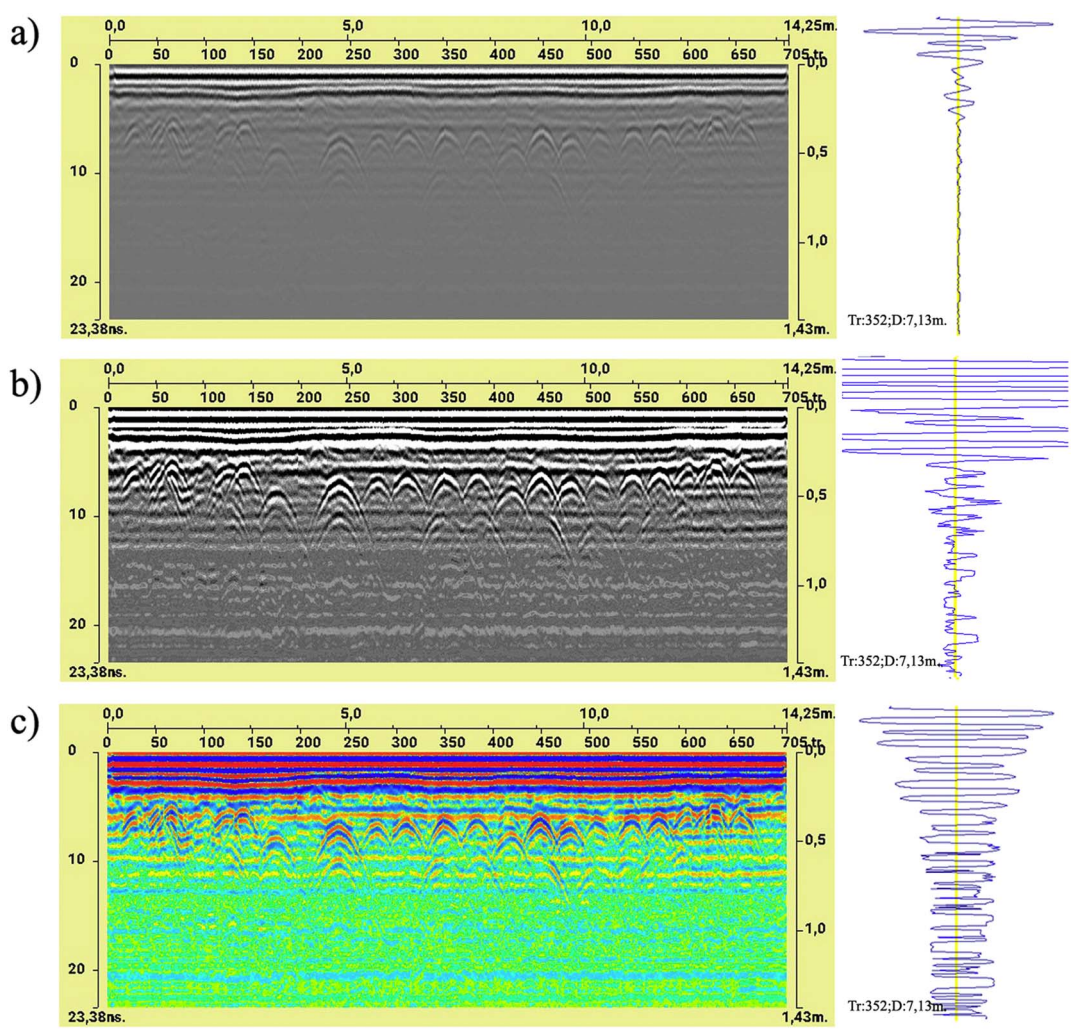


Fig. 9. Example of signal simplification: (a) raw data, (b) truncation (with a truncation value of 12), and (c) potential gain filter (with a gain value of 24).

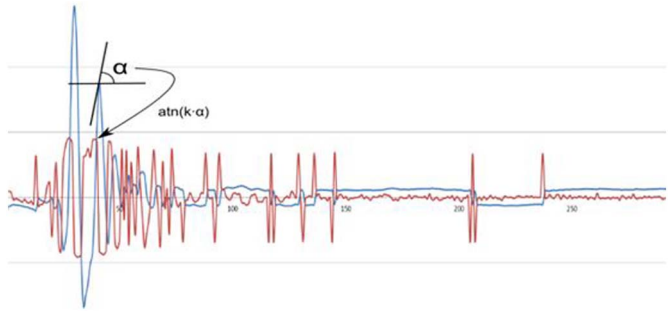


Fig. 10. Signal change due to its derivative: original raw data in blue and modified signal in red. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

By entering the proportionality factor previously defined, the mathematical expression becomes:

$$D_{ij} = [A(ki) - A(k(i-1))]/k \quad (4)$$

Some problems, such as the overflow of the algorithm, can occur with the computational range required for this processing due to the need of containing the extreme values of the function when it tends to ± ∞ in the derivative. To overcome such limitation, an equivalent simplified expression was adopted:

$$D_{ij} = \mathrm{atn}(dA(z)/dz) \quad (5)$$

The related operations are shown in an intuitive graphic example in Fig. 10.

Fig. 11 presents an example of application for the vertical derivation filtering.

2.3.4. Background removal filter

Some GPR signals have a lot of interferences (or noises), attached to the main signal or created during the filtering process, commonly produced by a bad coupling between the antenna and the medium. A background removal filter was therefore added to remove potential low-frequency noise which appears in form of continuous horizontal bands along the recorded traces or only in some parts of them. The filter has been designed implementing a successive approximation with finalization conditions algorithm (an iterative algorithm) that calculates the SMA (Single or Simple Moving Average) of the horizontal components (or "sample" elements of the binary file .rad) of matrix A [23–24]. Given a series of numbers (or points) and a fixed subset size, the first element of the moving average is obtained by taking the average of the initial fixed subset of the series. Then, the subset is modified by "shifting forward"; that is, excluding the first number (or point) of the series and including the next value in the subset. This iterative algorithm process calculation is illustrated in Fig. 12, in a graphical way, with points. Firstly, for Point P_2, it is computed the mid-point P_{2m}–between points P_1 and P_3. According to an approximation factor, P_2' will become the new derived value of P_2 and thus, for an approximation factor of 0, $P_2' = P_2$. In the same way, $P_2' = P_{2m}$ for an approximation factor of 1.

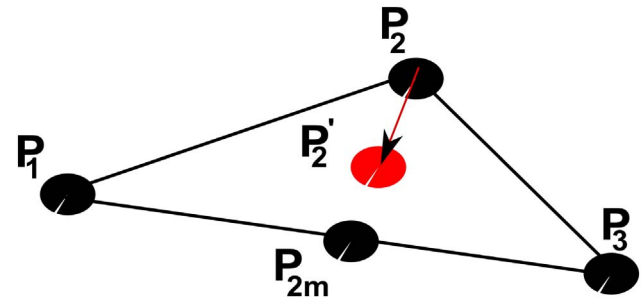


Fig. 12. Intuitive graphic representation of the SMA.

More details and examples of SMA calculation can be found in [25]. Fig. 13 shows an example of application of the background removal filter showing how flat-lying reflectors were removed emphasizing smaller reflections.

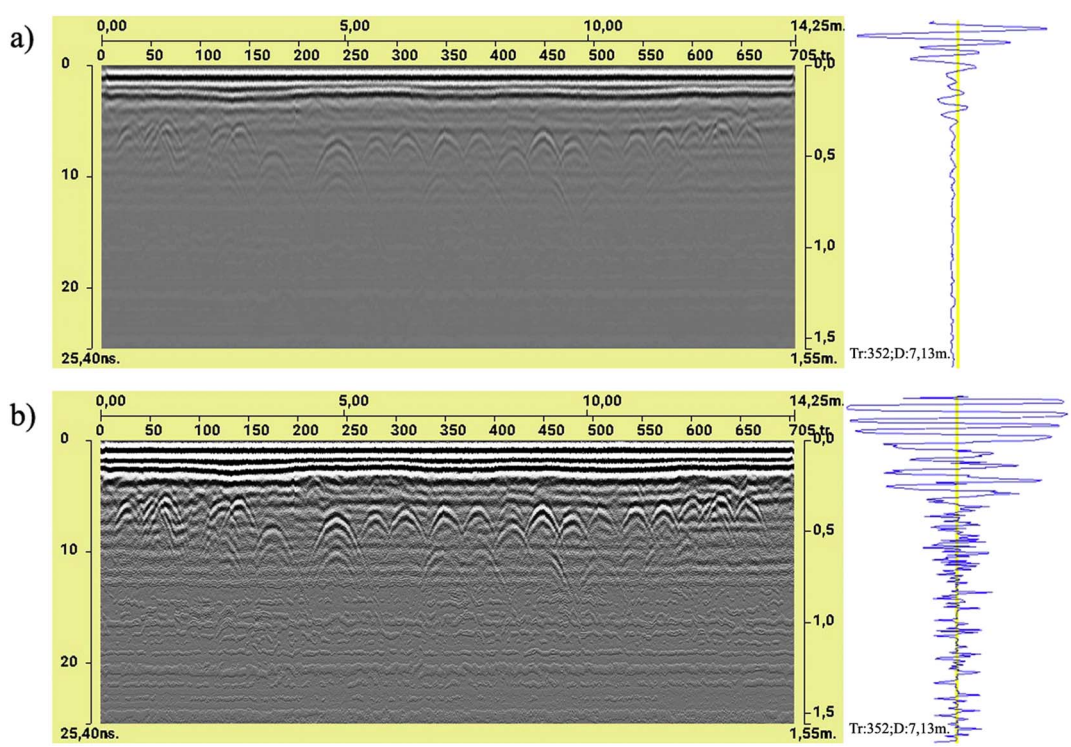


Fig. 11. Example of signal derivation: (a) raw data and (b) GPR signal after vertical derivation filtering. The parameter of proportionality, k, was set to 100.

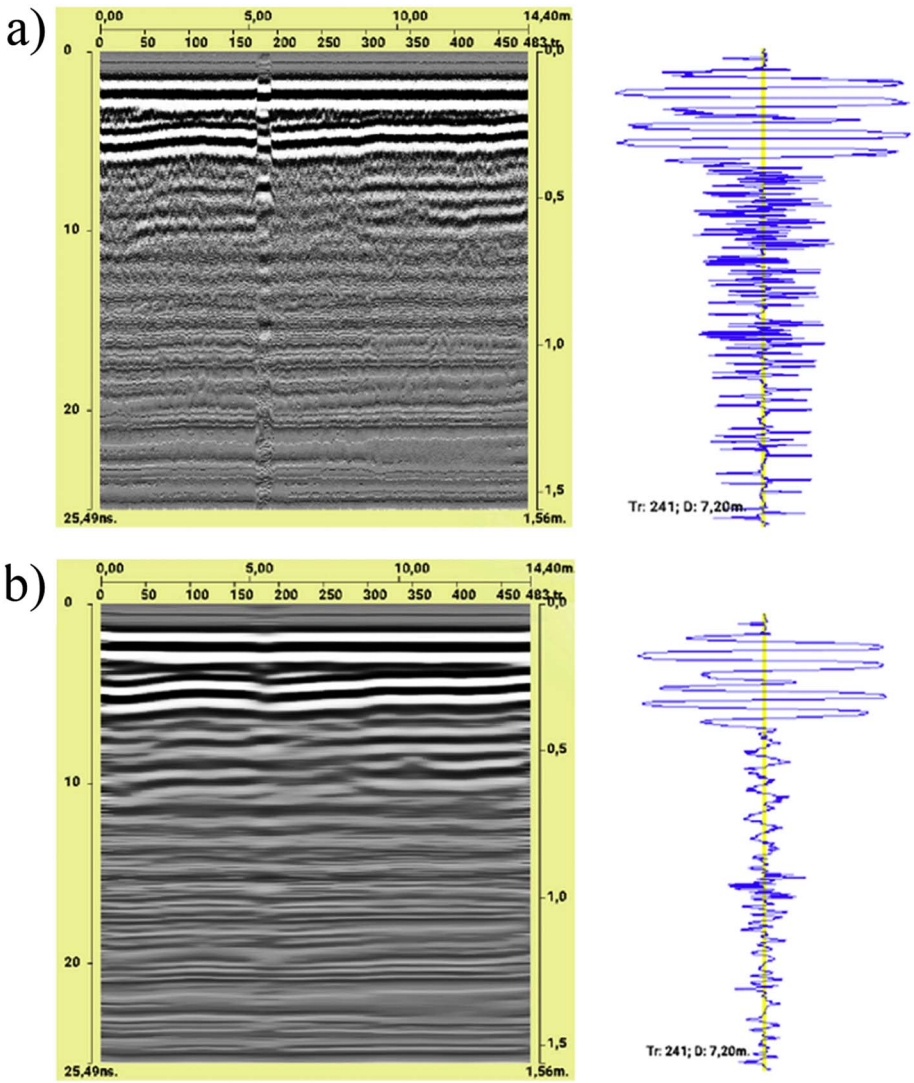


Fig. 13. Raw data (a) and processed radargram (b) after applying a background removal filter.

2.3.5. Frequency analysis

This filter is based on Fourier Transform. The Fourier Transform on a square wave (Fig. 14) shows that the frequency of the first term of the Transform is equivalent to the one of the first wave cycle. It can be obtained as the wavelength measured between two cuts with the abscissa, that is, between two consecutive valleys or crests of the sinusoidal function, as shown in Fig. 14.

With this simplification, it is possible to obtain the function dominant frequency (first harmonic) in the time domain (ω), from λ and the radar-wave velocity of propagation in the host medium (v), as $\omega = v/\lambda$. If the x-axis is considered as a temporal axis instead of a spatial one, as it happens in GPR signal, it is easy to obtain the period (T), deriving from: $\omega = 1/T$. When applying the filter, the user is required to introduce a dielectric constant value. The velocity of propagation is derived from Eq. (6).

$$\Delta twt = 2\,h/v \text{ and } v = c/\sqrt{\varepsilon} \tag{6}$$

where: Δtwt is the two-way travel-time distance (ns) between two different reflections or layers, h is the depth of penetration (m); v is the radar-wave propagation velocity in medium (m/ns), c is the speed of light in vacuum (0.3 m/ns) and ε is the dielectric constant of the medium.

Another way of obtaining T and ω, useful for smoothed GPR profiles, is based on looking for the same knee points of the function. It is

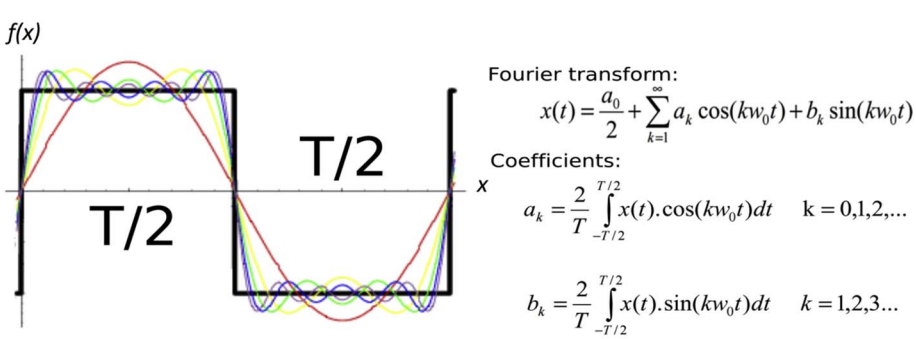


Fig. 14. Fourier Transform. Wavelength obtained between two valleys or crests in the sinusoidal function in terms of period (T).

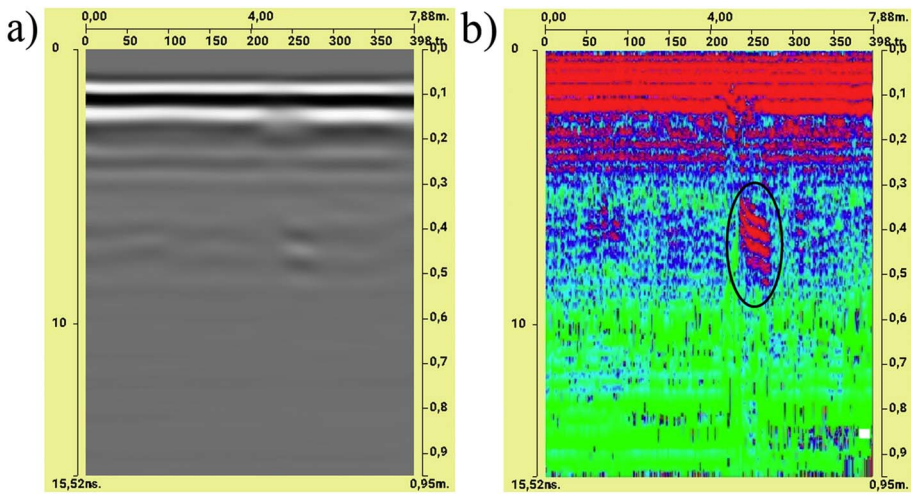


Fig. 15. 1 GHz data acquired through a natural bump in a road surface showing an anomaly (circled area) at the interface between the base and sub-base layers: (a) raw data and (b) radargram after applying a frequency analysis filtering.

computed as the second derivative of the amplified signal f″:

$$f'' \approx (f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x))/\Delta x^2 \quad (7)$$

Fig. 15 illustrates the GPR profile obtained (showing the wave's dominant frequency), in the longitudinal direction, over a section of an in-service road presenting a natural bump. Observing the radargram after applying the frequency analysis filter, an anomaly was identified from 240 to 280 m in the direction of data collection, which is extended from 5 to 9 ns in depth (circled area in Fig. 15b). This anomaly is certainly detectable because the bump in road surface provides a lower dominant frequency in data. It seems to indicate the existence of plastic deformation on the grading and the numbness of its materials, certainly because of water absorption.

Fig. 15 (b) also provides the colored radargram obtained after applying the frequency analysis filter, in a range of hues according to the color code explained in Fig. 5.

3. Applications and results

This section shows some examples of the processing and GPR signal analysis using this app, choosing the best filtering method in each case. Finally, a specific subsection devoted to output the results has been incorporated.

3.1. Case studies

Significant and real case studies on civil engineering and especially in construction have been included to demonstrate the interest and potential of GPR signal processing techniques to add more information during routine road inspections. In particular, those related with construction quality control and transport infrastructure monitoring: cracking and void detection, paving thicknesses, as well as diameter estimation of buried pipes and rebars. These examples have been used to validate the capabilities of this app. It should be mentioned that the position of the reflectors identified by the app is a relative position in the GPR profile line acquired. If absolute (UTM) coordinates are desired, a GPS must be connected to the control unit of the GPR system. Thus, each trace composing the matrix data is registered with its corresponding coordinates in a separated file, which could be easily accessed by the user once an interesting reflector and its corresponding trace position are identified.

3.1.1. Cracking and cavity detection

Fig. 16 presents the 1 GHz GPR data obtained on an in-service road presenting different typologies of cracks in surface, such as both longitudinal and transverse cracking, block cracking and alligator cracking. A MALÅ ProEx system was used and the survey parameters selected for data acquisition were 2 cm trace-intervals with a 15 ns total time window and 516 samples per trace.

When processing data, the derivation filter was useful because it allows users to visualize changes in the GPR frequency signal. Thus, it is possible to detect cracking in road surface thanks to the signal variations appearing at the same location where cracks are visible in surface. In this case, the signal derivation filter was significant to highlight cracking. However, when severe damages occur (as in the case of a cavity in Fig. 15), a frequency analysis filter is preferable.

In Fig. 16, the GPR data allowed the extraction of in-depth structural failure. A careful interpretation of these complex reflections demonstrated that some cracks (embedded cracks) come from the interface between the intermediate and base layers (at 2 ns), while the other cracks in the surface (sur cracks) arise from failure at the interface between the base and sub-base layers (at 4–6 ns). Then, the GPR provided the advantage for the detection of the origins of cracking in depth, as well as for the qualitative evaluation of the flaw: layers separation, leveling faults, etc.

3.1.2. Pavement thickness measurements

This app has been designed to approximately obtain direct thickness and depth measurements on the processed radargram. The position and range of depth to measure is manually selected by the user, indicating the two reflections between which to measure using the touch screen of the device. In order to assure more accurate results, it is necessary to know an approximate value of the dielectric constant of the host medium [22]. In addition, knowing the variable "time window" of the initial data registration, it is possible to compute the distance traveled by the GPR signal using the following expressions deduced from Eq. (6):

$$h = v \cdot \Delta twt/2 \rightarrow h = c \cdot \Delta twt/(2\sqrt{\varepsilon}) \quad (8)$$

The app assumes a default value of 6 for the dielectric constant, but the tool offers the possibility to manually introduce a different value if there are variations in media along the profile. Nevertheless, it should be considered that the same dielectric constant value will be applied to the entire profile.

Fig. 17 shows two examples of pavement thickness measurements. The first case study (a) belongs to an experimental zone composed of an asphaltic layer (AC 22 bin G asphalt) with thickness 10 cm. The data acquisition was carried out using a MALÅ ProEx system with a 2.3 GHz antenna, and the survey parameters were 3 cm trace-intervals with a total time window of 5 ns and 570 samples per trace. The second case study (b) corresponds with a section of an in-service road composed of two asphaltic layers, an intermediate course (AC bin 22 50/70 S) and a bituminous-treated base course (AC base 32 50/70 G), with thicknesses

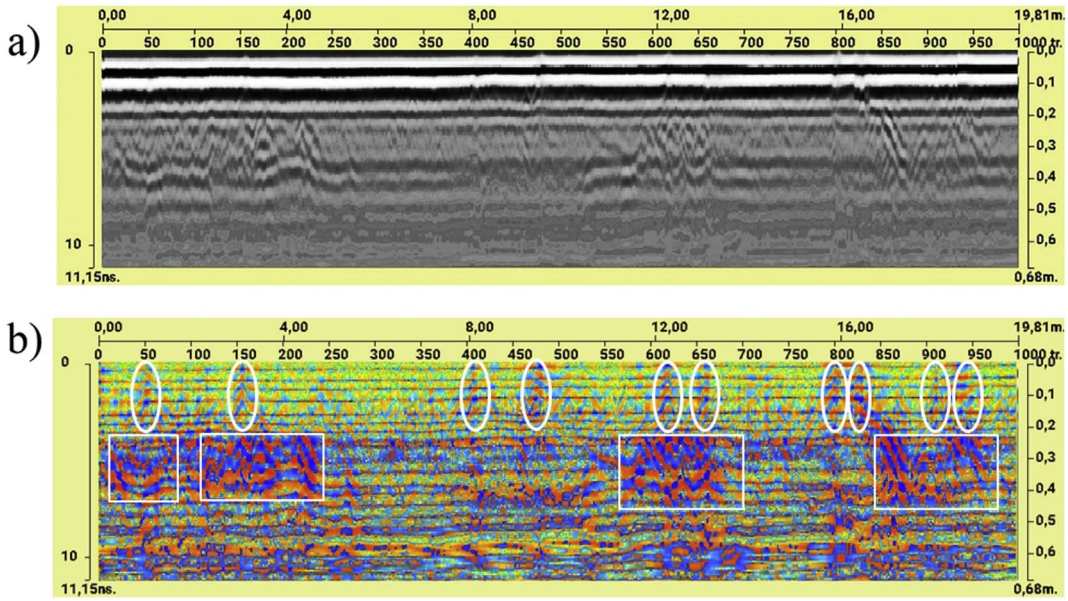


Fig. 16. Example of cracking detection: (a) 1 GHz GPR data before processing and (b) data after applying a signal derivation filter, highlighting different types of cracks: sur cracks with ellipses and embedded cracks with rectangles.

4 cm and 7 cm, respectively. The data acquisition in this latter was carried out with the same frequency antenna, but the survey parameters were 2 cm trace-intervals with a total time window of 15 ns and 344 samples per trace.

For thickness calculation, the velocities of propagation used in the app to define the asphaltic media were previously calibrated. Knowing the real thicknesses of the layer and the time distance traveled (Δtwt) through the medium, the velocity of propagation and dielectric constant values were directly derived from Eq. (6). An average dielectric constant of 6 was obtained for case (a), whereas this value resulted in 7 for case (b). Observing the images obtained from the app, different legends appeared at the bottom of the radargrams (highlighted into red squares), showing the measured thickness in meters.

The error of the algorithm developed for thickness measurements resulted in 10%. This value was empirically obtained after its application to different real cases using known thicknesses obtained from accurate core drill data.

3.1.3. Pipe and rebar diameter estimation

The estimation of underground pipes and reinforcing steel bars diameters have been previously studied [26–30], employing different techniques. In this app, the procedure has been simplified because of Android devices limitations, and more particularly those related to the use of the touch screen and its precision. It has been focused on searching approximately the maximum diameter of the detected objects, using an adjusting hyperbola. It is important to mention that the hyperbola detection procedure is not automatically achieved. The user must select the position of its vertex and then, to adjust the radio using the touch screen of the smartphone with the fingers to fit the hyperbola to the hyperbolic reflection produced by the object.

The tangent circumference at the hyperbola vertex has its first derivative (tangential) and second derivative (curvature) converging. This fact simplifies the problem, which will be focused on finding the largest radius tangent to the vertex and not intersecting more points. This condition requires that the center of the searched circle is precisely located in the focus of the hyperbola. This hyperbola is defined with the parameters “a” and “c”, as shown in Fig. 18. Its extreme values depend on the value of parameter ‘a’. The maximum value of ‘a’ gives the minimum focal length and, if “$a^2 - c^2 \rightarrow 0$”, the hyperbola becomes a parabola. The value of parameter ‘a’ that gives the hyperbolic extreme to search the minimum radius is shown in Fig. 18a. The process implemented in the app is based on successive approximations to the hyperbola. The diameter of the circumference will be successively increased while drawing its associated hyperbola, obtaining the

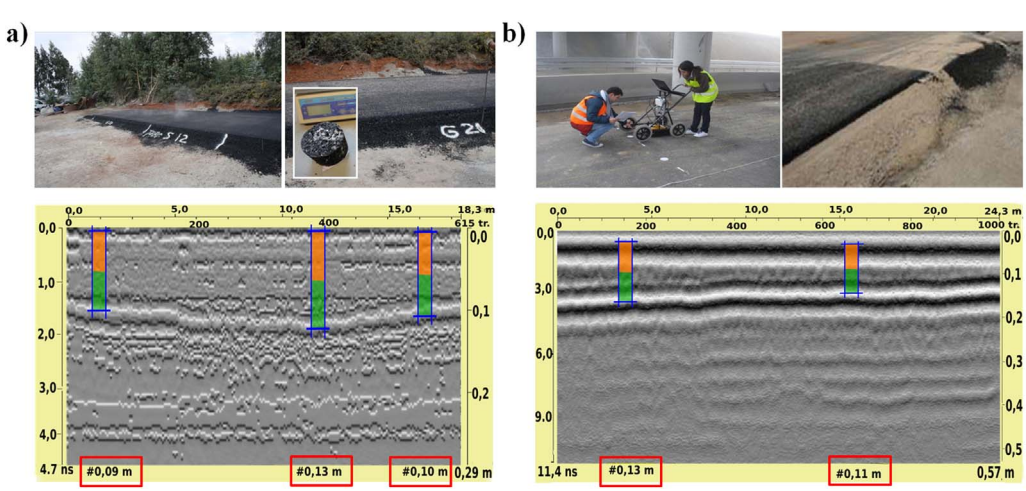


Fig. 17. Examples of thickness measurements in two different cases: (a) on an experimental area and (b) on an in-service road.

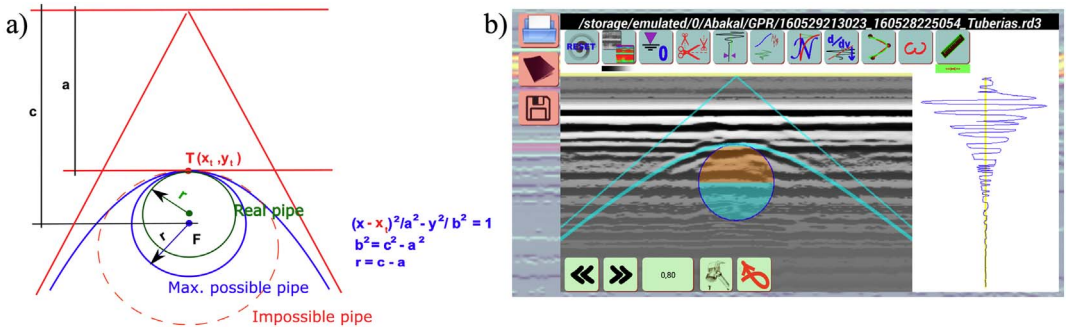


Fig. 18. Maximum circumference tangent to the vertex and non-secant to the concave side of a hyperbola: Eq. (a) and visualization in the app (b).

translational values (x_t, y_t) to fit the setting hyperbola in the part of the radargram where the presence of a buried pipe or steel bar has been intuited. This process will be finished when the hyperbola shape matches perfectly the hyperbolic reflection produced by the object (Fig. 18b).

It is important to notice that using this measurement procedure, the maximum diameters are obtained, greater than the real ones. Despite of being an approximation to real diameter values, it is useful for a comparative searching of buried objects, but unfortunately it has not enough accuracy (with an error of 10%) to obtain exact diameters. Nonetheless, this approximate procedure has been included in the app because of its speed and economized computing resources and because it gives the possibility of using the smartphone touch screen, achieving quick and reasonable measurement approximations (Fig. 19).

This procedure has been validated by locating and measuring some buried pipes in an experimental zone with several previously known pipes diameters (Fig. 20a). Fig. 20b presents the 2.3 GHz GPR data obtained using a MALÅ ProEx system, with the following survey parameters: 2 cm trace-intervals with a 15 ns total time window and 380 samples per trace. Moreover, this figure illustrates the diameters obtained with the app for the case of a polyurethane pipe of 200 mm-diameter and a concrete pipe of 500 mm-diameter, which demonstrates the accuracy of the app to provide such measurements.

3.2. Output results

The usefulness of previous filters is accompanied by exporting radargram results and profiles in the raster graphics file format .png, as seen in the previous case studies.

3.2.1. Reports and graphic data

This tool has also been implemented in the app, as shown in some of the radargrams included in this article.

3.2.2. Exportation files

Once the radargrams have been processed, files can be exported with a .gpr Malå extension (.rad and .rd3 formats) and transferred to any computer device. The app adds the last-modified date header in the file name, in order to remind users of the last modifications applied.

4. Conclusions

This work presents a free and didactic Android-based software that allows users an easier GPR signal processing. This app aims to be an easy-to-use tool for a preliminary GPR signal processing that let users to obtain a quick and simple analysis of the area of study using their smartphones and tablets. The developed app is mainly focused on the analysis of the GPR signal applied to the inspection of road infrastructure.

Firstly, it is important to mention the limited computational capacity and memory size in smartphones or tablets. The implemented filters were simplified to save memory and computing power in those devices, without a loss of their effectiveness. In addition, some of the included filters were designed to reduce the length of the original raw data files into smaller portions, which allowed improving their analysis while saving memory and computational time. Other key aspect to take into account refers to the screen dimensions of these devices. To solve this limitation, the developed pre-filtering tools can be easily adapted to the touch screen functions (by touching the screen with the fingers to zoom it, moving images, etc.).

Regarding the signal processing filters, the app provides some generic and basic filters (DC component correction, gain, signal derivation, background removal and frequency analysis). The results

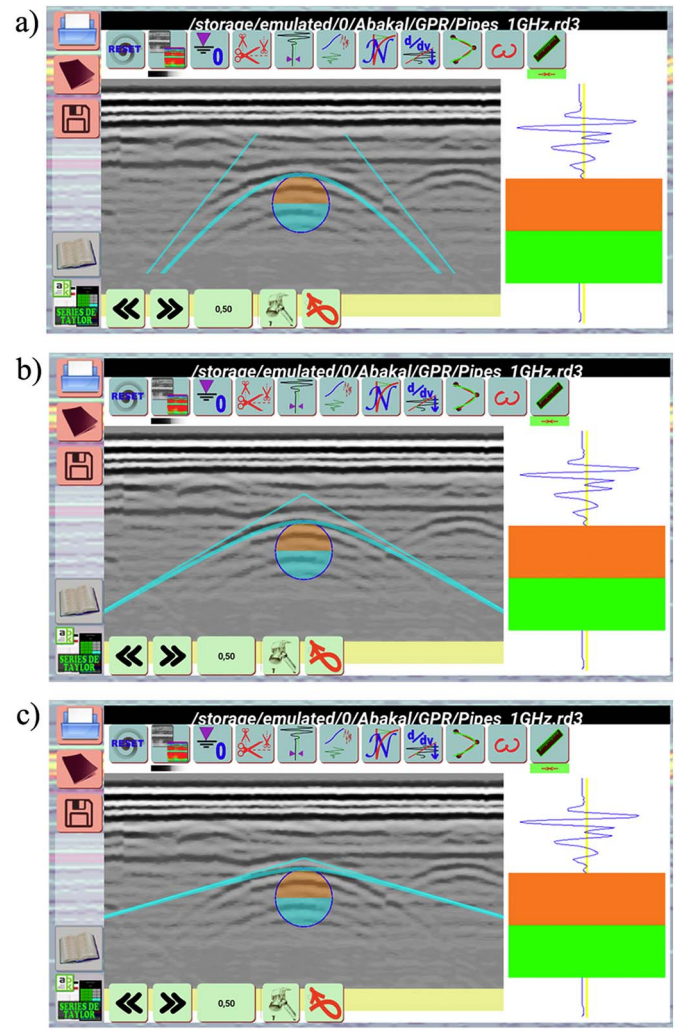


Fig. 19. Example of diameter measurements and hyperbola fit procedure.

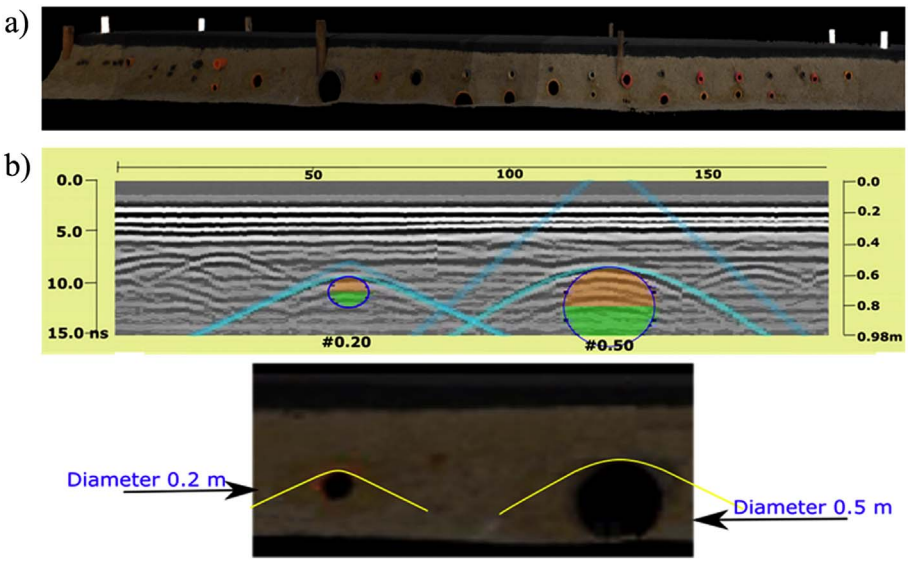


Fig. 20. 2.3 GHz data acquired over two pipes of 200 and 500 mm-diameter and measurement approximations with the app.

obtained have shown good appropriateness, demonstrating that is possible to program in Android without managing complex and expensive commercial software. It was possible to provide the dimensions of buried facilities, such as pipes and reinforced bars diameters, as well as to measure pavement thicknesses. What is more, some filters (signal derivation and frequency analysis) were implemented to easily distinguish damage areas affected by cracking or cavity detection. Thus, the app is shown as a simple and quick tool to be handled by any non-experience agent, contributing for more efficient road inspections while reducing management and maintenance costs. Finally, the results obtained within the app can be exported graphically (in .png format) and numerically (in .rad and .rd3 formats), thereby facilitating their external analysis in more detail.

Further improvements would be focused on extending the app to process GPR raw data from other commercial systems (such as the RADAN.dzt from GSSI Company or the IDS.dat from IDS Company), while the change of taking advantage of GPU instead of multithreading program execution model. More advance processing is also expected in future works by considering sophisticated filters such as pass-band filtering, migration and deconvolution. Moreover, the implementation of additional algorithms such as Hough transform or neural networks would be interesting for the automated detection of specific reflection patterns, including the ones produced by layers (continuous flat reflections) or pipes (hyperbolic reflections).

Acknowledgments

The authors wish to acknowledge the companies Extraco, S.A., Misturas, S.A. and Abakal Ingenieros S.L. for all the help that made this research possible. Additionally, this study is a contribution to the EU funded COST Action TU1208, “Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar”.

References

[1] T. Saarenketo, T. Scullion, Road evaluation with ground penetrating radar, J. Appl. Geophys. 43 (2–4) (2000) 119–138, http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X.

[2] K. Maser, J. Puccinelli, J.K. Amestoy, Accuracy of ground penetrating radar asphalt thickness data and its impact on pavement rehabilitation design, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, USA, 2012 Retrieved from: https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.es/&httpsredir=1&article=1089&context=ktc_researchreports.

[3] B.W. Rister, R.C. Graves, Investigation of the Extended Use of Ground Penetrating Radar (GPR) for Measuring In-situ Material Quality Characteristics, Kenctucky Transportation Centre, College of Engineering, University of Kentucky, USA, 2008.

[4] M. Solla, S. Lagüela, H. González-Jorge, P. Arias, Approach to Identify Cracking in Asphalt Pavement Using GPR and Infrared Thermographic Methods: Preliminary Findings, 62 NDT & E International, 2014, pp. 55–65, http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.11.006.

[5] A.M. Alani, M. Aboutalevi, G. Kilic, Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment, J. Appl. Geophys. 97 (2013) 45–54, http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.04.009.

[6] I. Puente, M. Solla, H. González-Jorge, P. Arias, NDT documentation and evaluation of the roman bridge of Lugo using GPR and mobile and static LiDAR, J. Perform. Constr. Facil. 29 (1) (2015), http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000531.

[7] F.J. Prego, M. Solla, X. Núñez-Nieto, P. Arias, Assessing the applicability of ground penetrating radar to quality control in tunneling construction, J. Constr. Eng. Manag. 142 (5) (2016), http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001095.

[8] A. Benedetto, L. Pajewski, Civil engineering applications of ground penetrating radar, Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering, 2015, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0A.

[9] B. Riveiro, M. Solla, Non Destructive Technologies for the Evaluation of Structures and Infrastructures, CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, UK, 2016, http://dx.doi.org/10.1201/b19024.

[10] A. Benedetto, F. Tosti, GPR spectral analysis for clay content evaluation by the frequency shift method, J. Appl. Geophys. 97 (2013) 87–96, http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.012.

[11] A. Benedetto, F. Benedetto, Remote sensing of soil moisture content by GPR signal processing in the frequency domain, IEEE Sensors J. 11 (10) (2011) 2432–2441, http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2011.2119478.

[12] K.J. Sandmeier, ReflexW manual v.4.5, http://www.sandmeiergeo.de, (2007) , Accessed date: October 2014.

[13] RAMAC Groundvision, Software manual v.1.3, http://www.malags.com , Accessed date: July 2016.

[14] M. Varela-González, M. Solla, J. Martínez-Sánchez, P. Arias, A semi-automatic processing and visualisation tool for ground-penetrating radar pavement thickness data, Autom. Constr. 45((2014) 42–49, http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.004.

[15] F. Benedetto, A. Benedetto, A. Tedeschi, A mobile Android application for road and pavement inspection by GPR data processing, 15th International Conference on Ground Penetrating Radar-GPR, 2014, pp. 842–846, , http://dx.doi.org/10.1109/icgpr.2014.6970546.

[16] R. Meier, Professional Android 4 Application Development, (May 2012), pp. 16–18 (ISBN-10:1118102274.

[17] http://carreteras-laser-escaner.blogspot.com.es/ by Nieto Matarranz, L.A. Provided by Abakal Ingenieros. Accessed on July, 2016.

[18] http://opengpr.sourceforge.net/old/OpenGPR “An open source georadar framework”. Accessed on September, 2016

[19] http://gpr-idl-tools.sourceforge.net/ “Ground-Penetrating Radar (GPR) Interactive Data Language (IDL). Software Tools”, by John Maurer. Accessed on October, 2016

[20] http://www.geoscanners.es/freeware.htm “Software and Freeware. GPRSim.net and GPRSoft Viewer”, by Geoscanners, Geophysical Survey Solutions. Accessed on October, 2016

[21] http://www.elandroidelibre.com/2014/02/aprende-android-en-20-conceptos-empezando-a-programar-para-android by Zamora, J.A. in “El androidelibre.com”, 2014. Accessed on September, 2016

[22] J. Davis, Y. Huang, S.G. Millard, J.H. Bungey, Determination of dielectric properties of insitu concrete at radar frequencies, Proc., Non-Destructive Testing in Civil Engineering, BAM (The BAM, Federal Institute for Materials Research and Testing), Berlin, 2003Retrieved from: http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v078/

v078.htm.
[23] Y. Chou, Statistical Analysis, Holt International, 1975 (ISBN 0-03-089422-0). (Section 17.9).
[24] NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: EWMA Control Charts at the National Institute of Standards and Technology. (http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section4/pmc431.htm). Accessed on November, 2017.
[25] J. Devcic. "Weighted Moving Averages: The Basics". Investopedia (http://www.investopedia.com/articles/technical/060401.asp). Accessed on November, 2017.
[26] L. Mertens, R. Persico, L. Matera, S. Lambot, Automated detection of reflection hyperbolas in complex GPR images with no *a priori* knowledge on the medium, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 54 (1) (2016), http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2015.2462727.
[27] C.G. Windsor, L. Capineri, P. Falorni, The estimation of buried pipe diameters by generalized Hough Transform of radar data, Prog. Electromagn. Res. Symp. 1 (3) (2005) 345–349, http://dx.doi.org/10.2529/PIERS041117130829.
[28] D.J. Daniels, Surface penetrating radar for industrial and security applications, Microw. J. (1994) 68–82 Retrieved from: http://www.microwavejournal.com.
[29] E. Xu, E. Oja, P. Kultanen, A New Curve Detection Method: Randomized Hough Tranform (RHT), Pattern Recogn. Lett. 11 (5) (1990) 331–338, http://dx.doi.org/10.1016/0167-8655(90)90042-Z.
[30] C.G. Windsor, L. Capineri, Automated object positioning from ground penetrating radar images, INSIGHT, J. Br. Inst. Non-Destr. Test. 40 (7) (1998) 482–488 Retrieved from: http://www.bindt.org.

Capítulo 6

Discusión general

6.1. Antecedentes y organización del Capítulo

Como ya se ha indicado en capítulos precedentes, en un escenario de escasez económica como el actual, en el que las partidas presupuestarias para la construcción de nuevas infraestructuras del transporte son muy limitadas, resulta prioritario contar con herramientas de análisis útiles y fiables, que determinen su estado de conservación. Estas herramientas ayudarán a planificar los trabajos de mantenimiento que requieran en el futuro, priorizando las inversiones necesarias para este fin. Como se ha visto, las técnicas de inspección no destructiva (*Non Destructive Techniques,* NDT) aportan información relevante sobre el estado de las infraestructuras y obras de ingeniería civil relacionadas, tanto durante su proceso de construcción como a lo largo de su vida útil en servicio. Entre estas técnicas de inspección destaca, por su potencial de aplicación, el Radar de Subsuelo o Georradar (*Ground Penetrating Radar,* GPR), especialmente útil a la hora de conocer detalles no visibles relativos a la calidad de la obra, ubicación de elementos constructivo-estructurales y presencia de patologías relacionadas con estas infraestructuras, entre otros aspectos de interés para una correcta ejecución de las obras y su futura conservación.

Teniendo en cuenta la poca difusión que la técnica GPR tiene a día de hoy en las empresas constructoras en nuestro país, esta tesis ha probado su viabilidad de aplicación en el ámbito de la construcción de obras de ingeniería civil e infraestructuras del transporte, en aspectos que hasta ahora habían sido poco o nada estudiados, fomentando además su conocimiento y uso en el sector, tradicionalmente muy inmovilista y poco innovador.

En este Capítulo 6 se exponen y discuten los principales resultados que se han obtenido en el trabajo de investigación que constituye la presente tesis. Se divide en cinco apartados, siguiendo el esquema organizativo de la disertación.

6.2. Discusión del Estado del Arte

En el Apartado 1.2 del Capítulo 1 se ha abordado una revisión general del empleo de las técnicas de inspección GPR en el ámbito de la ingeniería civil e infraestructuras del transporte, a modo de Estado del Arte. Se inicia con una breve introducción histórica, referida a los diferentes desarrollos y descubrimientos científicos que dieron lugar a la aparición y perfeccionamiento de las técnicas radar, desde finales del siglo XIX (aportaciones de Maxwell, Hertz, Marconi y Tesla), pasando por el gran impulso alcanzado durante la Segunda Guerra Mundial, como arma para la localización del enemigo (aportaciones de Sir Robert Alexander Wattson-Watt), hasta los años 70 del siglo XX, en que se refieren los primeros usos específicos del radar de penetración terrestre en el mundo civil: concretamente, aplicándolos al campo de la glaciología y de los estudios lunares (Campbell et al., 1974; Annan et al., 1976).

En el Estado del Arte se recoge además, de manera general, una recopilación significativa de trabajos y referencias científicas relativas al empleo y utilidad del GPR en el ámbito concreto de la ingeniería civil e infraestructuras del transporte, en diferentes aplicaciones desde los años 70 y 80 del siglo XX hasta la actualidad (Benedetto et al., 2015).

En primer lugar, se presentan evidencias publicadas sobre su viabilidad de uso en la evaluación de espesores de capas de firmes y pavimentos en carreteras: este es uno de los ámbitos en los que la técnica GPR ha tenido una mayor aplicación en el campo de la ingeniería civil (Saarenketo et al., 2000; Maser et al., 2012). Se abre además el camino a nuevos estudios para su empleo sistemático en la localización y análisis de las patologías más habituales en estas unidades de obra, de manera conjunta con otras técnicas de inspección no destructivas, a fin de abordar de una manera integral y novedosa la evaluación del estado de conservación de los firmes y pavimentos (Solla et al., 2014).

El Estado del Arte hace también un repaso al potencial del GPR como herramienta de prospección para la localización de conducciones y servicios enterrados (Bonomo et al., 2011), presentes habitualmente en las zonas de intervención en las que se acomete la construcción de una infraestructura del transporte. El GPR permite constatar su ubicación y conocer sus características básicas (Sagnar et al., 2016). La gran complejidad de estas redes, especialmente en zonas urbanas, hace necesario desarrollar nuevos protocolos de actuación que permitan mejorar su fiabilidad y exactitud. Con ello se pretenden afrontar casos de solapamiento e interferencias de las señales electromagnéticas cuando hay gran profusión de conducciones que, entre otros inconvenientes, acaban por empobrecer el resultado final de las prospecciones y dificultan su posterior interpretación.

El tercer aspecto que se ha tratado en el Estado del Arte se refiere al empleo y viabilidad de uso del GPR en el estudio de los túneles, una de las infraestructuras del transporte de mayor complejidad y que más medios técnicos y recursos económicos requieren para su ejecución. Su potencial de utilización en el análisis de su estado se ha probado con éxito (Saricicek, 2014), tanto en túneles de carreteras (Lei et al., 2013) como en túneles de ferrocarril (Parkinson, 2008), desvelando, entre otros aspectos, la presencia de detalles constructivos ocultos y de patologías asociadas a su construcción. Sin embargo, se ha constatado que el GPR apenas se ha empleado en sus fases tempranas de construcción: es un campo de aplicación práctica muy novedosa, en el que el GPR podría aportar información muy útil relacionada con la calidad de la obra y con la ubicación y el estado de los elementos de sustentación empleados en la excavación, desde el momento mismo en el que se acomete la ejecución de la obra. Esto permitiría la detección precoz de fallos constructivos y de patologías ocultas, acometiendo su subsanación de una forma más eficiente, económica y segura.

El Estado del Arte finaliza presentando una panorámica general de las técnicas de procesado y *software* de aplicación necesarios para tratar la señal electromagnética recibida e interpretarla correctamente, a fin de extraer información útil que permita conocer el estado real de las infraestructuras prospectadas. Se citan los principales *softwares* comerciales existentes en el mercado a día de hoy, especialmente diseñados para procesar, filtrar y depurar la señal GPR, eliminando interferencias indeseables y buscando patrones de comportamiento de la señal que aporten indicios fiables sobre los elementos ocultos. Se destaca sobre los demás el programa *ReflexW* (Sandmeier, 2007): posee paquetes de *software* específicos para obtener radargramas 2D y representaciones de volúmenes 3D del espacio subterráneo prospectado, facilitando la interpretación de los resultados, su fiabilidad y exactitud. A pesar del gran desarrollo experimentado en los *softwares* de procesado de la señal en los últimos veinte años, no existen apenas programas gratuitos que permitan el tratamiento y filtrado simplificado de la señal en dispositivos *smartphone* y *tablets* (Benedetto et al., 2014). El desarrollo de *apps* específicas para este cometido contribuiría enormemente a la popularización y reconocimiento de las prestaciones que el GPR ofrece al mundo de la obra civil, favoreciendo la incorporación de esta técnica a la denominada “Revolución Industrial 4.0”. Una *app* de este tipo es, precisamente, la aportación que se incluye en el Capítulo 5 de esta tesis.

En resumen, el Estado del Arte ha aportado a esta disertación una panorámica general del uso del GPR en el campo del análisis de las infraestructuras del transporte y de las obras de ingeniería civil, contextualizando y comentando su potencialidad y viabilidad de uso. Se han indicado también nuevos ámbitos de aplicación en este campo, en los que la técnica GPR podría aportar información

de interés y relevancia, a la hora de monitorizar su estado, tanto durante la ejecución de las diferentes fases de construcción como a lo largo de su vida útil. Es en estos ámbitos de aplicación en los que la presente tesis pretende aportar nuevas contribuciones, que ayuden además a la extensión y popularización de la técnica GPR.

6.3. Discusión de la aplicación del GPR en la localización y análisis de patologías de firmes en infraestructuras del transporte

Como ya se ha indicado, los firmes y pavimentos constituyen una de las unidades de obra más importantes en el diseño de infraestructuras lineales del transporte: recogen y transmiten las cargas móviles de los vehículos que transitan por ellas a las estructuras y/o al terreno sobre las que se asientan, garantizando la estabilidad del conjunto y su vialidad con las máximas garantías de seguridad y confort para los usuarios. Por este motivo, en el diseño de los firmes de las vías de comunicación es especialmente importante seleccionar los espesores de las capas en función de la intensidad del tráfico prevista en servicio y, por tanto, de las cargas a las que teóricamente se verá sometida. Como ya se ha señalado en apartados previos, las técnicas de inspección GPR se han aplicado previamente en carreteras, principalmente en el control de los espesores de las capas de pavimentos y firmes. Pero el GPR presenta también un gran potencial para aportar información relativa a las patologías no visibles que afectan a su vida útil: si los controles de macrotextura y microtextura superficial de las capas de rodadura son fundamentales para garantizar la adherencia rueda-pavimento y mejorar la seguridad vial, la detección precoz de cárcavas, grietas y subsidencias no visibles en el interior de las capas de firmes de una carretera, supone una mejora sustancial en la prevención de accidentes y en la preservación de su estado de conservación (Solla et al., 2014).

6.3.1. Aplicación conjunta de las técnicas GPR, IRT y TLS para la detección integral de daños en pavimentos

6.3.1.1. Introducción al caso de estudio

El objetivo de esta contribución, expuesta en el Capítulo 2, fue comprobar el potencial y la viabilidad de uso de la técnica GPR como herramienta precisa para extraer información objetiva del estado de los firmes de carreteras, que permita evaluar su estado de conservación, más allá de una mera estimación de los espesores de sus capas. Este estudio pone su atención en la detección de defectos internos y externos en los pavimentos, por la incidencia significativa que tienen en su mantenimiento y en la seguridad de los usuarios.

Las mediciones *in situ* realizadas han permitido obtener información relevante sobre la presencia de patologías asociadas a estas unidades de obra: entre otros aspectos, su tamaño y profundidad, a fin de estimar la severidad de los daños observados. Se presenta además una novedosa metodología de inspección integral de los firmes, basada en el empleo conjunto de tres técnicas no destructivas: el GPR para la detección de patologías en las diferentes capas de los pavimentos (grietas y fisuras en la rodadura; cavidades y subsidencias en las capas inferiores); la termografía infrarroja (*Infrared Termography,* IRT) para evaluar el estado de las capas más superficiales (hasta 2-5 cm de profundidad); por último, el láser escáner terrestre (*Terrestrial Laser Scanner,* TLS) para la obtención de levantamientos fotogramétricos en 3D de la superficie del área de estudio, aportando información sobre su geometría y sobre la existencia de patologías superficiales en rodaduras. El empleo conjunto de las tres técnicas ha demostrado ser un método adecuado para la obtención de información objetiva de cara a la evaluación integral del estado de firmes y pavimentos, con el fin de conocer su estado de conservación y tomar las medidas oportunas para su futura reparación.

Para su demostración práctica se eligió como área de estudio una explanada portuaria pavimentada, de 27,5 m de largo y 7 m de ancho, constituida por materiales de relleno todo-uno, heterogéneos y compactados en tongadas de 0,5 a 1 m de espesor empleando procedimientos convencionales (rodillos) en los años 30 y 40 del siglo XX. Su acabado superficial es un adoquinado tradicional formado por bloques de granito paralelepipédicos provistos de morteros en las juntas, sobre el que se fueron colocando capas bituminosas a modo de reparaciones a lo largo del tiempo, para mejorar la rodadura al paso de los vehículos. En la actualidad presenta una pavimentación muy deficiente, con evidencias de subsidencias y hundimientos parciales, en la que conviven parches de mezclas bituminosas con adoquines a la vista, que dificultan el tránsito de vehículos por la zona.

6.3.1.2. Procedimiento empleado y discusión de resultados

En lo que se refiere al GPR, se acometió el análisis de la zona de estudio con un equipo *RAMAC* dotado de dos antenas, de 800 y 500 MHz respectivamente, colocadas sobre un odómetro, realizando una prospección en cuadrícula, con metodología de adquisición "*common offset*". El procesado de la señal bruta se realizó con el software *ReflexW* 2D, exportándolo a un módulo para interpretación 3D, creando un cubo que permitió la extracción de cortes horizontales XY "*time slices*" a distintas profundidades, que mejoran significativamente la correlación espacial entre las capas de firmes y las patologías halladas en profundidad. Dada la gran heterogeneidad de los materiales del relleno, la velocidad de propagación de las ondas

electromagnéticas se calibró *in situ* en diferentes zonas del área de estudio, transformando sus tiempos de viaje a profundidades.

Los trabajos de prospección han puesto de manifiesto la importancia de la selección de las frecuencias de las antenas a la hora de estudiar las patologías de los pavimentos: el empleo combinado de dos antenas de diferentes frecuencias permite obtener resultados más amplios de su estado, tanto en capas superficiales como en capas más profundas. Así, se constató que la antena de 500 MHz posee mayor longitud de onda y mayor capacidad de penetración en el terreno, pero a cambio aporta una mala resolución en los radargramas obtenidos. Por su parte, la antena de 800 MHz posee una menor longitud de onda, combinando poco poder de penetración en el pavimento con una mejor resolución en el radargrama resultante. Las mediciones *in situ* demuestran que la capacidad de penetración de las ondas electromagnéticas es muy variable, dependiendo en gran medida de las propiedades del suelo en cada caso: de ahí el interés de combinar varias antenas para un análisis adecuado del estado de firmes y pavimentos, a la hora de localizar patologías internas.

Los radargramas obtenidos muestran anomalías debidas a la presencia de aire en huecos, grietas y oquedades dentro de las capas analizadas, con un valor de la constante dieléctrica del medio menor que el de las zonas vecinas. El empleo de la antena de 800 MHz permitió diferenciar reflexiones menos profundas (asociadas a la capa superficial del firme y a los adoquines), que no se apreciarían empleando sólo la antena de 500 MHz, pues su menor resolución provoca el solapamiento de las reflexiones en las capas más superficiales. La antena de 500 MHz presenta un mayor poder de penetración, necesario para la localización de las anomalías más profundas. Se aprecia, además, la atenuación de la señal en profundidades superiores a los 32 ns, probablemente por el incremento de salinidad del medio, afectado por intrusiones marinas que provocan variaciones en la constante dieléctrica a partir de ciertas profundidades del relleno.

En lo que se refiere al uso de la termografía infrarroja, se recurrió a una cámara termográfica NEC TH92 60, con sensores de 640 x 480 UFPA (*Uncooled Focal Plane Array*), realizando la inspección con un operador humano para concentrar la atención del estudio en los detalles constructivos más importantes. Con la división de la explanada en una cuadrícula, con paralajes entre filas y columnas de imágenes termográficas consecutivas del 50%, fue posible obtener un mosaico termográfico completo de la zona, adecuado para la búsqueda de anomalías térmicas que, de otro modo, no serían localizadas. La técnica termográfica constata el incremento de temperaturas en las zonas en las que se localizan las grietas más profundas, o en las partes del firme con mayores pérdidas de morteros en el rejuntado de los adoquines. Este fenómeno se debe al incremento de la temperatura del aire

ocluido en dichos defectos, que de esta manera se pueden localizar más fácilmente.

En cuanto al empleo del láser escáner terrestre como técnica de inspección complementaria, se usó un equipo *Faro Focus X330*. Las fotografías que completan el levantamiento se realizaron con una cámara fotográfica de 8Mp, integrada en el propio láser escáner terrestre. Se realizaron 7 posicionamientos, con el fin de evitar las omisiones en la adquisición de datos que podrían derivarse de la presencia de múltiples baches y grietas en superficie, que actúan como obstáculos para el láser. Con el empleo de esta técnica fue posible obtener un registro geométrico de la zona previamente analizada con GPR e IRT, útil para la localización de puntos de referencia comunes en la superficie de los firmes y para la generación de una ortoimagen conjunta, necesaria para la caracterización integrada de las patologías analizadas con las tres técnicas.

Los radargramas con difracciones múltiples indican la existencia de espacios vacíos dentro del relleno, causantes de las subsidencias y hundimientos parciales que acaban por afectar a la estructura interna del paquete de firmes, hasta una profundidad de 1-1,2 m. Las zonas de desplazamiento de los bloques de adoquín por pérdidas de relleno en las juntas también se distinguen con claridad en los radargramas, por la presencia de series de difracciones múltiples en esa zona de análisis. La aplicación e interpretación conjunta de las tres técnicas ha permitido relacionar las patologías localizadas en los radargramas con las anomalías termográficas detectadas en la misma posición o zonas aledañas, que han sido exactamente ubicadas con el láser escáner terrestre, el cuál aportó también, en algún caso, señales de su existencia en superficie. El estudio GPR indica también la existencia de anomalías asociadas a la presencia de un sumidero en la explanada en la que se asienta el firme (a 2 m de profundidad), localizado también en las inspecciones termográficas. Esta estructura no se localiza con el TLS, lo que demuestra que el empleo e interpretación conjunta de los diferentes sensores puede resultar de interés para el desarrollo de planes de mantenimiento eficientes a partir del estado real de las infraestructuras analizadas. Y, especialmente, cuando se detecta la existencia de una patología que podría conducir al colapso de la infraestructura ante determinadas cargas de tráfico, aun cuando no se aprecien señales aparentes de daños estructurales en la superficie del firme.

En definitiva, el Capítulo 2 ha demostrado la idoneidad de la combinación de las tres técnicas para una inspección más eficiente del estado de los pavimentos, con la localización de patologías y defectos internos que pueden poner en peligro su integridad. Son técnicas complementarias: el GPR aporta su capacidad para adquirir información del interior de la infraestructura (a una profundidad que dependerá de la frecuencia empleada); el IRT aporta información sobre anomalías superficiales y subsuperficiales, basadas en la

huella térmica, no detectables en inspecciones visuales convencionales; el TLS complementa la inspección con el reconocimiento y medición geométrica de las distintas patologías que han sido detectadas con las otras dos técnicas. La combinación de los tres métodos ha permitido desarrollar nuevos protocolos de actuación para una interpretación integral del estado de los pavimentos, revelando información de interés previamente desconocida y difícilmente alcanzable a menos que se recurra a técnicas invasivas de tipo destructivo: extracción de probetas testigo, realización de catas en profundidad, etc. Una interpretación aislada de los datos facilitados por cada una de las técnicas estudiadas podría conducir a errores en la localización y evaluación de estas patologías.

6.4. Discusión de la aplicación y viabilidad de uso del GPR en la localización y análisis de servicios enterrados

Una sociedad tan tecnificada como la actual requiere de complejas redes de servicios urbanos enterrados que hagan llegar a los ciudadanos los variados suministros necesarios para un normal desarrollo de su vida diaria: conducciones de agua, gas, electricidad, fibra óptica, etc. La proliferación de servicios urbanos en el subsuelo añade una dificultad adicional a la construcción de obras de ingeniería civil e infraestructuras del transporte, por cuanto cualquier intervención sobre el terreno requiere de una correcta localización de estas redes, con el fin de evitar interferencias que pongan en peligro los suministros o la seguridad de la propia obra. El GPR es una herramienta de gran interés para una localización correcta y eficiente de estos servicios, pues no siempre están perfectamente ubicados o identificados en la traza de la obra en cuestión. Si bien hay estudios positivos previos que confirman la idoneidad y viabilidad de la técnica GPR en esta aplicación (Petinelli et al., 2009; Bonomo et al., 2011), la proliferación de redes y de materiales empleados en las conducciones enterradas requiere de nuevos protocolos de actuación optimizados, que ayuden a una correcta obtención de mediciones y a su posterior interpretación. En los casos en los que las redes de servicios enterrados son muy densas, son habituales los solapamientos e interferencias entre las señales, dificultando enormemente una correcta localización de las conducciones. A estos inconvenientes se suma la incapacidad para reducir la dependencia del medio en las prospecciones: los diferentes materiales (rocas, gravas, limos, etc.) y la presencia de elementos extraños (raíces, huecos, etc.) afectan a su conductividad y, por tanto, a la veracidad y exactitud de los resultados obtenidos. El Capítulo 3 propone novedosos protocolos de trabajo y normas de buena práctica que contribuyen a mejorar la efectividad del método, teniendo en consideración las propiedades de los materiales, posición y tamaño de los reflectores, así como los parámetros de adquisición de datos GPR en campo.

6.4.1. Adquisición eficiente de datos GPR para la detección de tuberías enterradas

6.4.1.1. Introducción al caso de estudio

Para el análisis y desarrollo de nuevos procedimientos eficientes de adquisición de datos GPR de redes de servicios, se construyó *ex profeso* un tramo de prueba en Allariz (Ourense): se trata de un prototipo, a escala real, que simula una posible configuración de redes de tuberías enterradas de sección circular, de diferentes materiales (polietileno, polipropileno, nylon, fundición dúctil y hormigón) y diámetros (entre 25 y 315 mm), colocadas a diferentes profundidades, perpendiculares al eje longitudinal del tramo. Dicho tramo, de 14 m de largo por 1 m de ancho, está constituido por una explanada de suelo natural sobre la que se colocó (de abajo arriba) una base de zahorra de 75 cm de espesor, una capa intermedia de mezcla bituminosa en caliente AC 22 S (de 10 cm de espesor) y una capa de rodadura de tipo AC 16 S, de 5 cm de espesor. Una vez construido, se realizó un levantamiento del tramo con un láser escáner terrestre *Riegl LMS Z390i*, a fin de disponer de una ortoimagen de su geometría exacta, para estudiar la propagación de ondas de diferentes frecuencias y analizar la resolución de las prospecciones, considerando la posición y proximidades de las tuberías de la red entre sí. Cabe destacar que este tramo de prueba ha sido incluido en el "*Catalogue of GPR test sites*" de la *COST Action TU2018 "Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar"* (Pajewski et al., 2017), por iniciativa del Grupo de Geotecnologías Aplicadas a la Construcción, Energía e Industria de la Universidad de Vigo.

Las prospecciones se realizaron en direcciones longitudinal y transversal del tramo, empleando un equipo GPR *ProEx* de la compañía Malå Geoscience, dotado de 4 antenas de diferentes frecuencias (500 MHz, 800 MHz, 1 GHz y 2,3 GHz), con varias configuraciones de adquisición en el equipo, estudiando la capacidad de penetración y las resoluciones obtenidas en cada situación, para seleccionar las más adecuadas. La selección de las frecuencias de las antenas resultó fundamental para establecer una correcta relación entre la resolución obtenida y la capacidad de penetración de la onda, estudiando además la relación entre resolución horizontal-número de trazas empleadas y entre la resolución vertical-número de muestras empleadas, y velocidad de propagación de la onda.

6.4.1.2. Procedimiento empleado y discusión de resultados

Los resultados de las prospecciones se procesaron con el programa *ReflexW,* asumiendo como velocidades de propagación de la onda 15,5 cm/ns en las capas asfálticas y 12 cm/ns en las zahorras de la base, y un valor de constante dieléctrica del asfalto de 3,5, analizando los parámetros de adquisición (*total*

time window, *temporal* y *spatial sampling intervals*) y la influencia de la orientación de la antena en el resultado final de los radargramas, buscando los más nítidos y de más fácil interpretación. Tras un análisis exhaustivo de los resultados, el Capítulo 3 propone los parámetros de adquisición más eficientes para cada una de las cuatro antenas, a fin de examinar redes de tuberías semejantes a la simulada en el tramo de prueba. Se ha comprobado experimentalmente que la antena de 2,3 GHz no alcanza grandes profundidades (limitada a 40 cm), pero permite diferenciar con claridad conducciones separadas entre sí 10 cm en dirección vertical y 25 cm en dirección horizontal. Por su parte, las antenas de 1 GHz y 800 MHz alcanzan buenas resoluciones, sin problemas de solapamiento cuando las tuberías están separadas entre sí 50 cm en dirección horizontal y 20 cm en dirección vertical. La antena de 500 MHz apenas aporta resultados de interés para el análisis de este tipo de redes de servicios, ya que su resolución es muy pobre. Finalmente, se ha comprobado experimentalmente, en el tramo de prueba, que para una mejor resolución vertical de los resultados la prospección debe realizarse en dirección perpendicular a la orientación de las conducciones, mientras que para una resolución horizontal óptima se recomienda hacerla en dirección paralela a los reflectores.

6.5. Discusión del empleo de las técnicas GPR como herramientas de inspección en túneles

El GPR se ha empezado a emplear hace relativamente poco tiempo como herramienta de inspección no destructiva en el análisis de túneles, con experiencias significativas en túneles de carreteras y en túneles de líneas ferroviarias (Parkinson, 2008; Lei et al., 2013). Sin embargo, hasta la fecha no se ha empleado de manera recurrente en fases tempranas de construcción, habiéndose aplicado principalmente en túneles ya terminados y en servicio. El Capítulo 5 aporta una experiencia novedosa de uso del GPR en el análisis de etapas críticas iniciales de la construcción de un túnel ferroviario, estudiando su viabilidad de uso y los resultados que potencialmente aporta, de gran utilidad para extraer parámetros de control durante su ejecución, facilitando información de interés para la evaluación de la calidad final de la obra.

6.5.1. Discusión del análisis de aplicabilidad del Georradar para el control de calidad de un túnel en construcción

6.5.1.1. Caso de estudio

En esta contribución de la tesis se estudió con el GPR un túnel ferroviario en construcción, de la línea AVE Madrid-Galicia, ubicado en el tramo Lubián-

Ourense, subtramo Porto-Miamán. Se trata del túnel de Seiró, de 1.842 m de longitud, excavado en un macizo granítico con diversos grados de alteración. Se construyó mediante el método de avance y destroza (o “Nuevo Método Austriaco”), empleando explosivos cuando la dureza del terreno lo requería. Los sistemas de sostenimiento empleados varían de acuerdo con el estado del granito en la excavación, meteorizado en diversos grados: I, II, III, IV y V, siendo el tipo I el más duro (autoportante) y el V el más blando (necesita sustentación adicional). Cuando el terreno tenía suficiente capacidad portante (terreno duro: granitos I, II, III) se emplearon sistemas de sostenimiento ligeros, principalmente bulones y hormigón proyectado (gunitado). En las zonas con granitos de tipo IV (terrenos blandos) hubo que recurrir a la ayuda de cerchas metálicas. Los espesores de gunitado oscilaban en proyecto entre los 5 y los 20 cm de espesor (5 cm para los granitos tipo I y 20 cm para los tipo V). Cuando el terreno era especialmente blando y el granito estaba muy meteorizado (tipo V), se emplearon sistemas de pre-sostenimiento adicionales, constituidos por paraguas de micropilotes de 12 m de longitud. En el momento de aplicar el GPR en el análisis de una sección de este túnel, próxima a su boca sur, se habían colocado ya la gunita, los bulones y las cerchas de sustentación, faltando todavía la colocación de un revestimiento interior adicional de hormigón en masa HM-30, de 30 cm de espesor, dotado de fibras de polipropileno multifilamento (que evitan su colapso en caso de incendio). Se trata de una obra de gran complejidad técnica, en la que se invirtieron muchos medios materiales y humanos: del presupuesto base de licitación de este tramo de la línea AVE (superior a los 102 millones de euros), más de 34 millones se destinaron a la construcción del túnel de Seiró.

6.5.1.2. Procedimiento empleado y discusión de resultados

Se realizaron diversas prospecciones en los hastiales y zona inferior de la bóveda del túnel, en una sección de estudio próxima a la boca sur, empleando un equipo GPR *RAMAC* de la compañía *Malå Geoscience*, dotado con una antena de 1 GHz. Se eligió esta antena por aportar una buena capacidad de penetración (1-2 m) y resolución óptima para el análisis de las capas de granito. La finalidad del experimento fue comprobar la viabilidad de uso de la técnica de inspección GPR en fases tempranas de construcción del túnel, buscando información de interés para controlar la calidad de la ejecución y su adecuación al proyecto constructivo.

Tras procesar los resultados de inspección con el programa *ReflexW*, se ha demostrado en un escenario real la capacidad del GPR como herramienta viable para el control de ejecución del túnel, capaz de aportar información relevante sobre su estructura. Entre otras contribuciones, se aporta a la literatura científica, por primera vez, la velocidad de propagación de las ondas

electromagnéticas en los recubrimientos de gunita (hormigón proyectado) de la bóveda (5,1 cm/ns), no publicada con anterioridad y que está acorde con estudios de otros autores sobre la propagación de las ondas en cementos (Wimsatt et al., 2014). La técnica GPR ha servido para controlar el espesor de las capas de hormigón proyectado, comprobando su adecuación al proyecto, y también para la detección de cavidades y grietas ocultas en la zona de inspección. Se han localizado evidencias de efluorescencias, que delatan la posible carbonatación de las capas de pasivación de los elementos de sustentación. El GPR también ha sido eficaz para la localización de las cerchas de sustentación de la zona prospectada, comprobando que su configuración estructural es correcta y que se ha ejecutado de acuerdo con el proyecto constructivo.

En resumen, los resultados presentados en el Capítulo 5 demuestran la idoneidad del GPR para afrontar la inspección de túneles en construcción, aportando información relevante sobre la ejecución de la obra y de su calidad, de interés para abordar futuras acciones correctivas y de conservación de las estructuras que conforman la línea ferroviaria.

6.6. Discusión sobre las técnicas de procesado de la señal GRP y *software* de aplicación

El procesado de la señal electromagnética obtenida en las prospecciones GPR es un paso previo necesario y fundamental para una adecuada interpretación de los resultados obtenidos. De su correcto procesado y filtrado dependerán la eliminación de interferencias (o “ruidos”) indeseables y la amplificación de aquellas partes del espectro electromagnético que aporten la información más relevante y útil sobre los elementos que queremos analizar. El mercado presenta una amplia oferta de programas comerciales para ordenadores portátiles y de sobremesa, diseñados específicamente para el procesado de la señal GPR, destacando entre todos el *software ReflexW*, de la compañía alemana *Sandmeier Geophysical Research*. Se trata de programas informáticos computacionalmente muy potentes, dotados de multitud de herramientas para el filtrado y manipulación de la señal, que cuentan con una probada efectividad. Sin embargo, son poco intuitivos, no gratuitos y difíciles de utilizar por parte de usuarios no experimentados. Frente a estos programas convencionales, el Capítulo 5 presenta una nueva herramienta para el procesado básico de la señal GPR en dispositivos *tablets* y *smartphones,* como una alternativa simplificada al empleo de los programas convencionales, que tiene además carácter totalmente gratuito.

6.6.1. *App Android* para el procesado simplificado de la señal GPR en tabletas y teléfonos inteligentes

6.6.1.1. Descripción general de la *app* diseñada

Esta contribución, enmarcada en el Capítulo 5, analiza la viabilidad de una nueva herramienta de *software* especialmente diseñada para el estudio y procesado de la señal GPR en teléfonos inteligentes y tabletas, un campo en el que apenas se han encontrado desarrollos específicos (Benedetto et al., 2014; Varela-González et al., 2014). La nueva app ha sido diseñada en *Android* y permite acometer un procesado simplificado y más intuitivo de la señal GPR, útil para usuarios no expertos a partir de un enfoque totalmente novedoso: la señal electromagnética resultante de la prospección GPR se trata como una función bidimensional exponencial sinusoidal, atenuada en el dominio del tiempo, en la que los archivos binarios (*samples* y *traces*) de la traza de la onda electromagnética se asimilan a las coordenadas (x,y) de los puntos que conforman dicha curva sinusoidal. Esta información se almacena en archivos binarios tipo *ASCII*, tratados matricialmente, para obtener una representación gráfica preliminar de la señal GPR en la pantalla del dispositivo *smartphone* o *tablet*.

La *app* ha sido dotada de herramientas de pre-visualización y pre-procesado de la señal que contribuyen a la calidad y exactitud de los radargramas obtenidos en cada prospección. Cuenta con paleta de colores y escalas de grises, corrección del tiempo cero (para fijar el horizonte cero de las mediciones) y la posibilidad de seleccionar partes predeterminadas del radargrama y hacer zoom sobre su representación gráfica, aprovechando las características táctiles de las pantallas de este tipo de dispositivos, una de sus principales ventajas frente a los ordenadores (a sumar a su tamaño y facilidad de transporte).

El software diseñado aporta también filtros de procesado y tratamiento de la señal que permiten su análisis e interpretación de una manera más profunda, más allá de una mera representación gráfica 2D de los radargramas. Por un lado, un filtro de procesado permite la corrección de las interferencias debidas al acoplamiento de la señal interna del GPR con su componente DC-Shift (corrección de la componente DC). Por otro lado, los filtros de amplificación de la señal incorporados a la *app* permiten su modulación y análisis, para buscar características y patrones de comportamiento que ayuden a identificar los elementos situados en las zonas prospectadas. El filtro de truncamiento limita los valores máximos de la señal (amplitudes), exagerando los extremos de la onda a fin de identificar aspectos relevantes de la misma. El filtro de ganancia potencial, similar a los filtros “lineales-exponenciales” de los programas comerciales, permite mejorar, en general, el espectro de la señal. El filtro de derivación vertical permite analizar variaciones de las amplitudes de la onda en profundidad (eje z). Por su parte, el “*background removal filter*” (de igual

denominación que en los programas comerciales) elimina interferencias asociadas a la señal principal de la onda, producidas por el acoplamiento de la antena con el medio, eliminando los ruidos de baja frecuencia mediante la implementación de un novedoso algoritmo iterativo basado en el empleo de la media móvil. Por último, el filtro de análisis de frecuencias emplea la transformada de Fourier para la obtención de las frecuencias dominantes de la función (primer armónico) en el dominio del tiempo.

Finalmente, cabe mencionar que se implementaron también en la *app* herramientas para la medición directa de espesores y diámetros.

6.6.1.2. Discusión y validación de la *app* en entornos reales de ingeniería civil e infraestructuras del transporte

Las aportaciones del Capítulo 5 se completan con casos reales en los que se ha comprobado la capacidad de los equipos GPR para la inspección y monitorización de infraestructuras del transporte, procesando los resultados obtenidos con la nueva *app,* a fin de probar y validar su funcionamiento.

En el campo de los firmes, la nueva *app* se empleó en el procesado de datos GPR adquiridos con una antena de 1 GHz, comprobando la idoneidad del filtro de derivación vertical para destacar la presencia de las grietas en los radargramas. Además, el filtro de análisis de frecuencias resultó ser el más adecuado para la localización de cavidades en el interior del paquete de pavimentos prospectado.

El nuevo *software* ha aportado también resultados positivos en la estimación de espesores de pavimentos a partir de los radargramas procesados con la *app*. Se utilizaron datos GPR adquiridos con una antena de 2,3 GHz en un tramo real de carretera, constituida por dos capas de mezclas bituminosas en caliente (base tipo AC base 32 50/70 G y rodadura tipo AC bin 22 50/70 S), asumiendo un valor predeterminado de constante dieléctrica del medio y calibrando previamente la velocidad de propagación de la onda en las capas de firme. El resultado de los espesores estimados en los radargramas aportados por la *app* arroja un error del 10 %, por comparación con los valores reales de espesores medidos directamente en probetas testigo extraídas en la zona de análisis.

Se ha probado también la idoneidad de la *app* como herramienta efectiva para la localización de tuberías y armaduras enterradas, a partir de los radargramas resultantes del procesado de la señal con dicha *app*, así como para la estimación aproximada de sus diámetros. Aprovechando la capacidad táctil de las pantallas de los móviles, la *app* es capaz de estimar el valor máximo de los diámetros de estos elementos mediante un proceso de aproximaciones sucesivas, en el que se hacen coincidir manualmente las reflexiones

hiperbólicas de los radargramas con circunferencias de aproximación, que se superponen entre sí hasta lograr la coincidencia de curvaturas en la representación gráfica, aportando un valor aproximado del diámetro del elemento. El método ha sido validado con datos GPR adquiridos con una antena de 2,3 GHz en una zona experimental (la misma que se presentó en el Capítulo 3) en la que los diámetros de las tuberías eran previamente conocidos.

Los resultados expuestos en esta discusión han demostrado que es posible desarrollar una nueva herramienta *Android* para el procesado simplificado y efectivo de la señal GPR bruta en dispositivos móviles. El recurso a la programación por hilos en *Android* (*multi threading programming*) ha permitido optimizar los tiempos de computación y la capacidad de almacenamiento necesaria, maximizando el uso de los diferentes núcleos de los que disponen estos dispositivos.

En resumen, el Capítulo 5 ha confirmado de nuevo el interesante potencial de las técnicas de prospección GPR en el estudio de patologías en firmes y pavimentos, y en la localización y caracterización de servicios enterrados, aportando como principal contribución la novedosa *app Android* presentada, diseñada *ex profeso* para el procesado básico de la señal electromagnética en dispositivos móviles como los indicados, obteniendo resultados muy prometedores.

6.7. Referencias

Annan, P.; Davis, J. Impulse radar sounding in permafrost. Radio Sci. 11, 383-394 (1976).

Benedetto, F.; Benedetto, A.; Tedeschi, A. A Mobile Android Application for Road and Pavement Inspection by GPR Data Processing. 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. GPR, (2014).

Benedetto, A.; Pajewski, L. Civil Engineering Application of Ground Penetrating Radar. Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. Springer International Publishing. Swirtzeland (2015).

Bonomo, N.; de la Vega, M.; Martinelli, P.; Osella, A. Pipe-flange detection with GPR. J. Geophys. Eng. 8, 35-45 (2011).

Campbell, K.; Orange, A. A continuous profile of sea ice and freshwater ice thickness by impulse radar. Polar Record 17(106), 31-41 (1974).

Lei, X.; Hui-lin, Z.; Zhen, S.; Si-hao, T.; Guo-qing, L.; Zhu, J. GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: a case study. NDT & E Int. 59, 68-76 (2013).

Maser, K.; Puccinelli, J; Amestoy, J.K. Accuracy of ground penetrating radar asphalt thickness data and its impact on pavement rehabilitation design. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, USA (2012).

Pajewski, L.; Persico, R.; Derobert, X.; Balayssac, J.P.; Ebihara, S.; Grégoire, C.; Ivashchuk, V.; Kind, T.; et al. Catalogue of GPR test sites. TU1208 GPR Association, Rome (Italy), 2017, ISBN 9788888173009.

Parkinson, G.; Ékes, C. Ground-penetrating radar evaluation of concrete tunnel linings. Proc. 12th Int. Conf. on Ground-Penetrating Radar. Univ. of Birmingham. Birmingham, U.K. (2008).

Pettinelli, E.; di Matteo, A.; Mattei, E.; Crocco, L.; Soldovieri, F.; Redman, J.D. et al. GPR response from buried pipes: measurement on field site and tomographic reconstruction. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 47(8), 2639-45 (2009).

Saarenketo, T.; Scullion, T. Road evaluation with ground penetrating radar. J. Appl. Geophys. 43(2-4), 119-138 (2000).

Sagnard, F.; Norgeot, C.; Derobert, X.; Baltazart, V.; Merliot, E.; Derkx, F. et al. Utility detection and positioning on the urban site Sense-City using ground-penetrating radar systems. Measurement 88, 318-30 (2016).

Sandmeier, K.J. ReflexW manual v.4.5. <http://www.sandmeiergeo.de>. Sandmeier Scientific Software (2007) (último acceso: 09/05/2018) .

Saricicek, I.; Seren, A. Imaging of deteriorations and concrete quality of the tunnels (Zigana, Torul) with ground-penetrating-radar. Proc. 15th Int. on Ground-Penetrating Radar, IEEE (2014).

Solla, M.; Lagüela, S.; González-Jorge, H.; Arias, P. Approach to Identify Cracking in Asphalt Pavement Using GPR and Infrared Thermographic Methods: Preliminary Findings. NDT & E Int. 62, 55-65 (2014).

Varela-González, M.; Solla, M.; Martínez-Sánchez, J.; Arias, P. A semi-automatic processing and visualization tool for ground-penetrating radar pavement thickness data. Automation in Construction 45, 42-29 (2014).

Wimsatt, A. et al. Mapping voids, debonding, delaminations, moisture and other defects behind or within tunnel linings. Strategic Highway Research Program 2, Transportation Research Board of the National Academies. Washington DC (2014).

Capítulo 7

Conclusiones generales

En este capítulo final se exponen las conclusiones generales obtenidas tras la realización del trabajo de investigación que conforma la presente tesis doctoral. Se incluye, además, un apartado específico dentro del capítulo que plantea futuras líneas de investigación, las cuales permitirían continuar y ampliar el trabajo desarrollado hasta ahora.

7.1. Conclusiones

Las conclusiones generales obtenidas tras la realización del presente trabajo de investigación son las que se resumen a continuación:

- Se ha llevado a cabo una revisión de las aplicaciones del radar de subsuelo o georradar (por sus siglas en inglés, GPR) en el campo de la inspección de obras de ingeniería civil e infraestructuras del transporte (Capítulo 1, Estado del Arte), comprobando que:

a. El GPR ha resultado ser una herramienta especialmente útil y con un gran potencial de aplicación en el análisis e inspección del estado de múltiples y variados tipos de infraestructuras del transporte, a la hora de caracterizar detalles constructivos no accesibles, conocer su estado y estudiar la presencia de patologías y fallos estructurales difícilmente identificables con otras técnicas. Se ha comprobado que aporta gran cantidad de información, de utilidad práctica para el estudio y monitorización de las capas de firmes y pavimentos en carreteras, en el análisis e inspección de redes de servicios urbanos enterrados y para el control de parámetros de calidad en la construcción de túneles, desde fases iniciales de su construcción.
b. Aunque se trata de una herramienta de inspección prometedora en el campo de la obra civil, muy asequible desde el punto de vista económico, presenta limitaciones de diversa índole: por un lado, las relacionadas con aspectos físicos relativos a la propagación de la onda electromagnética: conocimiento del medio en el que se propaga la señal y de sus características intrínsecas (valor de la constante dieléctrica, presencia de humedades, sales, grado de

saturación, etc.); velocidad de propagación de la señal en cada material y su interacción con éste; detección de reflectores o de otros elementos que impidan su paso, etc. Por estos motivos se concluye que resulta prioritario, para el avance de la técnica, investigar el desarrollo de nuevas herramientas de procesado de la señal que permitan predecir su comportamiento en los diferentes medios por los que se propaga, de especial interés en los relacionados con el campo específico de esta tesis: diferentes tipos de mezclas bituminosas y asfaltos, suelos y explanadas de diversa tipología, hormigones y morteros en losas y elementos estructurales, etc. Por otro lado, la otra limitación que se ha detectado en este estudio es la escasa difusión de la técnica GPR en el mundo de la obra civil, principalmente por el desconocimiento de su funcionamiento y la complejidad de interpretación de sus resultados, que no ha ayudado en absoluto a su popularización.

- Se ha comprobado y verificado el potencial de aplicación del GPR en el campo de la inspección y búsqueda de patologías asociadas a los pavimentos y firmes (Capítulo 2), probando que:

  a. El GPR es una técnica de inspección no destructiva adecuada para los trabajos de mantenimiento y conservación de pavimentos que, además de medir los espesores de las capas de firmes, permite localizar y evaluar la presencia de patologías típicas relacionadas, desde fisuras y grietas superficiales hasta la presencia de oquedades y cárcavas en profundidad, causantes de fenómenos de hundimiento y subsidencias superficiales.
  b. Se ha demostrado su efectividad junto con otras técnicas de inspección no destructivas (termografía infrarroja y láser escáner terrestre), aportando nuevas metodologías de inspección para un análisis integral y conjunto del estado de las capas de firmes en las infraestructuras viarias.
  c. Los resultados se han validado en un escenario real de infraestructura del transporte: en concreto, en una carretera afectada por hundimientos parciales y problemas de rodadura, verificando la utilidad de la técnica GPR en la búsqueda de las posibles causas de las patologías detectadas en las inspecciones.

- En el ámbito particular de la detección y análisis de los servicios urbanos enterrados que pueden afectar al desarrollo de una obra de construcción de ingeniería civil (Capítulo 3), se ha demostrado que:

  a. El GPR es un método apropiado para la detección de las redes de servicios urbanos en las zonas de intervención, permitiendo su localización a fin de minimizar los cortes de suministro, los tiempos de intervención y los riesgos de seguridad y medioambientales derivados de

accidentes por una inadecuada manipulación de las conducciones y tuberías afectadas.

b. Se ha validado la efectividad de la técnica GPR en la búsqueda de distintos tipos de conducciones en un tramo de prueba, prototipo a escala real, construido *ex profeso* para este fin.
c. Se ha contribuido al establecimiento de protocolos y/o procedimientos de inspección, a partir de las propiedades de los materiales de las zonas de prospección, orientación y tamaño de los reflectores detectados, aportando configuraciones óptimas de adquisición GPR para diferentes escenarios reales, con el fin de obtener radargramas más fácilmente interpretables, con resoluciones horizontales y verticales mejoradas.

- En el ámbito de la aplicación de las técnicas de inspección GPR en túneles (Capítulo 4), se ha comprobado que:

  a. El GPR ha resultado ser una herramienta eficaz para la detección de patologías asociadas a este tipo de infraestructuras del transporte, que facilita información relevante sobre la calidad de la obra, no solo de túneles en servicio sino también desde fases tempranas de su construcción.
  b. El GPR es capaz de aportar datos de interés relativos a la configuración estructural del túnel, localización y estado de sus elementos de sustentación, espesores de recubrimientos o presencia de humedades y oquedades, entre otros aspectos constructivos relevantes para su vida útil en servicio y su futura conservación.
  c. La viabilidad del empleo del GPR en la inspección de túneles se ha verificado, a escala real, aplicándolo en el túnel de Seiró, en la línea ferroviaria AVE Madrid-Ourense, en fases tempranas de construcción. Se ha probado su compatibilidad de uso con un procedimiento constructivo habitual en este tipo de infraestructuras (el “Nuevo Método Austríaco”), obteniendo resultados satisfactorios para el seguimiento de la calidad y seguridad de los tajos de la obra durante su ejecución.

- En lo que respecta al procesado de la señal GPR y a los *softwares* de aplicación, se ha aportado una nueva herramienta para el tratamiento básico de la señal (Capítulo 5), poniendo a disposición del público una alternativa viable y simplificada a los programas comerciales convencionales de procesado.

  a. La *app* se ha diseñado en *Android*, es de carácter totalmente gratuito y permite el análisis y tratamiento de la señal GPR en *tablets* y *smartphones*.

b. El carácter simplificado de esta *app* la convierte en una herramienta asequible e intuitiva para personal no especializado, contribuyendo así a la difusión y popularización de la técnica entre los interesados en ella.
c. Desde el punto de vista computacional, la *app* desarrollada emplea métodos de procesado optimizados, recurriendo a la programación por hilos (*multi threading programming)* y al uso simultáneo de los diferentes núcleos de estos dispositivos, aprovechando además, entre otras ventajas, la capacidad táctil de su pantalla y su reducido tamaño (que facilita su transporte).
d. Aporta un completo catálogo de filtros y herramientas de procesado que facilitan el tratamiento de la señal y la obtención de radargramas exactos y fiables en la pantalla de estos dispositivos electrónicos.
e. La *app* se ha validado en casos reales de aplicación en obras de ingeniería civil (medición de espesores en firmes, localización de patologías en pavimentos, detección y medición de diámetros de conducciones enterradas), arrojando unos errores de medición de aproximadamente un 10 %, respecto de los valores reales.

7.2. Líneas de investigación futuras

La presente tesis se ha centrado en el análisis del potencial, viabilidad de uso y utilidad práctica de las técnicas de inspección GPR como herramientas de aplicación en el campo de las obras de ingeniería civil e infraestructuras del transporte, abordando además el procesado e interpretación de la señal electromagnética obtenida. Las líneas de investigación que se indican a continuación plantean posibles campos de actuación futuros, como extensión del trabajo desarrollado en esta tesis. Atendiendo a los campos específicos tratados en ella, se aportan las siguientes líneas futuras:

- **Análisis e inspección de patologías en firmes**

Más allá del análisis de espesores de las capas de firmes, en el Capítulo 2 se ha probado el enorme potencial del GPR en la localización y análisis de patologías habituales en estas unidades de obra. Entre los posibles trabajos futuros relacionados con esta aplicación, destacan:

- Incorporación de antenas de mayor frecuencia en este tipo de prospecciones (por ejemplo, de 1 y/o 2,3 GHz), para la obtención de datos GPR en el mismo rango de profundidades que las alcanzadas con la técnica de termografía infrarroja (IRT). Esto permitiría realizar una detección y evaluación conjunta más exacta e integrada de los defectos sub-superficiales en pavimentos.
- Desarrollo de herramientas y/o algoritmos específicos para la fusión de datos provenientes de las tres técnicas de inspección no destructivas

descritas en el Capítulo 2 (TLS, IRT y GPR) y, en particular, los aportados por diferentes frecuencias de prospección en el caso del GPR. Con ello se podría mejorar la resolución de las imágenes obtenidas en las inspecciones y una caracterización más exacta del medio en profundidad.

- **Localización de servicios enterrados en obras de ingeniería civil e infraestructuras del transporte**

El GPR ha demostrado ser una herramienta útil y eficaz para la detección y estudio de servicios enterrados, en particular de tuberías y canalizaciones de diferentes materiales y secciones circulares, como se recoge en el Capítulo 3. Futuros trabajos de investigación podrían abordar líneas tales como:

- Localización y estudio de otro tipo de canalizaciones y servicios enterrados asociados a las obras de ingeniería civil. Por ejemplo, elementos de canalización de secciones no circulares: cámaras de empalme; arquetas, canales y pozos de registro subterráneos; sistemas de drenaje enterrados en carreteras y viales.
- Desarrollo de algoritmos de detección automática basados en el método de las redes neuronales y aprendizaje máquina (*machine learning*). Para ello, se contempla un análisis y caracterización de patrones de reflexión específicos, relacionados con la tipología de los servicios localizados en cada prospección: elementos de sección circular vs. elementos de sección no circular; conducciones a presión vs. conducciones en lámina libre; conducciones con o sin cables en su interior, etc. Estos patrones permitirían una interpretación más sencilla de los radargramas obtenidos, así como el entrenamiento de la herramienta y la detección automática, mejorando además su exactitud en esta aplicación concreta.

- **Inspecciones de estructuras de obra: túneles**

Una vez probada la efectividad del GPR en el control de calidad y monitorización de los trabajos de ejecución de un túnel ferroviario de alta velocidad, en fases iniciales de construcción (Capítulo 4), parece lógico profundizar en la aplicación de la técnica GPR en este tipo de estructuras, teniendo en cuenta la gran cantidad de información que aporta a los ingenieros participantes en su diseño, construcción y mantenimiento. Entre los aspectos novedosos a desarrollar, cabe destacar aspectos como:

- Analizar la compatibilidad del GPR en túneles construidos con otros procedimientos constructivos, alternativos al “Nuevo Método Austriaco”, los cuales son elegidos en función de la capacidad de soporte del terreno en el que se perfora para la construcción de la infraestructura. Entre ellos, el “Método Tradicional de Madrid”, el “Método Austríaco” convencional o los túneles ejecutados con técnicas TBM: *Tunnel Boring Machine* (tuneladoras), por citar algunos de los más extendidos en el ámbito de la ingeniería civil.

- Probar la efectividad del GPR en la localización y evaluación del estado de otros elementos de sustentación de relevancia estructural en estas infraestructuras, diferentes de los mostrados en el Capítulo 4. Entre otros, análisis y control del estado de contrabóvedas, zapatas de sostenimiento (*grippers*) en túneles construidos con tuneladoras de tipo topo; anillos de dovelas colocados con tuneladoras de tipo EPB (*Earth Preassure Balance*: Escudo de presión de tierras), tanto simples como de doble escudo.
- Estudiar el empleo del GPR en el análisis de elementos constructivos de menor entidad, pero de no menos importancia a la hora de garantizar la calidad y seguridad del trabajo desarrollado en la construcción del túnel. Entre ellos, juntas de construcción, juntas de dilatación, conectores en losas, zunchos o elementos de sellado.

- **Técnicas de procesado de la señal GPR y software de aplicación**

El desarrollo de los dispositivos móviles ha supuesto una verdadera revolución en lo que se refiere a la expansión de las TIC (Tecnologías de Información y Comunicación) en nuestra sociedad. La “democratización” de estos equipos, al alcance de cualquier ciudadano de a pie, supone una oportunidad para visibilizar el GPR y darlo a conocer en el campo de la construcción de obra civil. Por tanto, es de interés continuar con líneas de investigación que permitan desarrollar nuevas *apps* para *tablets* y dispositivos móviles (como la presentada en el Capítulo 5), útiles para un tratamiento simplificado de la señal GPR y su posterior interpretación, abordando temas tales como:

- Procesado de señales brutas obtenidas con sistemas comerciales alternativos al que se ha empleado en esta tesis. Por ejemplo, los sistemas RADAN.dzt (de la compañía GSSI) e IDS.dat (de IDS).
- Desarrollo de aplicaciones basadas en el procesado de la señal en la GPU del dispositivo, como alternativa a la programación por hilos (*multi threading programming*) empleada en la app analizada en el Capítulo 5.
- Incorporación de nuevos filtros de procesado de la señal más avanzados: filtros paso banda (*band-pass filtering*), migración y convolución de la señal, entre otros.
- Desarrollo de nuevos algoritmos de tratamiento de la señal, basados en las aplicaciones de la Transformada de *Hough* o en el empleo de redes neuronales, abriendo nuevas vías para la detección automática de patrones de reflexión específicos: por ejemplo, reflectores planos en el caso de las capas asfálticas y reflexiones hiperbólicas en el caso de tuberías y conducciones, así como cambios de polaridad de la señal en el caso de objetos metálicos.

Anexo I

Información adicional detallada: Descripción de los factores de impacto y otros criterios de calidad de las publicaciones

Artículo 1

Joint use of GPR, IRT and TLS techniques for the integral damage detection in paving

- Criterios de calidad: Facto de impacto, cuartil, ISSN.

Artículo 2

Efficient GPR data acquisition to detect underground pipes

- Criterios de calidad: Facto de impacto, cuartil, ISSN.

Artículo 3

Assesing the applicability of Ground-Penetrating Radar to quality control in tunneling construction

- Criterios de calidad: Factor de impacto, cuartil, ISSN

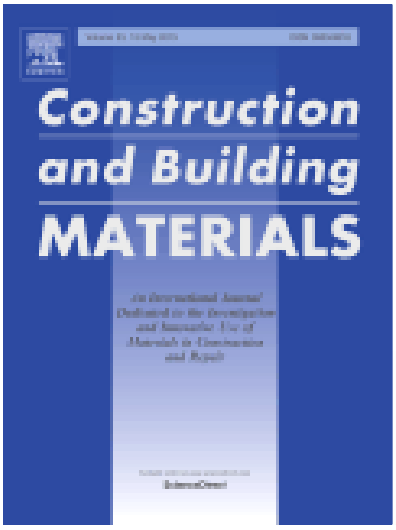
Artículo 4

A mobile Android tool for simplified GPR data processing in construction applications

- Criterios de calidad: Factor de impacto, cuartil, ISSN

Artículo 1

Joint use of GPR, IRT and TLS techniques for the integral damage detection in paving



ELSEVIER

CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS

ISSN: 0950-0618

ELSEVIER SCI LTD
THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND
ENGLAND

Go to Journal Table of Contents Go to Ulrich's

Titles
ISO: Constr. Build. Mater.
JCR Abbrev: CONSTR BUILD MATER

Categories
CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY - SCIE;
ENGINEERING, CIVIL - SCIE;
MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY - SCIE;

Languages
ENGLISH

8 Issues/Year;

Key Indicators

Year	Total Cites Graph	Journal Impact Factor Graph	Impact Factor Without Journal Self Cites Graph	5 Year Impact Factor Graph	Immediacy Index Graph	Citable Items Graph	Cited Half-Life Graph	Citing Half-Life Graph	Eigenfacto Score Graph	Article Influence Score Graph	% Articles in Citable Items Graph	Normalizec Eigenfacto Graph	Average JIF Percentile Graph
2016	28,963	3.169	2.068	3.703	0.521	1,878	4.2	8.2	0.04…	0.654	97.02	5.57…	85.526
2015	18,061	2.421	1.599	2.883	0.367	1,323	3.9	8.3	0.04…	0.659	96.30	4.73…	82.356
2014	13,430	2.296	1.419	2.710	0.381	1,250	3.9	8.4	0.03…	0.592	96.96	3.53…	83.797
2013	10,338	2.265	1.382	2.769	0.345	1,098	4.2	8.5	0.02…	0.644	96.63	2.99…	85.006
2012	7,337	2.293	1.319	2.818	0.391	960	3.9	8.8	0.02…	0.680	96.46	Not…	83.199
2011	4,396	1.834	1.358	2.134	0.269	532	4.0	9.2	0.01…	0.663	97.74	Not…	78.110
2010	2,791	1.366	1.053	1.570	0.163	325	3.7	8.6	0.01…	0.538	97.23	Not…	73.312
2009	2,113	1.456	1.114	1.515	0.289	440	3.9	9.2	0.00…	0.539	96.82	Not…	73.624
2008	1,255	0.947	0.795	1.168	0.156	276	5.2	>10.0	0.00…	0.492	97.46	Not…	61.095
2007	912	0.841	0.748	1.158	0.141	241	5.4	>10.0	0.00…	0.734	99.59	Not…	64.149
2006	562	0.506	0.442	Not…	0.155	116	5.5	9.3	Not…	Not…	100.00	Not…	39.915
2005	363	0.343	0.335	Not…	0.033	91	5.9	>10.0	Not…	Not…	100.00	Not…	26.626
2004	288	0.565	0.513	Not…	0.036	83	5.7	9.0	Not…	Not…	98.80	Not…	57.818
2003	204	0.330	0.298	Not…	0.050	60	6.6	7.6	Not…	Not…	100.00	Not…	37.006
2002	163	0.294	0.211	Not…	0.018	55	5.9	9.6	Not…	Not…	100.00	Not…	29.231
2001	145	0.341	0.307	Not…	0.024	42	5.0	9.6	Not…	Not…	97.62	Not…	34.973

Source Data

Rank

Cited Journal Data

Citing Journal Data

Box Plot

Journal Relationships

JCR Impact Factor

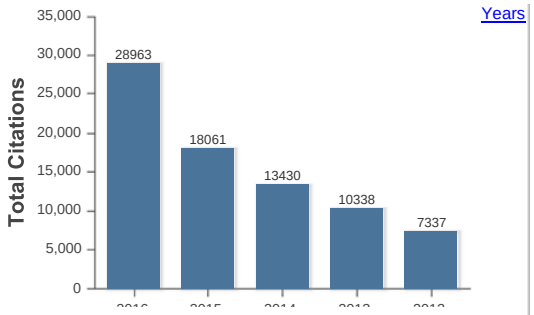
JCR Year	CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY			ENGINEERING, CIVIL			MATE
	Rank	Quartile	JIF Percentile	Rank	Quartile	JIF Percentile	R
2016	8/61	Q1	87.705	11/125	Q1	91.600	
2015	9/61	Q1	86.066	15/126	Q1	88.492	
2014	7/59	Q1	88.983	16/125	Q1	87.600	
2013	7/58	Q1	88.793	12/124	Q1	90.726	
2012	7/57	Q1	88.596	NA	undefined		
2011	8/56	Q1	86.607	NA	undefined		
2010	7/53	Q1	87.736	NA	undefined		
2009	7/49	Q1	86.735	NA	undefined		
2008	8/38	Q1	80.263	NA	undefined		
2007	6/34	Q1	83.824	NA	undefined		
2006	17/33	Q3	50.000	NA	undefined		
2005	21/31	Q3	33.871	NA	undefined		
2004	8/31	Q2	75.806	NA	undefined		
2003	15/29	Q3	50.000	NA	undefined		
2002	19/29	Q3	36.207	NA	undefined		
2001	16/27	Q3	42.593	NA	undefined		

ESI Total Citations

JCR Year	MATERIALS SCIENCE
2016	23/350-(

View All

2014	40/334-Q1
2013	40/331-Q1
2012	46/325-Q1



InCites Journal Citation Reports dataset updated Sep 09, 2017

Tell us what you think. Help us improve the Journal Citation Reports by providing your feedback! **Click Here >**

© 2018 **CLARIVATE ANALYTICS** **TERMS OF USE** **PRIVACY POLICY**

Artículo 2

Efficient GPR data acquisition to detect underground pipes

NDT & E INTERNATIONAL

ISSN: 0963-8695

ELSEVIER SCI LTD
THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND
ENGLAND

Go to Journal Table of Contents Go to Ulrich's

Titles
ISO: NDT E Int.
JCR Abbrev: NDT&E INT

Categories
MATERIALS SCIENCE, CHARACTERIZATION & TESTING - SCIE

Languages
ENGLISH

8 Issues/Year;

Key Indicators

Year	Total Cites Judsk	Journal Impact Factor Graph	Impact Factor Without Journal Self Cites Judsk	5 Year Impact Factor Graph	Immediacy Index Judsk	Citable Items Judsk	Cited Half-Life Graph	Citing Half-Life Graph	Eigenfacto Score Judsk	Article Influence Score Graph	% Articles in Citable Items Graph	Normalizec Eigenfacto Judsk	Average JIF Percentile Graph
2016	4,128	2.726	2.474	2.888	0.450	80	8.0	9.3	0.00…	0.784	100.00	0.66…	89.394
2015	3,200	1.871	1.703	2.243	0.479	71	7.9	9.6	0.00…	0.695	98.59	0.64…	83.333
2014	3,106	2.225	1.889	2.302	0.394	104	7.6	8.9	0.00…	0.675	100.00	0.64…	92.424
2013	2,731	1.717	1.426	2.105	0.305	105	7.5	9.1	0.00…	0.618	100.00	0.58…	92.424
2012	2,253	1.744	1.462	1.826	0.275	131	7.3	9.7	0.00…	0.574	100.00	Not…	95.313
2011	1,849	1.477	1.121	1.687	0.302	106	6.8	8.1	0.00…	0.559	100.00	Not…	85.938
2010	1,538	1.446	1.228	1.593	0.183	93	6.4	9.1	0.00…	0.542	98.92	Not…	82.813
2009	1,427	1.323	1.101	1.549	0.173	104	6.5	8.1	0.00…	0.521	100.00	Not…	78.333
2008	1,184	1.198	0.994	1.375	0.112	80	6.3	8.1	0.00…	0.486	100.00	Not…	83.929
2007	979	1.131	0.879	1.238	0.167	78	5.9	7.8	0.00…	0.543	100.00	Not…	91.379
2006	833	0.970	0.827	Not…	0.225	89	5.4	8.7	Not…	Not…	98.88	Not…	86.000
2005	664	1.094	0.856	Not…	0.138	94	5.0	8.7	Not…	Not…	100.00	Not…	90.000
2004	608	0.707	0.571	Not…	0.203	74	5.0	8.1	Not…	Not…	100.00	Not…	67.391
2003	469	0.798	0.705	Not…	0.031	65	5.6	7.5	Not…	Not…	100.00	Not…	89.130
2002	396	0.752	0.661	Not…	0.162	68	5.6	7.5	Not…	Not…	100.00	Not…	89.583
2001	336	0.636	0.609	Not…	0.066	61	6.5	8.1	Not…	Not…	100.00	Not…	84.091

Source Data

Rank

Cited Journal Data

Citing Journal Data

Box Plot

Journal Relationships

JCR Impact Factor

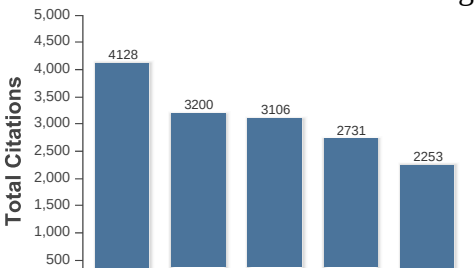
JCR Year	MATERIALS SCIENCE, CHARACTERIZATION & TES		
	Rank	Quartile	JIF Percentile
2016	4/33	Q1	89.394
2015	6/33	Q1	83.333
2014	3/33	Q1	92.424
2013	3/33	Q1	92.424
2012	2/32	Q1	95.313
2011	5/32	Q1	85.938
2010	6/32	Q1	82.813
2009	7/30	Q1	78.333
2008	5/28	Q1	83.929
2007	3/29	Q1	91.379
2006	4/25	Q1	86.000
2005	3/25	Q1	90.000
2004	8/23	Q2	67.391
2003	3/23	Q1	89.130
2002	3/24	Q1	89.583
2001	4/22	Q1	84.091
2000	11/21	Q2	50.000

ESI Total Citations

JCR Year	MATERIALS SCIENCE
2016	102/350-C
2015	106/343-C
2014	98/334-C

View All Years

2013	91/331-Q2
2012	93/325-Q2



InCites Journal Citation Reports dataset updated Sep 09, 2017

Tell us what you think. Help us improve the Journal Citation Reports by providing your feedback! **Click Here >**

© 2018 **CLARIVATE ANALYTICS** **TERMS OF USE** **PRIVACY POLICY**

Artículo 3

Assessing the applicability of Ground-Penetrating Radar to quality control in tunneling construction

ASCE
AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS

JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT

ISSN: 0733-9364

ASCE-AMER SOC CIVIL ENGINEERS
1801 ALEXANDER BELL DR, RESTON, VA 20191-4400
USA

Go to Journal Table of Contents Go to Ulrich's

Titles
ISO: J. Constr. Eng. Manage.
JCR Abbrev: J CONSTR ENG M

Categories
CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY - SCIE;
ENGINEERING, INDUSTRIAL - SCIE;
ENGINEERING, CIVIL - SCIE;

Languages
ENGLISH

12 Issues/Year;

Key Indicators

Year	Total Cites Graph	Journal Impact Factor Graph	Impact Factor Without Journal Self Cites Graph	5 Year Impact Factor Graph	Immediacy Index Graph	Citable Items Graph	Cited Half-Life Graph	Citing Half-Life Graph	Eigenfacto Score Graph	Article Influence Score Graph	% Articles in Citable Items Judsk	Normalizec Eigenfacto Graph	Average JIF Percentile Graph
2016	6,109	1.735	1.330	2.350	0.200	175	9.3	9.9	0.00…	0.421	99.43	0.49…	58.091
2015	4,261	1.152	0.900	1.731	0.147	109	9.4	>10.0	0.00…	0.385	99.08	0.48…	51.307
2014	3,325	0.842	0.652	1.363	0.146	151	9.5	>10.0	0.00…	0.405	100.00	0.52…	41.069
2013	2,842	0.867	0.582	1.352	0.129	171	8.5	9.2	0.00…	0.329	99.42	0.39…	42.681
2012	2,649	0.876	0.608	1.277	0.106	151	8.2	9.5	0.00…	0.321	100.00	Not…	52.360
2011	2,172	0.818	0.530	1.102	0.102	127	8.2	9.1	0.00…	0.315	100.00	Not…	56.716
2010	2,054	0.676	0.481	1.209	0.130	131	7.8	9.7	0.00…	0.299	100.00	Not…	49.570
2009	1,867	0.583	0.393	1.122	0.076	144	8.0	9.0	0.00…	0.231	100.00	Not…	38.487
2008	1,410	0.564	0.340	0.954	0.049	103	7.7	8.8	0.00…	0.234	100.00	Not…	35.552
2007	1,074	0.493	0.301	0.767	0.028	108	8.2	8.7	0.00…	0.292	98.15	Not…	41.345
2006	812	0.471	0.229	Not…	0.068	133	7.7	8.2	Not…	Not…	100.00	Not…	43.738
2005	891	0.464	0.143	Not…	0.079	139	7.7	8.3	Not…	Not…	100.00	Not…	45.818
2004	540	0.284	0.141	Not…	0.040	101	7.2	8.1	Not…	Not…	100.00	Not…	36.851
2003	507	0.238	0.106	Not…	0.025	80	8.0	7.9	Not…	Not…	98.75	Not…	28.630
2002	415	0.260	0.105	Not…	0	61	7.7	7.6	Not…	Not…	100.00	Not…	33.726
2001	336	0.254	0.118	Not…	0.033	61	8.1	8.4	Not…	Not…	100.00	Not…	35.776

Source Data

Rank

Cited Journal Data

Citing Journal Data

Box Plot

Journal Relationships

JCR Impact Factor

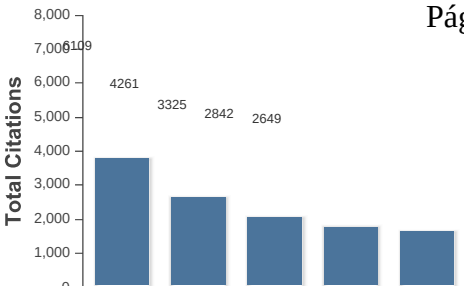
JCR Year	CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY			ENGINEERING, INDUSTRIAL			ENGIN
	Rank	Quartile	JIF Percentile	Rank	Quartile	JIF Percentile	R
2016	22/61	Q2	64.754	25/44	Q3	44.318	
2015	26/61	Q2	58.197	27/44	Q3	39.773	
2014	32/59	Q3	46.610	30/43	Q3	31.395	
2013	27/58	Q2	54.310	30/43	Q3	31.395	
2012	23/57	Q2	60.526	26/44	Q3	42.045	
2011	19/56	Q2	66.964	23/43	Q3	47.674	
2010	20/53	Q2	63.208	26/38	Q3	32.895	
2009	27/49	Q3	45.918	28/37	Q4	25.676	
2008	23/38	Q3	40.789	25/33	Q4	25.758	
2007	19/34	Q3	45.588	23/33	Q3	31.818	
2006	18/33	Q3	46.970	20/32	Q3	39.063	
2005	14/31	Q2	56.452	21/33	Q3	37.879	
2004	20/31	Q3	37.097	22/33	Q3	34.848	
2003	21/29	Q3	29.310	25/33	Q4	25.758	
2002	20/29	Q3	32.759	23/32	Q3	29.688	
2001	18/27	Q3	35.185	21/30	Q3	31.667	

ESI Total Citations

JCR Year	ENGINEERING
2016	152/861-(
2015	164/850-(

View All Years

2014	188/838-Q1
2013	190/837-Q1
2012	182/827-Q1



InCites Journal Citation Reports dataset updated Sep 09, 2017

Tell us what you think.

Help us improve the Journal Citation Reports by providing your feedback! **Click Here >**

© 2018 **CLARIVATE ANALYTICS** **TERMS OF USE** **PRIVACY POLICY**

Artículo 4

A mobile android tool for simplified GPR data processing in construction applications

AUTOMATION IN CONSTRUCTION

ISSN: 0926-5805

ELSEVIER SCIENCE BV
PO BOX 211, 1000 AE AMSTERDAM, NETHERLANDS
NETHERLANDS

Go to Journal Table of Contents Go to Ulrich's

Titles
ISO: Autom. Constr.
JCR Abbrev: AUTOMAT CONSTR

Categories
CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY - SCIE;
ENGINEERING, CIVIL - SCIE;

Languages
ENGLISH

8 Issues/Year;

Key Indicators

Year	Total Cites Judsk	Journal Impact Factor Graph	Impact Factor Without Journal Self Cites Judsk	5 Year Impact Factor Graph	Immediacy Index Judsk	Citable Items Judsk	Cited Half-Life Graph	Citing Half-Life Graph	Eigenfacto Score Judsk	Article Influence Score Graph	% Articles in Citable Items Graph	Normalizec Eigenfacto Judsk	Average JIF Percentile Graph
2016	4,781	2.919	2.375	3.432	0.323	189	5.2	7.7	0.00…	0.589	93.65	0.76…	85.593
2015	3,543	2.442	1.914	2.827	0.199	151	5.1	7.2	0.00…	0.629	97.35	0.80…	89.289
2014	2,637	1.812	1.324	2.414	0.281	171	4.9	7.5	0.00…	0.633	95.32	0.74…	84.197
2013	2,130	1.822	1.134	2.217	0.361	191	4.8	7.7	0.00…	0.484	97.91	0.50…	85.213
2012	1,692	1.820	1.179	2.038	0.181	160	4.9	8.2	0.00…	0.449	96.25	Not…	85.782
2011	1,147	1.500	0.984	1.702	0.103	116	4.6	7.7	0.00…	0.449	97.41	Not…	82.786
2010	996	1.311	0.978	1.454	0.238	101	4.8	7.3	0.00…	0.350	92.08	Not…	83.142
2009	870	1.372	1.105	1.510	0.124	97	4.6	7.9	0.00…	0.356	93.81	Not…	83.149
2008	844	1.664	1.230	1.569	0.430	93	4.1	7.6	0.00…	0.285	95.70	Not…	94.455
2007	391	0.609	0.398	0.776	0.092	87	5.2	7.4	0.00…	0.231	98.85	Not…	63.706
2006	341	0.792	0.558	Not…	0.046	65	4.7	7.1	Not…	Not…	98.46	Not…	84.465
2005	181	0.387	0.184	Not…	0	63	4.0	6.9	Not…	Not…	98.41	Not…	34.486
2004	148	0.360	0.166	Not…	0.018	57	4.5	6.7	Not…	Not…	96.49	Not…	46.488
2003	93	0.320	0.206	Not…	0.016	62	Not…	6.2	Not…	Not…	96.77	Not…	43.481
2002	69	0.312	0.260	Not…	0.019	52	Not…	7.0	Not…	Not…	96.15	Not…	43.735

Source Data
Rank
Cited Journal Data
Citing Journal Data
Box Plot
Journal Relationships

JCR Impact Factor

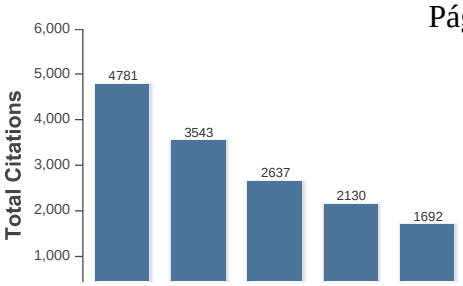
JCR Year	CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY			ENGINEERING, CIVIL		
	Rank	Quartile	JIF Percentile	Rank	Quartile	JIF Percentile
2016	11/61	Q1	82.787	15/125	Q1	88.400
2015	8/61	Q1	87.705	12/126	Q1	90.873
2014	9/59	Q1	85.593	22/125	Q1	82.800
2013	9/58	Q1	85.345	19/124	Q1	85.081
2012	9/57	Q1	85.088	17/122	Q1	86.475
2011	11/56	Q1	81.250	19/118	Q1	84.322
2010	8/53	Q1	85.849	23/115	Q1	80.435
2009	8/49	Q1	84.694	20/106	Q1	81.604
2008	2/38	Q1	96.053	7/91	Q1	92.857
2007	12/34	Q2	66.176	35/89	Q2	61.236
2006	3/33	Q1	92.424	20/83	Q1	76.506
2005	20/31	Q3	37.097	55/80	Q3	31.875
2004	17/31	Q3	46.774	43/79	Q3	46.203
2003	16/29	Q3	46.552	44/73	Q3	40.411
2002	17/29	Q3	43.103	40/71	Q3	44.366

ESI Total Citations

JCR Year	ENGINEERING
2016	196/861-(
2015	203/850-(
2014	224/838-(

View All Years

2013	240/837-Q2
2012	253/827-Q2



InCites Journal Citation Reports dataset updated Sep 09, 2017

Tell us what you think. Help us improve the Journal Citation Reports by providing your feedback! **Click Here >**

© 2018 **CLARIVATE ANALYTICS** **TERMS OF USE** **PRIVACY POLICY**