



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Inspección no destructiva de estructuras mediante georradar: análisis de daños por corrosión y por otras patologías

Viviana Sossa Arancibia

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA DE ESTRUCTURAS MEDIANTE GEORRADAR: ANÁLISIS DE DAÑOS POR CORROSIÓN Y POR OTRAS PATOLOGÍAS

Tesis doctoral para optar por el grado de doctor dentro del programa de
doctorado en:

INGENIERÍA SÍSMICA Y DINÁMICA ESTRUCTURAL

Universidad Politécnica de Catalunya

Autor:

Viviana Sossa Arancibia

Directores:

María de la Vega Pérez Gracia

José Ramón González Drigo

Barcelona 2020

A mi padre y madre

AGRADECIMIENTOS

A mis directores María de la Vega Pérez Gracia y José Ramón González Drigo, por los valiosos conocimientos transmitidos, por su comprensión y su paciencia a lo largo del desarrollo del trabajo de tesis. Simplemente, gracias, ya que sin dos grandes personas como ustedes esto no hubiera sido posible. Gracias por haber confiado en mí y haberme apoyado hasta el final, luchando contra diferentes obstáculos, pero siempre adelante.

A la Universidad Politécnica de Cataluña, a las Escuelas de Ingeniería de Caminos (ETSCCPB) y de Ingeniería de Barcelona (EEBe), al personal técnico y administrativo de la oficina de doctorado, a mis compañeros de estudio y a los profesores de los programas de Máster y Doctorado, y, en especial, a los Profesores Luis Pujades y Alberto Ledesma, a quienes agradezco sus excelentes clases y los buenos consejos, y también su disponibilidad e inestimable ayuda siempre que lo he necesitado.

A la acción COST Action TU1208 y a todos los congresos y conferencias en los que he tenido la fortuna de participar, por haberme permitido ampliar mi actividad científica con reuniones, congresos y las *training school*. Todas estas actividades han tenido un aporte muy valioso para mi formación científica y humana. También me han permitido encontrar excelentes personas con las que hoy me une una buena amistad.

A mi padre por el apoyo incondicional que me ha dado, desde el inicio, hasta la culminación de mi trabajo, gracias por haber estado siempre presente.

A mi madre, a mi hermano y abuelos por estar presentes en mi vida, dándome su apoyo y ánimo para seguir adelante.

A José, que en la última etapa me ha dado fuerza para culminar, animándome y estando a mi lado.

ABSTRACT

This thesis aims to study the capacities and limitations of Ground Penetrating Radar (GPR) to support inspection, assessment, maintenance and rehabilitation tasks, helping to early detection and evaluation of pathologies in unreinforced masonry constructions, as well as in reinforcing concrete structures.

One of the most common pathologies in existing reinforced concrete structures is corrosion damage. In fact, this is a pathology that, in more advanced stages, may compromise the integrity of some structural elements, or even of the whole structural system. Corrosion damage reduces the effective cross section of steel reinforcing bars, diminishing the bond between reinforcement and concrete, and affecting, due to physical and chemical processes, the concrete that involves the corroded steel reinforcing bars. In reinforced concrete structures, the corrosion of steel reinforcing bars is, in general, hidden. Accordingly, remotely or at distance assessment techniques are desirable, which aims to assess the integrity of steel elements, generally inaccessible through direct contact.

The implementation of non-destructive tests (NDT) is a common practice when analysing pathologies in historical buildings, where interventions should be as minimal invasive as possible. Some of the most common methods to assess corrosion, such as the potential of corrosion, the petrographic analysis and the resistivimeter, present some disadvantages in comparison to the GPR. In fact, the uses of such methods require a considerable time, they are slightly invasive, and its application is localized, which means that their application only covers a reduced area of analysis.

In order to assess the GPR capacity for detecting corrosion damage, different laboratory tests were respectively developed, being the obtained results extremely satisfactory. Accordingly, it is possible to identify the following achievements: (i) a fast data acquisition planning methodology was well established; (ii) the key elements and parameters for corrosion detection, within a qualitative analysis, were respectively identified; (iii) the contour effects, related to a change on geometry, were identified and duly controlled; and (iv) a numerical approximation method, based on energy attenuation of GPR, for assessing the presence and degree of corrosion in damaged samples, was proposed with success. Obtained results are themselves a strong contribution of developed research studies for the state of art.

Four in-field tests, implemented on existing structures were respectively developed, aiming to apply and validate the methodologies, results and conclusions, obtained from laboratory tests. Three case studies are related to historical constructions, belonging to the cultural heritage of the city of Barcelona, in Spain. The obtained results from GPR, combined, in some cases, with boreholes and seismic tomography, allowed identifying pathologies due to humidity, corrosion and differential settlements. A fourth case study, developed on a contemporary structure, in reinforcing concrete, and only using GPR, allowed to identify and localize pathologies due to corrosion damage.

The laboratory tests and the case studies, using GPR, combined or not with other techniques, showed a strong capacity to detect and assess early stage pathologies, especially due to corrosion damage, through fast, non-invasive and non-destructive prospection.

This strategy has economic and social advantages. Indeed, a fast detection of pathologies, allow the rehabilitation of existing structures with a minimum amount of budget, when comparing with the needed resources to face damage in a more severe stage. The assessment of pathologies in early stages with GPR, especially when combined with other techniques, allow then to ensure more resilient structures, by increasing their reliability, safety, and availability, and by decreasing their operational costs.

RESUMEN

En este trabajo de tesis se propone estudiar las capacidades y limitaciones de la tecnología de georradar para dar soporte a tareas de inspección, evaluación, mantenimiento y reparación mediante la detección temprana y la evaluación de patologías en construcciones de mampostería no reforzada y en estructuras de hormigón armado.

Una de las patologías más comunes en estructuras es la que ocasiona la oxidación en elementos metálicos. Se trata de una patología que, en fases avanzadas, puede comprometer la integridad de los elementos o del conjunto estructural. La corrosión reduce la sección efectiva de los elementos metálicos o del armado, disminuye la adherencia entre acero y hormigón y afecta, por interacción química y física, el hormigón que rodea las armaduras corroídas. En estructuras de hormigón armado, la corrosión en las armaduras queda, en general, oculta. En este sentido, son deseables técnicas de prospección remotas o a distancia, con el propósito de evaluar elementos metálicos inaccesibles por contacto.

El empleo de ensayos no destructivos (NDT) y no invasivos, es habitual en el análisis de patologías en edificios históricos, donde las intervenciones deben ser mínimamente invasivas. Métodos comunes para evaluar la corrosión como el potencial de corrosión, análisis petrográfico y resistivímetro, tienen desventajas frente al georradar. La utilización de estos métodos requiere un tiempo considerable, son levemente invasivos y su aplicación es puntual de modo que las prospecciones suelen cubrir áreas relativamente reducidas constituidas por unos pocos elementos (armaduras).

Para determinar la capacidad de la tecnología de georradar para detectar el fenómeno de la corrosión, se han diseñado diferentes experimentos en laboratorio. Los resultados obtenidos son razonablemente satisfactorios. Se ha definido una metodología para la planificación de prospecciones rápidas; Se han identificado los elementos y parámetros clave para interpretar, en análisis cualitativos, la presencia de corrosión; Se han identificado y controlado los efectos de contorno relacionados con cambios en la geometría; Se ha propuesto una aproximación numérica, basada en la atenuación de la energía en la señal de georradar, para evaluar la presencia y el grado de corrosión en

muestras afectadas. Este resultado constituye una contribución original y significativa del trabajo de tesis.

Se han realizado cuatro campañas de prospección sobre construcciones y estructuras reales con objeto de aplicar las metodologías, resultados y conclusiones obtenidos en los ensayos de laboratorio. Tres casos de estudio se corresponden con construcciones históricas pertenecientes al patrimonio arquitectónico y cultural de Barcelona. Los resultados, obtenidos con prospecciones georradar combinadas, en algún caso, con sondeos y tomografía sísmica, han permitido identificar patologías causadas por la humedad, la corrosión y asentamientos diferenciales del terreno. Un cuarto caso de estudio, realizado sobre una estructura contemporánea en hormigón armado y utilizando únicamente tecnología de georradar, ha permitido identificar y localizar patologías ocasionadas por la corrosión.

En los ensayos de laboratorio y en los casos de estudio descritos, la tecnología de georradar, combinada con otras técnicas, ha demostrado una buena capacidad para detectar y evaluar patologías en fases tempranas, especialmente por corrosión, mediante prospecciones rápidas, no invasivas y no destructivas.

Esta estrategia tiene ventajas económicas y sociales. Una pronta detección de patologías, permite recuperar las construcciones con inversiones mínimas si se comparan con los importantes recursos que deben utilizarse frente a una evidencia del daño en etapas severas. La evaluación de patologías en etapas tempranas y con tecnología de georradar combinada con otras técnicas, nos orienta hacia construcciones más seguras y resilientes.

RESUM

En aquest treball de tesi es proposa estudiar les capacitats i limitacions de la tecnologia de georadar (GPR) per donar suport a tasques d'inspecció, avaluació, manteniment i reparació mitjançant la detecció i l'avaluació de patologies en construccions de maçoneria no reforçada i en estructures de formigó armat.

Una de les patologies més comunes en estructures és la que ocasiona corrosió en elements metàl·lics. Es tracta d'una patologia que, en fases avançades, pot comprometre la integritat dels elements o de conjunt estructural. La corrosió redueix la secció efectiva dels elements metàl·lics o de l'armat, disminueix l'adherència entre acer i formigó i afecta, per interacció química i física, el formigó que envolta les armadures corroïdes. En estructures de formigó armat, la corrosió en les armadures queda, en general, oculta. En aquest sentit, són desitjables tècniques de prospecció remotes o a distància, amb el propòsit d'avaluar elements metàl·lics inaccessibles per contacte.

L'uso d'assajos no destructius (NDT), és habitual en l'anàlisi de patologies en edificis històrics, on les intervencions han de ser mínimament invasives. Mètodes comuns per avaluar la corrosió com el potencial de corrosió, anàlisi petrogràfic i Resistímetre, tenen desavantatges enfront de l'georadar. La utilització d'aquests mètodes requereix un temps considerable, són lleument invasius i la seva aplicació és puntual de manera que les prospeccions solen cobrir àrees relativament reduïdes constituïdes per uns pocs elements (armadures).

Per determinar la capacitat de la tecnologia de georadar per detectar el fenomen de la corrosió, s'han dissenyat diferents experiments en laboratori. Els resultats obtinguts són raonablement satisfactoris. S'ha definit una metodologia per a la planificació de prospeccions ràpides; S'han identificat els elements i paràmetres clau per a interpretar, en anàlisis qualitatives, la presència de corrosió; S'han identificat i controlat els efectes de contorn relacionats amb canvis en la geometria; S'ha proposat una aproximació numèrica, basada en l'atenuació de l'energia en el senyal de georadar, per avaluar la presència i el grau de corrosió en mostres afectades. Aquest resultat constitueix una contribució original i significativa de la feina de tesi.

S'han realitzat quatre campanyes de prospecció sobre construccions i estructures reals a fi d'aplicar les metodologies, resultats i conclusions obtinguts en els assaigs de laboratori. Tres casos d'estudi es corresponen amb construccions històriques pertanyents a el patrimoni arquitectònic i cultural de Barcelona. Els resultats, obtinguts amb

prospeccions georadar combinades, en algun cas, amb sondejos i tomografia sísmica, han permès identificar patologies causades per la humitat, la corrosió i assentaments diferencials de el terreny. Un quart cas d'estudi, realitzat sobre una estructura contemporània a formigó armat i utilitzant únicament tecnologia de georadar, ha permès identificar i localitzar patologies ocasionades per la corrosió.

En els assaigs de laboratori i en els casos d'estudi descrits, la tecnologia de georadar, combinada amb altres tècniques, ha demostrat una bona capacitat per detectar i avaluar patologies en fases primerenques, especialment per corrosió, mitjançant prospeccions ràpides, no invasives i no destructives .

Aquesta estratègia té avantatges econòmics i socials. Una ràpida detecció de patologies, permet recuperar les construccions amb inversions mínimes si es comparen amb els importants recursos que s'han d'utilitzar davant d'una evidència el dany en etapes severes. L'avaluació de patologies en etapes primerenques i amb tecnologia de georadar combinada amb altres tècniques, ens orienta cap a construccions més segures i resilients.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Desarrollo del estudio	4
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos	7
1.3.3. Objetivo de los casos de estudio	7
2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1. Primeras aplicaciones del GPR	11
2.2. Estudios sobre detección de armaduras en el hormigón	11
2.3. Estudios sobre corrosión de armaduras y la aplicación del GPR	13
2.4. Estudios sobre detección de humedad y huecos con GPR	16
2.4.1. Detección de la humedad	16
2.4.2. Detección de huecos	19
3. CONCEPTOS TEORICOS	21
3.1. Conceptos Teóricos: Campos Electromagnéticos y Propagación de Ondas	21
3.1.1. Conductividad Eléctrica σ	21
3.1.2. Permitividad Dieléctrica ϵ	22
3.1.3. Permeabilidad magnética μ	25
3.1.4. Velocidad de propagación	26
3.4. Longitud de onda	27
3.2. Conceptos Teóricos: Daños por corrosión en el hormigón armado	29

3.2.1. Proceso de corrosión	29
3.2.1.1. La carbonatación. Pérdida de alcalinidad	30
3.2.1.2. La corrosión por cloruros. Destrucción de la capa pasiva	31
3.2.2.1. Reducción de la sección de la armadura.	33
3.2.2.2. Pérdida de adherencia.	34
3.2.3. Métodos de medición de la corrosión en armaduras emplazadas en elementos estructurales de hormigón	35
3.2.3.1. Potencial espontaneo	36
3.2.3.2. Medida del potencial de corrosión, siguiendo la norma ASTM C 876-91	37
3.2.3.3. Método de confinamiento modulado de corriente	38
3.2.3.4. Método del refractómetro de dominio de tiempo (TDR)	38
3.2.3.5. Método del sensor inductivo	40
3.2.3.6. Ground Penetrating Radar	42
3.3. Equipo y Metodología	44
3.3.1. Equipo de radar de penetración terrestre	44
3.3.2. Adquisición de datos	46
3.2.2.1. Common Mid Point (CMP)	48
3.2.2.2. Wide Angle Reflection and Refraction (WARR)	49
3.2.2.3. Single Common Offset Reflection Methods	50
3.2.3. Procesado de datos	50
3.2.3.1. Eliminación del ruido	51
4. ENSAYOS DE LABORATORIO	57
4.1. Introducción	57

4.2. Ensayo 1: Apantallamiento y clutter	58
4.2.1. Objetivo del ensayo	58
4.2.2. Procedimiento del ensayo	58
4.2.3. Procesado de datos	60
4.2.4. Resultados	60
4.2.5. Conclusión	62
4.3. Ensayo 2: Análisis de Scattering	63
4.3.1. Objetivo del ensayo	63
4.3.2. Procedimiento del ensayo	63
4.3.3. Adquisición de datos	64
4.3.4. Procesado de datos	65
4.3.5. Resultados del ensayo y discusión	65
4.4. Ensayo 3: Identificación de modelos de cimentación en un medio homogéneo	67
4.4.1. Objetivo del ensayo	67
4.4.2. Procedimiento del ensayo	67
4.4.3. Adquisición de datos	69
4.4.4. Procesado de datos	70
4.4.5. Resultados de los ensayos y discusión	70
4.5. Ensayo 4: estudio preliminar del efecto de corrosión en probetas con una única barra	74
4.5.1. Objetivo del ensayo	74
4.5.2. Procedimiento del ensayo	75
4.5.3. Adquisición de datos	75

4.5.4. Procesado de datos	76
4.5.5. Resultados y discusión	76
4.6. Ensayo 5: análisis preliminar del efecto de corrosión en probetas con múltiples barras	78
4.6.1. Objetivo del ensayo	78
4.6.2. Procedimiento del ensayo	78
4.6.3. Resultados y discusión	79
4.7. Conclusiones	80
5. ANÁLISIS DE CORROSIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍA GPR	83
5.1. Introducción	83
5.2. Metodología	84
5.2.1. Diseño de ensayos y descripción de las probetas.	85
5.2.2. Adquisición de datos	88
5.3. Resultados	89
5.3.1. Test A	89
5.3.1.1. Análisis cuantitativo	89
5.3.1.2. Análisis cuantitativo de la amplitud	91
5.3.2. Test B	94
5.3.2.1. Análisis cuantitativo	94
5.3.2.2. Análisis cuantitativo de amplitudes	96
5.4. Discusión	100
5.5. Conclusiones	102

6. CASO DE ESTUDIO: LA BASÍLICA DE SANTA MARIA DEL PI (BARCELONA)	105
6.1. Introducción	105
6.2. La basílica de Santa María del Pi	107
6.2.1. Edificación y estructura	107
6.3. Metodología	109
6.3.1. Ensayo no destructivo mediante GPR	110
6.3.2. Sísmica Pasiva (método del cociente espectral H/V)	113
6.4. Discusión y análisis de resultados	115
6.4.1. Análisis de la cubierta	115
6.4.2. Identificación de patologías en la cubierta	117
6.4.3. Caracterización del suelo a partir del análisis de cocientes espectrales	121
6.5. Conclusiones	125
7. CASO DE ESTUDIO: LA BASÍLICA DE SANTA MARIA DEL MAR (BARCELONA)	127
7.1. Introducción	127
7.2. Basílica Santa María del Mar	127
7.3. Métodos de inspección empleados	129
7.3.1. Metodología seguida en los análisis mediante radar	130
7.3.2. Método de Tomografía Sísmica	134
7.4. Análisis de los resultados	134
7.4.1. Estudio de la cubierta del edificio	136
7.4.2. Estudio de las columnas	142

7.4.3. Comportamiento dinámico de la estructura	146
7.5. Discusión y conclusiones	150
8. CASO DE ESTUDIO: PARQUE GUELL	153
8.1. El Parque Güell, un ejemplo de arquitectura civil modernista	153
8.2. El georradar en el estudio de daños en patrimonio	156
8.3. Problema estudiado, adquisición de datos y procesado	158
8.3.1. Adquisición de datos	159
8.3.2. Procesado	161
8.4. Discusión y análisis de resultados	162
8.4.1. Zona A - Plaza del parque	162
8.4.2. Zona B. Estudio del techo de la sala hipóstila	169
9. CASO DE ESTUDIO CASO DE ESTUDIO ESTRUCTURA DEL VASO DE UNA PISCINA	173
9.1. Introducción	173
9.2. Estructura Piscina	174
9.3. Metodología	176
9.4. Discusión y análisis de resultados	178
9.5. Conclusiones	183
10. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	185
10.1. Conclusiones particulares de cada análisis	185
10.1.1. Ensayos de laboratorio para calibración	185

10.1.2. Ensayos laboratorio para analizar la corrosión	186
10.1.3. Caso de estudio de la basílica de Santa María del Pi	188
10.1.4. Caso de estudio de la basílica Santa María del Mar	189
10.1.5. Caso de estudio del parque Güell	191
10.2. Conclusiones Generales	194
10.3. Futuras líneas de estudio	196
Trabajos derivados de esta Tesis	198
Futuras Publicaciones	199

11. REFERENCIAS

12. ANEXOS

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.1. Onda Electromagnética representada en tres dimensiones con sus componentes eléctrico y magnético.	20
Figura 3.1.2. Fenómeno de polarización a) Sin campo eléctrico aplicado, b) Con campo eléctrico aplicado (Adaptada de Rojas-Poveda, 2015).	23
Figura 3.1.3. Esquema del paso de la onda generada con frecuencias diferentes y un objeto con las mismas dimensiones (modificado de Krishnarajapete, 2015).	28
Figura 3.2.1. Esquema de los dos tipos de corrosión, por carbonatación y por cloruros.	29
Figura 3.2.2. Esquema del ingreso de carbonatación por el hormigón hacia la barra de acero y la ecuación química que se genera para la carbonatación.	30
Figura 3.2.3. Esquema del proceso de corrosión por iones cloruro.	31
Figura 3.2.4. Proceso de desprendimiento del hormigón por corrosión descrita en tres fases (Hong et al., 2014).	32
Figura 3.2.5. Daños por corrosión a) reducción de la sección del acero, b) pérdida de adherencia acero- hormigón.	33
Figura 3.2.6. a) Corrosión homogénea; b) Corrosión por picaduras.	34
Figura 3.2.7. Mecanismo del método de potencial espontáneo.	36
Figura 3.2.8. Esquema del método de Potencial de corrosión.	37
Figura 3.2.9. Esquema método del confinamiento modulado (Modificado de Andrade et al., 2001).	38
Figura 3.2.10. Esquema del cable en el método del refractómetro de dominio de tiempo (TDR) (Modificado de Hunsperger, 1982).	39
Figura 3.2.11. Esquema del método del refractómetro de dominio de tiempo (TDR).	40
Figura 3.2.12. Esquema del instrumento método del sensor inductivo. a) Inductor magnético. b) Colector magnético (Modificada de Miller et al., 2003).	41
Figura 3.2.13. a) Barra da dañada. b) Anomalia detectada por el instrumento (Miller <i>et al.</i> , 2003).	41
Figura 3.2.14. a) Barra no corroída b) Barra corroída (Hasan <i>et al.</i> , 2016).	42

Figura 3.2.15. Procesado en tres dimensiones de una zona que presentaba corrosión, en la que se puede ver la desaparición parcial de las barras (Kabir & Zaki, 2011).	43
Figura 3.3.1. Esquema del equipo radar.	44
Figura 3.3.2. Registro puntual o A-scan.	46
Figura 3.3.3. Radargrama o B-scan.	47
Figura 3.3.4. Geometría de las hipérbolas de reflexión (Modificada de Huston et al, 2001).	48
Figura 3.3.5. a) Huella muy amplia, b) huella concentrada (Modificada de Huston et al, 2001).	49
Figura 3.3.6. Esquema de <i>Common Mid Point</i> (Modificada de Gruber <i>et al</i> , 1996).	49
Figura 3.3.7. Esquema y representación del WARR (Modificada de Gruber et al, 1996).	50
Figura 3.3.8. Disposición del instrumento y resultados (Modificado Huiman et al, 2003).	50
Figura 3.3.9. Zoom de una zona del radargrama a) Radargrama con ruido. b) Radargrama con ruido eliminado (Ostoori et al, 2003).	51
Figura 3.3.10. a) Radargrama de la cubierta de la Iglesia Santa María del Mar. b) Radargrama con topografía corregida por efecto de las bóvedas (Capítulo 5).	52
Figura 3.3.11. a) Corrección a tiempo cero (Yelf , 2006).	53
Figura 3.3.12. Amplificación de la amplitud en el tiempo empleando AGC.	53
Figura 3.3.13. Modelo de la aplicación de la migración y lo que genera (Gómez, 2008).	54
Figura 3.3.14. Dewow filtering.	54
Figura 3.3.15. Filtro paso alta a) Dominio temporal, b) Dominio frecuencial.	55
Figura 3.3.16. Filtro paso baja a) Dominio temporal, b) Dominio frecuencial.	55
Figura 3.3.17. Filtrado espacial de baja frecuencia.	56
Figura 3.3.18. Filtro espacial de alta frecuencia.	56

Figura 4.1. Esquema del ensayo 1, a) Desplazamiento del redondo de acero a 40cm sobre el plano de la mesa en la que se sitúa la antena, b) Desplazamiento a 40 cm por debajo del plano en el que se sitúa la antena.	59
Figura 4.2. Esquema del ensayo 2. La placa metálica se desplaza en dirección a la antena.	60
Figura 4.3. a) Esquema del ensayo 3. Recorrido de la placa metálica en dirección a la antena; b) Fotografía del dispositivo utilizado para el ensayo 3.	60
Figura 4.4. Ensayo 1. Radargrama del redondo de acero desplazándose a 40cm sobre el nivel de la antena.	61
Figura 4.5. Ensayo 1. Radargrama del redondo de acero desplazándose a 40cm por debajo del nivel de la antena.	61
Figura 4.6. Radargrama del ensayo 2. Placa metálica con acercamiento lateral (velocidad constante en dirección de la antena).	62
Figura 4.7. Radargrama del ensayo 3. Placa metálica con acercamiento lateral en dirección de la antena, con pausas de 5 segundos para cada intervalo de desplazamiento de 15cm.	65
Figura 4.8. Ensayo para el análisis de scattering: a) Detalle sobre la ubicación del material granular. b) Esquema del posicionamiento de la antena de radar sobre la cubeta.	65
Figura 4.9. Ensayo para el análisis de scattering. Esquema de adquisición de datos, R1 indica la dirección de las trazas.	65
Figura 4.10. Ensayo para análisis de scattering. Radargrama longitudinal representativo.	66
Figura 4.11. Construcción de la zapata a escala de hormigón armado: a) Medidas de la zapata a escala, b) Encofrado y armado de la zapata, c) Hormigonado de la zapata, c) y d) Modelo a escala terminado.	69
Figura 4.12. Ensayo con elementos de cimentación a escala de hormigón armado: a) Cubeta y posición de la zapata a escala antes de cubrir con arena, b) Cubeta y zapata después de cubrir totalmente con arena, c) Nivelación de las capas, d) Modelo cubierto preparado para la adquisición.	69
Figura 4.13. Ensayo con elementos de cimentación a escala. Alzado y Planta de la zapata a escala y de su posición relativa respecto a los límites de la cubeta.	70
Figura 4.14. Ensayo con elementos de cimentación a escala a) Esquema de	71

adquisición de datos, b) Posicionamiento sobre la cubeta de la placa rígida que contiene la retícula, c) Adquisición de datos, d) Trazas de radar a procesar utilizando el programa GPR Slice.

Figura 4.15. Ensayo con elementos de cimentación a escala y terreno seco. Radargrama longitudinal cuya traza pasa por el medio de la cubeta y coincide con el eje del modelo de zapata a escala. 72

Figura 4.16. Ensayo con elementos de cimentación a escala y terreno seco. Secciones horizontales generadas con el programa GPR Slice, cada 3cm. 72

Figura 4.17. Ensayo con elementos de cimentación a escala y terreno seco. Sección vertical del volumen generado en el programa GPR Slice. 73

Figura 4.18. Ensayo con elementos de cimentación a escala y terreno saturado. Secciones horizontales generadas con el programa GPR Slice cada 3cm. 73

Figura 4.19. comparativo de corrosión. Geometría de las probetas. 76

Figura 4.20. Estudio comparativo de corrosión. a) Esquema de adquisición de datos, b) Etapa de adquisición de datos con antena de alta frecuencia. 76

Figura 4.21. Estudio comparativo de corrosión. Radargrama longitudinal, a) Radargrama original sin procesar, b) Interpretación del radargrama. 77

Figura 4.22. Ensayo sobre corrosión. Geometría de la muestra. 80

Figura 4.23. Ensayo sobre corrosión. a) Esquema de adquisición de datos, b) Mediciones sobre la probeta de hormigón colocada en el banco de arena. 80

Figura 4.24. Ensayo sobre corrosión. Radargrama longitudinal. 81

Figura 5.1. Ensayo de compresión simple. a) Preparación de probeta de 10cm de diámetro y 20cm de alto, b) Detalle del ensayo. 85

Figura 5.2. Adquisición de datos. a) Trazas transversales en el Test A; b) Trazas longitudinales en el Test A; c) Esquema de adquisición de datos en el Test B; d) Preparación de las muestras (especímenes enterrados en arena Test A; e) Preparación de las muestras, especímenes enterrados en arena Test B. 88

Figura 5.3. Interpretación de las perfiles, (a, b) Probeta R1, (c, d) Probeta R2 y (e, f) Probeta R3, (g) Orientación de las perfiles (B-scan) respecto de las probetas. 90

Figura 5.4. Interpretación de las perfiles, (a, b) probeta R4 y (c, d) probeta R5, (e) Orientación de las perfiles (B-scan) respecto de las probetas. 91

Figura 5.5. a) A-scan probeta R1-A; b) A-scan probeta R2-A; c) Valor absoluto 92

de amplitud probeta R1-A; d) Valor absoluto de amplitud probeta R2-A y e) Líneas de adquisición, cada color corresponde a una línea de radar diferente en la misma prueba.

Figura 5.6. Amplitud de la onda reflejada versus tiempo (a) Probeta R1-A (barra no corroída); (b) Probeta R2-A (barra corroída). 93

Figura 5.7. Test A- Diferencia entre las dos probetas. En la probeta R2 se observa un anillo corroído alrededor de la barra de refuerzo. 94

Figura 5.8. Test B, B-scan e interpretación para las cuatro probetas. a-b) B-scan e interpretación para S-1B; c-d) B-scan e interpretación para S-2B; e-f) B-scan e interpretación para probeta S-3B; g-h) B-scan e interpretación para S-4B. 95

Figura 5.9. A- scan de muestras obtenidas en el Test B: a) R1-B (armadura no corroída); b) R2-B (3 meses de corrosión); c) R3-B (6 meses de corrosión); d) R4-B (12 meses de corrosión); e) Orientación de los perfiles, cada color corresponde a un perfil diferente en la misma prueba. 96

Figura 5.10. Valor absoluto de las amplitudes de los A- Scan en el Test B: a) R1-B (armadura no corroída); b) R2-B (3 meses de corrosión); c) R3-B (6 meses de corrosión); d) R4-B (12 meses de corrosión); f) Perfiles de radar, cada color corresponde a un perfil de muestreo diferente en la misma prueba. 97

Figura 5.11 Decaimiento de la amplitud de la onda reflejada en la barra metálica. a) Probeta R1-B (barra de refuerzo no corroída); b) Probeta R2-B (3 meses de corrosión); c) Probeta R3-B (6 meses de corrosión); d) Probeta R4-B (12 meses de corrosión). 98

Figura 5.12. Coeficiente de atenuación en función del tiempo de corrosión para los ensayos del Test B. 99

Figura 5.13. Esquema del efecto de la corrosión de las armaduras en el hormigón de las probetas. a) Hormigón no afectado con armadura exenta de corrosión; b) Hormigón afectado en el volumen en contacto con la armadura afectada por corrosión. 100

Figura 6.1. a) Fachada frontal, b) Vista aérea de la planta de la basílica de Santa María del Pi y de su campanario octogonal situados en el distrito Ciutat Vella de Barcelona. 104

Figura 6.2. Planta actual de la basílica de Santa María del Pi (Barcelona) con el detalle de las ampliaciones y modificaciones de la construcción original y el 108

período en el que fueron realizadas.

Figura 6.3. Perfiles GPR (GPR lines) adquiridos sobre la cubierta de la basílica de Santa María del Pi (Barcelona): P1 perfil lateral; P2-P3 perfiles cortos sobre las capillas; P4 perfil perimetral; P5 perfil transversal. 109

Figura 6.4. Adquisición de datos con equipo GPR sobre la cubierta de la basílica de Santa María del Pi (Barcelona). 110

Figura 6.5. Trazas de radargramas en la cubierta de la basílica de Santa María del Pi (Barcelona). a) Plano en planta y posición del perfil P4 utilizado para ilustrar el procesado de radargramas; b) Fotografía interior de la cubierta con el perfil P4 proyectado. 110

Figura 6.6. Sección del perfil P4 seleccionado para ilustrar el procesado de radargramas a) Radargrama procesado; b) Corrección topográfica aplicada al radargrama. 111

Figura 6.7. Sísmica pasiva en la basílica de Santa María del Pi (Barcelona). a) Posición, relativa a la planta de la basílica, de los puntos de registro; b) Imagen de los sensores situados en el perímetro exterior (b.1) y en el interior de la basílica (b.2). 113

Figura 6.8. Reconocimiento de elementos arquitectónicos detectados en los registros. a) Registro de radar procesado mostrando un tramo del perfil P4; b) Interpretación del registro mostrando las principales anomalías asociadas a elementos arquitectónicos; c) Situación del perfil sobre la cubierta; d) Bóveda vista desde el interior de la basílica. 115

Figura 6.9. Prospección GPR de la cubierta de la basílica de Santa María del Pi (Barcelona): a) Geometría de la cubierta modelada a partir del procesado de radargramas; b) Fotografía de la superficie de la cubierta. c) Fotografía de la cubierta vista desde el interior de la basílica. La línea blanca muestra la posición aproximada del perfil de radar efectuado sobre la superficie de la cubierta. 116

Figura 6.10. Sección del perfil P4 registrado en la cubierta de la basílica. Identificación del material de relleno en la intersección de las bóvedas (Anomalías A1, A2, A3 y A4). 117

Figura 6.11. Sección del perfil P4 registrado en la cubierta de la basílica. Detalle de las diferencias entre las imágenes ampliadas correspondientes a las anomalías A1 y A2 detectadas en el perfil P4. 117

Figura 6.12. Comparación de amplitudes correspondientes a las trazas de las anomalías A1(a) y A2 (b).	118
Figura 6.13. a) Ubicación del radargrama P4 sobre la planta de la cubierta de la basílica de Santa María del Pi; b) Ampliación de la zona de anomalías de tipo A2.	119
Figura 6.14. Cubierta de la basílica de Santa María del Pi (Barcelona). a) Representación 3d de la cubierta con los puntos de drenaje, b) Sistema de drenaje de la cubierta.	120
Figura. 6.15. Resultados del ensayo de Nakamura de los puntos más representativos.	121
Figura 6.16. Resultados del método del cociente espectral H/V aplicados al suelo bajo la basílica de Santa María del Pi (Barcelona). Plano en el que se distinguen las áreas de terreno firme respecto de áreas con terreno de relleno.	123
Figura 7.1. (a) Fotografía aérea de la iglesia, en el barrio de la Ribera. (b) Fotografía de la fachada principal.	128
Figura 7.2. Planos Basílica Santa María del Mar (a) Planta y (b) alzado de la iglesia Santa María del Mar (Herrera, 2012).	129
Figura 7.3. Perfiles de GPR: (a) Perfil alrededor de la estructura cilíndrica, (b) Perfil sobre la nave lateral de la cubierta. (c) Perfiles sobre la nave principal de la cubierta, (d) Columnas evaluadas con perfiles GPR, la columna del PC9 también ha sido evaluada con tomografía sísmica (e) Perfiles GPR sobre los capiteles de la cubierta, (f) Perfiles sobre el terreno.	132
Figura 7.4. Columna evaluada con Tomografía sísmica.	134
Figura 7.5. (a) Fotografía de la tomografía sísmica de la columna, (b) Simulación de la cobertura de la columna, suponiendo que es una columna homogénea ideal.	135
Figura 7.6. Ubicación del monitoreo sísmico (los números indican la posición de los sensores).	135
Figura 7.7. Ejemplo de uno de los radargramas obtenidos en la cubierta de la iglesia. Pueden distinguirse cuatro zonas diferentes: A) Zona sobre los arcos en las que se observan las reflexiones producidas en el contacto entre las capas de mampostería de piedra caliza que conforman la parte superior del arco o de la bóveda; B) Zona situada entre cada bóveda y parte inferior de los arcos, en la que pueden verse anomalías diversas de pequeño tamaño, asociadas con materiales irregulares de relleno, y también se observan unas anomalías con forma de	138

hipérbola que se corresponden con elementos cilíndricos huecos utilizados para aligerar las cargas de la cubierta; C) Zona que se corresponde con la unión de las columnas y los arcos, en la que se observa la reflexión producida en los capiteles de las columnas que soportan las bóvedas; D) Zona correspondiente con el contacto entre las bóvedas y los muros de carga, en la que pueden verse anomalías producidas en la reflexión en los materiales homogéneos de los muros.

Figura 7.8. (a) Perfil P4 sobre la cubierta. Se puede observar la superficie ondulada debida a las bóvedas interiores. (b) Corrección topográfica de parte del radargrama obtenido a lo largo del perfil P4. Este tramo cruza dos arcos y tres columnas de la basílica.

140

Figura 7.9. El espesor de la estructura de la cubierta en la zona cerca a los muros de carga indica una velocidad de onda de unos 15 cm/ns (asumiendo sillares de piedra y relleno de mortero homogéneo). La distancia entre bóvedas es de 15 m. El espesor del material sobre las vasijas huecas utilizadas para aligerar cargas es de 75 cm.

141

Figura 7.10. (a) Adquisición de datos radar en la cubierta situada sobre la nave principal con una antena de 900 MHz. (b) Situación de los perfiles sobre el techo. (de c a f) Radargramas obtenidos en los perfiles P5, P6, P7 y P8 respectivamente.

142

Figura 7.11. La denominación *Pc* corresponde a los ensayos con georadar, y la denominación *Tomo* corresponde a la tomografía sísmica.

143

Figura 7.12. a) Adquisición de datos con una antena de 900 MHz y situación de dos de los perfiles sobre una de las columnas. b) Radargrama obtenidos en el perfil A. c) Radargrama obtenido en el perfil B. d) Interpretación de radargrama obtenidos en el perfil A, b) Interpretación de a obtenidos en el perfil A.

144

Figura 7.13. Modelo BIM (*Building Information Modeling*) de la columna. a) Ubicación del perfil de georadar, b) Sección de la columna en la línea del perfil, mostrando la posición de la sillería de piedra.

145

Figura 7.14. Tomografía sísmica de la columna en la iglesia de Santa María del Mar.

146

Figura 7.15. Modelo BIM del proceso constructivo de las columnas.

146

Figura 7.16. (a) Espectro transversal en el punto 4 (línea discontinua) y en el punto 6 (línea continua), (b) Espectros longitudinales en el Punto 1 (línea discontinua) y el Punto 6 en la fachada (línea continua).

147

- Figura 7.17.** (a) Longitudinal (línea continua) y transversal (línea discontinua) en Punto 7 en la torre, (b) Movimiento de partículas del modo de 2,35 Hz en el punto 7 de la torre. 148
- Figura 7.18.** Radargrama obtenido con la antena de frecuencia central de 200 MH frente a la fachada principal, fuera de la basílica. 149
- Figura 7.19.** Radargrama dentro de la Iglesia, adquirida con una antena de frecuencia 200 MHz. 150
- Figura 8.1.** Sala Hipóstila Parque Güell. a) Vista isométrica de la sala hipóstila, b) Fotografía de la plaza central situada sobre la cubierta de la sala hipóstila. El suelo no está revestido. Destacan los bancos perimetrales. c) Fotografía de la cubierta desde el interior de la sala mostrando las rosetas, la ornamentación de cerámica y las bóvedas. 154
- Figura 8.2.** a) Planta de la sala hipóstila en la que puede verse la posición de las columnas. b) Sección de la sala hipóstila. La forma de la sección se adapta a la topografía del terreno y deja un espacio para la sala de almacenamiento de agua. 155
- Figura 8.3.** a) Las dos zonas (A y B). La zona A está en la plaza, en la parte superior de la losa, cubierta de suelo arenoso; la zona B está en el techo de la sala hipóstila, en el fondo de la losa cubierta con revestimiento de fragmentos de cerámica. b) Fracturas observadas en la zona A en la inspección visual. c) Daño observado en la zona B, en uno de los casquetes esféricos de las bóvedas del techo inferior de la sala hipóstila. 159
- Figura 8.4.** Adquisición de datos con GPR. a) Fotografía de la adquisición de datos en Zona A con antena de frecuencia central de 400 MHz. b) Planta de la plaza indicando la posición de las zonas A y B. c) Perfiles de radar en la Zona A. d) ubicación de la extracción de testigo Zona A y detalle de un testigo de perforación. (e y f) Adquisición con antena de frecuencia central de 2GHz sobre la cerámica Zona B (cubierta de la sala hipóstila) y g) Ubicación de los perfiles Zona B. 160
- Figura 8.5.** Radargrama obtenido en el perfil R1, situado sobre el eje central de la plaza. En la interpretación se indican los diferentes elementos en los que se han podido generar las anomalías. 163
- Figura 8.6.** Radargrama R7, sección que atraviesa dos bóvedas sin columna intermedia con su interpretación. 164

Figura 8.7. Radargrama R8, sección que atraviesa dos bóvedas sin columna intermedia con su interpretación.	165
Figura 8.8. Radargrama obtenido en el perfil R5. Los círculos blancos indican la posición de las barras que podrían estar afectadas por corrosión. Los círculos negros serían las barras sanas, la línea punteada que atraviesa casi todo el perfil es una posible barra longitudinal.	166
Figura 8.9. Radargrama obtenido en el perfil R4. Los círculos blancos indican la posición de las barras que podrían estar afectadas por corrosión. Los círculos negros serían las barras sanas, la línea punteada que atraviesa casi todo el perfil es una posible barra longitudinal.	166
Figura 8.10. Radargrama obtenido en el perfil R6, en el que se observa el cambio en la pendiente de los brazos de las hipérbolas producidas en las barras transversales afectadas por corrosión.	167
Figura 8.11. Modelo tridimensional de la estructura.	168
Figura 8.12. Hipótesis de acumulación de humedad en la losa por estancamiento del drenaje central.	169
Figura 8.13. Perfiles adquiridos Zona B.	169
Figura 8.14. a) Radargrama obtenido en el perfil R14, una vez se ha invertido. b) El mismo radargrama tras aplicar la corrección topográfica. c) Interpretación de los datos.	170
Figura 8.15. a) Fotografía real Zona 2 y línea de radar, b) Elemento de cerámica (posiblemente colgado), c) Radargrama R14 con la corrección topográfica.	170
Figura 9.1. Vista aérea de la ubicación de la piscina en la población de Centelles, Barcelona (Fuente: Google-earth).	174
Figura 9.2. Esquema y dimensiones del vaso de la piscina.	175
Figura 9.3. Zonas de adquisición de datos en el vaso de la piscina, a) Zona de adquisición Antena de 500MHz, b) Zona de adquisición Antena de 1600MHz.	177
Figura 9.4. Radagramas empleados para el análisis, zona roja, Antena 1600MHz, zona azul antena 500MHz.	177
Figura 9.5. Radagramas introducidos al programa GPRslice (Imagen que genera el programa de los perfiles de radar introducidos, en la que se ve la alta densidad de perfiles).	178

Figura 9.6. Análisis de secciones y comparación de dos radargramas paralelos y separados 20cm. a) Radagrama 2159 registrado con antena de 500MHz, b) Radagrama 2245 registrado con antena de 1600MHz.	179
Figura 9.7. Análisis de radagramas y zonificación de anomalías a) Radagrama 2185, b) Radagrama 2195, c) Radagrama 2205 y d) Radagrama 2215.	180
Figura 9.8. Análisis de radagramas y zonificación de anomalías a) Radagrama 2155, b) Radagrama 2151, c) Radagrama 2147 y e) Radagrama 2142.	181
Figura 9.9. Secciones horizontales generadas por el programa GPR Slice, las secciones han sido generadas cada 10 cm partiendo de cota de superficie asumiendo que este es nivel 0, a medida que las secciones avanzan se pueden ver diferentes anomalías.	182
Figura 9.10. Esquema de la sección constructiva de la base del vaso de la piscina.	182
Figura 9.11. Reconstrucción 3D a partir de los radargramas más representativos.	183

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.1. Tabla con valores de conductividad y de permitividad dieléctrica relativa (Rojas-Poveda, 2015).	22
Tabla 3.1.2. Velocidad de propagación de onda de algunos materiales (Munuera, 2016).	27
Tabla 5.1. Tiempo de corrosión de las muestras en la cámara de curado Test A y Test B.	87
Tabla 5.2. Parámetros de adquisición de datos de radar.	89
Tabla 5.3. Atenuación de la amplitud de onda reflejada con el tiempo. Ajuste de parámetros para el Test A.	93
Tabla 5.4. Coeficientes de atenuación para el Test B.	98
Tabla 8.1. Cálculo de la constante dieléctrica.	162

CAPITULO 1- INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Las edificaciones históricas, por su valor patrimonial, requieren de trabajos de preservación permanente que pueden ir desde un mantenimiento rutinario hasta la reconstrucción de elementos específicos de relativa magnitud, pasando por todo tipo de rehabilitaciones. Para esto es necesario disponer de técnicas que brinden un diagnóstico preciso, de gran versatilidad (Daniels D., 2004), preferentemente no invasivas (Pérez Gracia V., 2001) por el incalculable valor de estas edificaciones, que proporcionen resultados a través de gráficos o imágenes de alta resolución en tiempo real (Daniels J., 2000) de fácil interpretación y que además permitan al investigador interactuar con el medio en estudio (Barraca N. et al 2016).

En el estudio de una edificación patrimonial deben analizarse distintos aspectos, como son el estado de las cimentaciones, el estado de conservación de los materiales, las modificaciones que se han realizado a lo largo de su historia, el estado de los elementos de su infraestructura y la detección de patologías diversas (Gosalbez J. et al 2011, Barraca N. et al 2016).

El estudio de patologías es fundamental para un correcto mantenimiento de cualquier infraestructura. Dada la amplitud de patologías que puede presentar una construcción patrimonial, es necesario un análisis particular de cada una de ellas, sobre todo enfocado a las fases tempranas del daño, antes de que resulte visible. Algunas patologías son la causa de grandes daños a largo plazo en las estructuras. En el caso de elementos de hormigón con piezas metálicas embebidas, la corrosión es una patología común especialmente en ambientes agresivos. Otras patologías presentes en estructuras de hormigón y o de mampostería de piedra es la presencia de cavidades (Saribudak M. et al 2009), grietas, y humedades (Daniels J., 2000).

La evolución tecnológica permite disponer de métodos y de equipos de prospección no destructiva que permiten detectar las patologías anteriormente mencionadas. Entre los más utilizados se encuentra la termografía infrarroja (Moropoulou A. et al 2013), los ensayos mediante ultrasonidos (Viveros O. 2008), los estudios mediante campos

electromagnéticos como el GPR (Pérez-Gracia V. 2001) y el método de “Time domain reflectometry” (TDR) (Zegelin et al., 1989; Pavlík et al., 2006), los ensayos de resistividad eléctrica (Oh B.H. et al 1999; Lim Y. et al 2009) y otros como la prospección microgravimétrica (Arzi, 1975) o la prospección sísmica (Silverman, 1979).

Durante las últimas décadas, el radar de subsuelo (GPR) se ha aplicado a menudo en estudios de rehabilitación de edificios históricos, principalmente para la evaluación de las estructuras en construcciones de mampostería de piedra (Perez-Gracia et al, 2000) y para el estudio de daños por filtración de agua y humedad (Reci et al., 2016; Maierhofer et al, 2001). Este método es muy sensible a los cambios en la conductividad eléctrica del medio, por lo que además, permite detectar fácilmente las barras de acero y otros elementos metálicos embebidos en hormigón armado o en mampostería, ya que el metal (y en concreto, el acero) tiene un coeficiente de reflexión próximo a la unidad como consecuencia del elevado contraste entre su conductividad y la del hormigón o la mampostería (Chang et al 2009, Barrile et al 2005, Shaw et al 2005). El método también permite detectar huecos y grietas en el interior de los materiales mediante variaciones en la amplitud de la señal registrada y en la relación señal/ruido en las trazas debido a la dispersión de las ondas producida por las pequeñas alteraciones del medio. Hoy en día se utiliza en muchos casos el GPR para estudiar grietas, oquedades o humedad, y para detectar elementos metálicos embebidos. Sin embargo, el análisis de corrosión de los elementos metálicos en el interior de estructuras es menos frecuente y son pocos los estudios dedicados a este tema.

Diversos estudios han observado que las señales de GPR presentan variaciones que se pueden relacionar con la presencia de elementos afectados por corrosión, señalando la posible utilidad de este método para un análisis rápido de elementos estructurales. Estos estudios han tenido como objetivo la detección de corrosión mediante análisis cualitativos y comparativos (Zaki et al., 2018; Wong et al 2018, Hong et al 2012 Lai et al 2010, He 2009, Hubbard et al 2003, Daniels J. 2000). Otros métodos de inspección no destructiva no parecen mostrar la misma sensibilidad que el radar frente a este tipo de daño estructural. Por otro lado, como se trata de un método no destructivo (Pérez Gracia, 2001) puede aplicarse en construcciones patrimoniales, permitiendo además analizar superficies extensas de forma sencilla y rápida. El método permite utilizar

tiempos cortos de ensayo, puede abarcar grandes superficies (Moropoulou A. et al 2013), presenta imágenes en tiempo real del área de estudio (Daniels et al 2004) y posibilita un análisis numérico de las ondas para lograr mayor precisión en el análisis (Abdul-Ghani et al 2012).

El objetivo principal de esta tesis es la evaluación del GPR como instrumento para detectar daños en estructuras: grietas, humedad y corrosión, enfocando principalmente el estudio hacia el último caso. Para ello se han diseñado diversos ensayos de laboratorio con el objetivo de analizar la respuesta de la señal de radar en el caso de corrosión en barras embebidas en hormigón, intentando determinar relaciones cuantitativas que permitan aplicar el método a estructuras construidas para determinar con una cierta certeza si los elementos metálicos ocultos están afectados o no por esta patología.

La corrosión es uno de los problemas más frecuentes en estructuras de hormigón armado. Se trata de una patología propia del acero que, a medio y a largo plazo, puede causar daños significativos a los elementos estructurales, principalmente debido a dos factores:

- La degradación del acero, que puede llegar a ocasionar la disminución de la sección efectiva y, en casos muy avanzados, incluso llegar hasta la pérdida total de sección (Al-Sulaimani, et al 1990, Rodriguez, J. Et al 1997, Francois, R. et al 2018).
- La pérdida de adherencia que se produce entre el elemento metálico y el cuerpo de hormigón, debido al sustrato de material de acero oxidado de baja densidad y hormigón alterado que se aparece en la interface armadura-hormigón (Calleja J. et al 1973, Rojas-Klein L. 2006).

Actualmente se sabe que la corrosión de las barras metálicas es la principal causa de daño en estructuras o elementos de hormigón armado (Bhaskar S. et al 2015), que puede empeorar por la existencia de humedad o de grietas en la estructura que permiten filtraciones de agua hasta los elementos metálicos. La corrosión es un efecto tan negativo que ha causado grandes desastres en los que se han producido pérdidas humanas y materiales, como es el caso del colapso del puente sobre el río Mississippi en Minneapolis el año 2007 (Wang Z. et al 2011). La importancia de mantener en buen

estado las estructuras y como la corrosión es una patología que cuando ya es visible ha ocasionado grandes daños, hacen que la detección elementos afectados por corrosión en fases tempranas sea un objetivo destacado en los estudios de mantenimiento y control. Como esta patología se inicia en muchos casos sin que la puedan detectar mediante inspecciones visuales debido a que las armaduras están recubiertas y no son visibles, se hacen necesarios métodos de control permanente, periódico o esporádico de los diferentes elementos estructurales de las edificaciones.

Esta patología, además de afectar a estructuras de hormigón armado, también se presenta en estructuras históricas en las que hay elementos metálicos embebidos tanto debido a los métodos constructivos de la época -por ejemplo, en el caso de construcciones modernistas (Santos-Assunção et al., 2014) o patrimonio que han sufrido restauraciones a lo largo de su historia y para las cuales se han utilizado piezas metálicas, como sería el caso de grapas metálicas para unir sillares de piedra en estructuras medievales (Himi et al., 2016).

1.2. Desarrollo del estudio

La tesis se estructura en diez capítulos, descritos a continuación:

En el capítulo 1 se plantea la problemática, se definen los objetivos y el alcance del trabajo.

En el capítulo 2 se describe el estado del arte, se hace un resumen de la evolución del método GPR y se detallan los avances en los trabajos de investigación realizados hasta la fecha.

Las bases teóricas, tanto del método como del proceso de corrosión se recogen en el capítulo 3. En este mismo capítulo se describe el equipo, los métodos de adquisición de datos, la visualización de los registros y se explican los filtros que se suelen aplicar durante el procesado de las señales.

Tras los capítulos introductorios y teóricos se pasa la parte experimental y de análisis de casos de estudio, fundamentales para desarrollar los objetivos propuestos. Por las particularidades y por extensión de cada uno de los ensayos y casos aplicados, se presentan en capítulos independientes.

En el capítulo 4 se presentan los ensayos de laboratorio realizados con el objetivo de conocer el equipo que será utilizado para las pruebas de corrosión, se realizan pruebas de calibración apantallamiento y efectos de la señal, posteriormente se realiza las primeras pruebas de corrosión con el objetivo de plantear los lineamientos de diseño de los ensayos, como tamaño de las probetas, separación de barras mínima y medio óptimo que proporcione las condiciones adecuadas de adquisición.

En el capítulo 5 se presentan los ensayos de laboratorio realizados para analizar corrosión en elementos metálicos embebidos en un medio que puede considerarse como homogéneo. En este capítulo se incluyen los objetivos y el diseño de los tests, se describen los ensayos y las adquisiciones de datos experimentales, se analizan los resultados y se comparan los efectos en la señal con los datos conocidos que se tienen sobre la corrosión de cada elemento utilizado en cada uno de los ensayos, por último se realiza un análisis cuantitativo de la señal en barras sanas y corroídas, los resultados son una contribución importante al estudio de corrosión con GPR.

El capítulo 6 (Caso de estudio en la iglesia de Santa María del Pi, en Barcelona) presenta el procedimiento y los resultados del estudio de una iglesia gótica. En esta construcción se habían observado principalmente dos problemas: filtraciones de agua en la cubierta y existencia de posibles rellenos en la cimentación. Se utilizaron dos métodos de prospección geofísica para un estudio completo: el GPR para el análisis de la cubierta y sísmica pasiva (método de Nakamura) para estudiar el terreno sobre el que se asienta la iglesia, con el objetivo de localizar las zonas con materiales de relleno. Los resultados de radar muestran sectores con anomalías que se pueden asociar con la existencia de humedad, lo que permitió obtener un mapa de humedades de la cubierta, llegando incluso a situarse las posibles zonas de filtración. En el subsuelo se pudieron identificar materiales de menor densidad, asociados a rellenos. Con estos datos, también se obtuvo un mapa del terreno, en el que se situaban las zonas más problemáticas del subsuelo.

En el capítulo 7 (Caso de estudio en la iglesia de Santa María del Mar, en Barcelona) se presenta el estudio de la estructura de la cubierta del templo gótico y de las columnas, utilizando una combinación de GPR y tomografía eléctrica. Estas columnas son grandes elementos de mampostería en los que no se espera detectar elementos metálicos, pero que presentan daños visibles por grietas. Las imágenes obtenidas mediante los dos

métodos de estudio permitieron determinar las juntas de mortero separando los sillares, en el interior de la columna, de manera que se obtuvo un mapa de la posición geométrica de cada pieza de mampostería de piedra. Esto proporcionó un mayor conocimiento de la técnica constructiva. Al estudiar el estado de la cubierta se pudo determinar la distribución de los materiales constructivos, lo que permitió descubrir las técnicas que se utilizaron para disminuir las cargas sobre la columnas de gran esbeltez.

El capítulo 8 (Caso de estudio en el Parque Güell, en Barcelona), presenta el estudio de la losa de la sala hipóstila del parque, en la que, en inspecciones visuales, se detectaron problemas de humedad y de desprendimiento de mosaicos. El análisis se realiza únicamente mediante inspección visual y GPR, comparando los resultados con algunas catas. Los resultados muestran la ubicación de barras metálicas en el interior la estructura modernista, y también indicios de corrosión en algunas zonas, resultados que posteriormente son corroborados con sondeos de penetración con extracción de testigo.

En el capítulo 9 (Caso de estudio de una piscina municipal, en Centelles), se presenta el estudio de la única estructura que no es patrimonial. Se trata de una piscina en la que se han detectado filtraciones y que sirve como ejemplo de estudio de problemas por humedad y corrosión. Con este ejemplo se ha podido comprobar la respuesta del radar en el caso de corrosión de elementos en un hormigón armado construido con tecnología y normativas actuales. Una previa inspección visual permitió observar que la piscina de hormigón armado presentaba grietas visibles y filtraciones que se podían asociar con asientos diferenciales o con daño interno estructural. Las imágenes de radar han permitido identificar claramente la posición de las barras de acero en el interior del hormigón. Además, muestran la existencia de cambios en la uniformidad de las reflexiones asociadas con las barras metálicas. Estos cambios, se asocian con indicios de corrosión en algunas barras.

El capítulo 10 presenta las conclusiones tanto de los ensayos de laboratorio como de cada uno de los casos de estudio, y también las conclusiones finales de la tesis. A continuación, se analiza la técnica aplicada a este tipo de patologías, describiendo ventajas, inconvenientes y advertencias para cada uno de los casos analizados, y se sugieren futuras líneas de investigación con las que continuar estos estudios, para profundizar más en la obtención de resultados cualitativos que indiquen grados de daño en estructuras, tanto históricas como actuales.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo principal de esta tesis es el análisis del método de GPR para el estudio de daños en estructuras, haciendo especial hincapié en el caso de edificaciones históricas, dada la complejidad que presentan y la necesidad de preservarlas. Las patologías que se han analizado son: grietas, fisuras, humedad y corrosión. En los tres primeros casos existen numerosas aplicaciones y publicaciones, aunque en muchas de ellas no se llega a obtener un mapa completo de daños. En el caso de corrosión, aunque la detección de elementos metálicos es sencilla, la valoración de posibles daños de estos elementos es más compleja y las únicas referencias encontradas son algunas aplicaciones en las que se analiza de forma cualitativa. En esta tesis se analiza el efecto que la corrosión de las barras de acero o de los elementos metálicos insertados en las estructuras, produce sobre las señales de GPR. Para ello se efectúa una valoración tanto cualitativa como cuantitativa, a partir de ensayos de laboratorio y de aplicaciones de campo. En cada uno de los casos estudiados se detallan los efectos que producen estas patologías en las señales registradas por el instrumento.

1.3.2. Objetivos específicos

Para poder alcanzar el objetivo general del trabajo, se han definido unos objetivos específicos más concretos:

1. Elaboración de un estado del arte exhaustivo de la técnica seleccionada, aplicada a los casos de daño que se estudiarán en la tesis.
2. Descripción de los parámetros de las señales de GPR que pueden indicar existencia de daños en estructuras.
3. Análisis de su aplicación edificios históricos, estudiando las posibles patologías, combinándolo con otros métodos.
4. Estudio específico enfocado al efecto de los daños por corrosión sobre las señales de GPR. Este estudio se realiza de forma experimental mediante ensayos controlados en

laboratorio. Los resultados se aplican en el análisis de dos casos de estudio, uno de ellos en una estructura histórica y patrimonial, y el otro en una estructura actual.

Por otro lado, en cada uno de los casos estudiados se han planteado unos objetivos más concretos, acordes a la problemática particular de cada caso.

1. En el caso de estudio de la iglesia de Santa María del Pi se pretende:

- Realizar con GPR un mapa de humedad de la cubierta.
- Utilizando sismica pasiva mediante el método de coeficiente espectral H/V, localizar y hacer un mapa en planta de los materiales de relleno en el subsuelo dentro de la basílica y alrededores.
- Analizar la eficiencia del radar de subsuelo para este tipo de estudios.

2. En el caso de estudio de la iglesia de Santa María del Mar se pretende:

- Utilizando la técnica de GPR, realizar la inspección no invasiva de las columnas de la iglesia para observar su estructura interna y localizar posibles daños debidos a despegues, grietas o humedad.
- Identificar diferencias en las señales cuando las reflexiones se hayan producido en los contactos entre materiales (piedra-mortero-piedra) perfectamente unidos, y cuando se hayan producido en contactos en los que exista una cierta separación entre los diferentes materiales.
- Estudiar la estructura de la cubierta localizando posibles zonas dañadas y analizando los métodos empleados para reducir la carga sobre columnas.
- Contrastar los resultados de radar con tomografía sísmica.

3. En el caso de estudio del parque Güell, se pretende:

- Identificar reflexiones que puedan producirse en el contacto entre los materiales y las barras metálicas.
- Determinar la ubicación de estructuras metálicas de refuerzo, diferenciando las que se encuentran sanas de las que presentan elevados grados de corrosión.

4. **En el caso del estudio de la piscina Municipal** se pretende:

- Analizar una estructura actual construida siguiendo la normativa vigente, con daños detectados en una inspección visual previa.
- Identificar la ubicación de armaduras de refuerzo en la base de la piscina.
- Determinar las zonas de mayor daño por corrosión.

Antes de evaluar los casos aplicados, la realización de ensayos de laboratorio resulta imprescindible para poder determinar los principales indicadores del fenómeno de corrosión en los registros de GPR. Por este motivo se han realizado campañas experimentales sobre probetas de hormigón con inclusión de barras de acero sanas y corroídas. Los resultados de los ensayos de laboratorio han sido utilizados para mejorar la interpretación de los casos aplicados. En estos ensayos, los objetivos específicos se pueden resumir en:

- Analizar para cada una de las probetas su permitividad efectiva y la velocidad de propagación de la onda en el material.
- Planificar los ensayos e identificar posibles problemas en la adquisición de datos
- Observar los efectos cualitativos y cuantitativos que produce la corrosión en las imágenes y señales de radar.
- Interpretar los efectos que produce la corrosión en la señal, asociando cada uno de ellos a una causa correspondiente y evaluando el proceso de causa-efecto a partir de los parámetros de la onda electromagnética y de la teoría de corrosión.
- Realizar un análisis numérico de los parámetros que se observan alterados en las señales como consecuencia de la corrosión. Para ello se deberá:
 - ✓ Efectuar un análisis de atenuación, evaluando cada A-scan.
 - ✓ Analizar cambios en la velocidad de propagación de la señal.
 - ✓ Analizar variaciones en el contenido frecuencial de la señal.

- Evaluar los resultados de laboratorio y compararlos con casos de estudio reales.

CAPITULO 2- ESTADO DEL ARTE

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Primeras aplicaciones del GPR

El primer estudio utilizando ondas electromagnéticas transmitidas al subsuelo para localizar objetos enterrados data del año de 1910, cuando Gotthelf Leimbach & Heinrich Lowy emplean un instrumento. de características parecidas a un radar aéreo, patentado seis años antes por Christian Hülsmeier. Leibamch y Lowy patentan ese mismo año los principios del radar de penetración y, más tarde, en 1926, el mismo instrumento es desarrollado por Hülsmeier, diseñando un radar que funcionaba mediante pulsos, tal como hacen muchos de los equipos utilizados actualmente. Este nuevo equipo se utilizó en 1929 para determinar el espesor de un glaciar (Stern, 1929; Sahni *et al.*, 2014). Tras estos prometedores inicios, el avance de la tecnología y de sus aplicaciones se estanca, y no es hasta finalizada la segunda guerra mundial cuando se retoman los ensayos y los trabajos. Aunque en 1956 ya se utiliza para detectar el nivel freático (El-Said, 1956), es durante la década de los años 70 cuando se inicia un fuerte desarrollo del método. Durante los primeros años de este periodo, se analiza la penetración de las ondas de radio en diferentes tipos de materiales (Cook, 1975; Emslie y Legace, 1976), se ensayan medidas en permafrost (Annan y Davis, 1976; Davis *et al.*, 1976) y en diapiros salinos (Unterberger, 1978).

Entre los años 1990 y 1995, tiene lugar el desarrollo del georradar más notable, con la fabricación a nivel comercial del instrumento. Esto lo hace accesible a empresas y organizaciones, permitiendo el acceso sencillo a pruebas y aplicaciones, lo que facilita la rápida mejora del equipo y un importante aumento de los casos y problemas a los que se aplica. Se ensayan aplicaciones en campos tan diversos como la geofísica, la geología, la arqueología, la glaciología, etc. (Hann, 2003).

2.2. Estudios sobre detección de armaduras en el hormigón

El desarrollo de los equipos de radar ampliar en gran medida el rango de frecuencias utilizadas en los estudios. La fabricación de antenas de alta frecuencia ha sido uno de los avances que ha facilitado la utilización de esta técnica de prospección en trabajos relacionados con ingeniería civil y estudio de infraestructuras. Los excelentes resultados

que se han ido obteniendo han logrado que esta sea actualmente una de las aplicaciones más comunes del georradar.

Dentro del estudio de estructuras, la detección de las armaduras es quizá la aplicación más habitual. Los equipos actuales y los programas de procesado de datos han pasado de estar enfocados a la adquisición y el procesado de registros unidimensionales y bidimensionales (A-scans y B-scans) a proporcionar imágenes tridimensionales (C-scans) obtenidas procesando conjuntos de registros bidimensionales. Estas imágenes permiten cortes transversales que muestran las anomalías a diferentes profundidades, en planos paralelos a la superficie y también facilitan la obtención de modelos del medio que permiten unas pseudoimágenes del interior más realistas que las que proporcionan los B-scans individualmente.

La especialización de los programas de procesado de datos y de imágenes ha sido un elemento clave en estos avances. Programas como las últimas versiones de RADAN y el software el ReflexW (Sandmeier, 2010) permiten la aplicación de un amplio abanico de filtros que mejoran la visualización de los datos y, en el caso de estudios de hormigón armado, optimizan la resolución de las imágenes y permiten una ubicación más precisa (Lucius & Powers, 2002). Otros programas, como el software GPR Slice (Goodman et al., 2008; Goodman et al., 1995) facilitan la obtención y el procesado de imágenes tridimensionales. Además, el desarrollo de modelos computacionales ha mejorado la interpretación de los registros, permitiendo comprobar los resultados de campo o realizar una estimación previa de los registros. Algunos programas, como GPRMax (Giannopoulos, 2005; Warren et al., 2016; Warren et al., 2019) tienen una gran versatilidad y permiten modificar parámetros tanto del medio como de las antenas.

Entre las aplicaciones en hormigón armado destaca el trabajo de He *et al.* (2009), en el que se describen los ensayos y los resultados de la aplicación del georradar para determinar la posición de las armaduras, ubicadas dentro diferentes elementos de hormigón armado, especialmente en losas y columnas. Este estudio analiza el cálculo del diámetro de las armaduras, dato que, junto a la posición exacta de las armaduras, facilita la evaluación de la capacidad mecánica y resistencia de los diferentes elementos estructurales.

A partir de los primeros análisis en hormigón armado, surgen aplicaciones innovadoras para la detección y medición de armaduras gracias a la versatilidad de este método,

logrando incluso la realización de tomografías utilizando programas que corrigen las lecturas bidimensionales y las presentan en esquemas tridimensionales.

Posteriormente, el estudio de Selek, (2015), basado en imágenes de radar muestra la capacidad del georradar para determinar los diámetros de las barras de refuerzo desde los 6 mm hasta los 40 mm, con un error de 1 milímetro. Esta misma precisión se obtiene en la determinación de las posiciones de las barras y en la determinación del recubrimiento. En este trabajo, los resultados se comparan con los obtenidos con otros instrumentos como el pachómetro (*cover meter*), que trabaja mediante la detección de alteraciones de los campos magnéticos generados por el instrumento debido a la presencia de las barras de acero.

Un trabajo más completo sobre la determinación de la disposición espacial de los componentes de los elementos estructurales de hormigón armado lo realiza Bhaskar y Vasanthakumar en 2017 llegando a determinar:

- La localización precisa de las armaduras
- Los diámetros de las barras
- El espesor de los recubrimientos

Los resultados obtenidos en las aplicaciones que se desarrollan durante este periodo demuestran la eficacia del georradar para detectar las barras metálicas embebidas en hormigón, correlacionando los resultados con las medidas obtenidas mediante otros métodos como los detectores de metales y los pachómetros. Los trabajos también han demostrado una de las principales limitaciones del georradar: el efecto de apantallamiento que producen los mallazos interiores al hormigón. El método no permite detectar elementos situados por debajo de la primera capa de barras de refuerzo y en las imágenes se superponen las reflexiones producidas en los elementos a diferente profundidad, dificultando de este modo la detección de la segunda capa (Agred et al., 2018).

2.3. Aplicación del georradar en el estudio de hormigón armado y de corrosión

En el estudio de estructuras de hormigón armado, además de la localización de los elementos metálicos, también es de gran interés la evaluación de su estado.

La corrosión de elementos metálicos embebidos en hormigón armado genera una reacción catódica en el contacto entre acero y hormigón, debido a la delaminación que se produce en la superficie del acero, daño que también repercute en el hormigón. (Calleja & Andrade, 1973).

Los principales problemas que produce la corrosión en el hormigón armado son:

- La reducción de la sección del acero, que está relacionada directamente con la pérdida de la capacidad mecánica del elemento.
- El efecto de la expansión del material resultante de la reacción catódica, que provoca fisuración y agrietamiento del hormigón adyacente a la barra, lo que produce una disminución de la capacidad estructural de los elementos por la pérdida de adherencia,

El daño que sufren las armaduras en estructuras de hormigón armado depende directamente de factores ambientales. Los ambientes que favorecen y aceleran la corrosión son aquellos en los que la presencia de sales y cloros es importante (Hong, 2015).

Aunque con el georradar se ha estudiado a menudo la estructura interna de elementos de hormigón armado, el análisis de la corrosión de armaduras no se ha abordado hasta estos últimos años. El análisis más habitual para detectar corrosión es la inspección visual y comparativa. En algunos casos se verifican los resultados de esta primera inspección con los datos obtenidos con técnicas basadas en la detección del potencial eléctrico que genera el proceso de oxidación, como es el método *Half-Cell Potential* (HCP) (Azfaratul *et al.*, 2012).

Uno de los primeros estudios en los que se utiliza el georradar para determinar daño por corrosión es el de Kim *et al.* (2003), en el que se afirma que se puede reconocer la corrosión identificando las zonas de alto contraste dieléctrico y alta atenuación, puesto que estos cambios están producidos por el contenido alto de humedad y por la concentración de iones cloruro. El análisis realizado en este trabajo es similar al que se ha utilizado en algunas ocasiones en arqueología y en estudios forenses, en los que los objetos buscados se localizan debido a las alteraciones del subsuelo removido a su alrededor. En este mismo trabajo se analizan los posibles sectores en los que se puede estar

produciendo corrosión mediante la medida del potencial eléctrico generado por el efecto electroquímico, obteniendo que es probable una corrosión menor de 10%, cuando el potencial es mayor a 200 mV, mientras para potenciales de 350 mV la probabilidad de corrosión es de un 90%.

Unos años más tarde, en el estudio de Rhazi *et al.* (2007), se propone un índice llamado RCI (*Radar Corrosion Index*), que es mayor cuanto mayor es el grado de corrosión y que está relacionado con la atenuación de la señal. En este caso la interpretación se realiza observando cambios en la atenuación, e identificando los que son más bruscos.

Durante algunos estudios de estructuras de hormigón armado se observó un cambio en la amplitud las hipérbolas que se registraban en los radargramas. Partiendo de la hipótesis de que este efecto podía estar relacionado con una disminución de la sección de las barras debida a la corrosión en zonas concretas, los investigadores de la Universidad de Iowa emplearon probetas con reducción de su sección para simular la pérdida de masa de acero debido a la corrosión, asociando cada reducción de la sección de la armadura con un determinado grado de oxidación, relación que se calibró previamente (Eisenmann *et al.*, 2013).

El trabajo que publican Hasan y Yazdani en 2016 propone analizar el hormigón aledaño a la barra, alterado por la corrosión, en lugar de analizar la armadura corroída propiamente dicha. Otros autores han mostrado resultados prometedores en este campo (Agred *et al.*, 2018), haciendo además hincapié en la necesidad de utilizar antenas e alta frecuencia ya que las armaduras suelen tener diámetros de hasta 10 mm. A mayor frecuencia se tiene mayor precisión y, por lo tanto, una mejor resolución en las imágenes. Por este motivo se recomienda utilizar antenas con frecuencias centrales por encima de los 1600 MHz, realizando la adquisición de datos con la antena en contacto directo con la superficie analizada (Eisenmann *et al.*, 2013).

En muchos trabajos se han utilizado técnicas de prospección combinadas, para obtener resultados complementarios y, en ocasiones, suplementarios. La combinación de georradar con tomografía infrarroja (IRT) ha dado buenos resultados, ya que proporcionan datos complementarios y se trata de dos métodos de estudio que pueden aplicarse a grandes superficies (Moropoulou *et al.*, 2013; Solla *et al.*, 2019)

En diversos ensayos se han utilizado métodos para acelerar la corrosión. Uno de los más habituales consiste en una celda galvánica con corriente continua en una solución de cloruro de sodio al 5%. Este proceso se realiza en probetas de hormigón con barras de acero embebidas, consiguiendo buenos resultados (Krishnarajapete, 2015). Otro método usado recientemente para acelerar la corrosión consiste en inducir corriente a través de las barras (Zaki *et al.*, 2020). En estos ensayos que muestran la evolución de la corrosión resulta importante monitorizar el proceso. La monitorización de la corrosión no es una tarea fácil ya que conlleva mucho tiempo debido a que el proceso de corrosión es lento, pese a ello se pueden encontrar diferencias no son significativas dependiendo del medio y la exposición del hormigón (Hong *et al.*, 2017).

Durante los últimos años el estudio de corrosión se ha aplicado en diferentes tipos de estructuras. La aplicación más habitual es en el análisis de túneles y de puentes. En estas infraestructuras se deben estudiar grandes superficies para poder detectar el daño (Ghodoosi, *et al.*, 2018; Kilic y Eren, 2018). Otros estudios se han centrado en las estructuras de transporte en zonas frías, ya que los medios que se suelen utilizar para eliminar el hielo que se forma suelen ser a base de sales que degradan fácilmente el hormigón induciendo la corrosión. Unos ejemplos de estos estudios son los realizados en puentes en latitudes frías (Meng *et al.*, 2020; Roudari *et al.*, 2020).

2.4. Aplicación del georradar en el estudio de daños en estructuras (humedad y huecos)

2.4.1. Detección de la humedad

En los estudios de mantenimiento de estructuras, tanto de hormigón como de mampostería, uno de los elementos que se analizan es el contenido de agua. Los factores ambientales que inducen la humedad en estructuras de hormigón armado pueden afectar radicalmente a su comportamiento estructural, ya que favorece la corrosión de las armaduras, las reacciones alcalino-silíceas, la sulfatación y la carbonatación. La humedad también es un problema en estructuras de mampostería, ya que puede ocasionar despegues de elementos ornamentales y producir manchas, podredumbre de elementos de madera en contacto con la mampostería, y goteras.

En estos análisis, uno de los métodos de estudio que se suele utilizar es el georradar. Este instrumento trabaja generando ondas electromagnéticas que se propagan por el

medio, detectando las señales que se reflejan en las discontinuidades electromagnéticas del medio. Este método de estudio es muy sensible frente a los cambios de contenido de agua en medios porosos, debido al gran contraste existente entre la permitividad dieléctrica relativa del agua (81), la del aire (1) y la del grano sólido (entre 6 y 9). Por lo tanto, el georradar permite localizar los sectores de una estructura de hormigón que tienen un mayor contenido de agua. Teniendo en cuenta que la presencia de agua puede ser un indicador de la calidad del hormigón (un hormigón de mala calidad permitirá fácilmente la intrusión de agua y un mayor almacenamiento a causa de su elevada porosidad) (Rodríguez et al., 2016), el georradar puede utilizarse para analizar la calidad del material.

Un hormigón seco tiene una permitividad dieléctrica de entre 6 y 9. Cuando el hormigón está saturado, el valor de la permitividad se incrementa significativamente, pasando a estar situado entre 16 y 20. Estos cambios en la permitividad producen cambios importantes en la velocidad de propagación de la onda electromagnética cuando atraviesa el medio, por lo que se trata de una forma de identificar la humedad en el hormigón (Kilic y Unluturk, 2014). Este mismo efecto se produce en otros materiales, como es el caso de los ladrillos o de la sillería.

Una forma habitual de determinar la propagación de una onda electromagnética en un medio es mediante una calibración, comparando los registros con catas que permitan conocer el espesor del material y la distancia al reflector. Midiendo el tiempo de propagación de la onda reflejada, puede estimarse la velocidad de la onda de georradar. Otro método habitual es mediante una adquisición de datos con el sistema de punto medio común “*common mid point*” (CMP). Este método se basa en la adquisición de datos mediante antenas biestáticas. Una de las antenas es un emisor, y la otra un receptor. Las antenas se van desplazando una respecto de la otra, manteniendo el punto central fijo. La velocidad del medio se obtiene a partir de la diferencia de tiempos de registro de la onda directa en el caso de un medio semiinfinito. En el caso de un medio estratificado, la velocidad de la onda en cada capa se determina utilizando la refracción crítica en cada discontinuidad. Este tipo de adquisición de datos se puede realizar en estructuras siempre que tengan la dimensión suficiente como para poder separar las antenas (Reci et al., 2016).

Huisman *et al.*, (2003) presenta una recopilación de los diferentes métodos que se pueden utilizar para determinar cambios en la velocidad de propagación de la onda y, por lo tanto, para estimar las variaciones en el contenido de agua de un medio. Estos métodos son:

- Determinando la permitividad del medio a partir de la diferencia de amplitud entre la onda reflejada en la superficie del medio y la onda reflejada en un reflector perfecto (metal). Se aplica utilizando antenas monoestáticas.
- Calculando la velocidad de propagación de la onda a partir del intervalo de tiempo entre el registro de la onda directa y la onda que atraviesa el medio y se refleja en la discontinuidad, conocido la distancia entre el reflector y la superficie del medio. En este caso se utiliza el método reflectivo con antenas monoestáticas
- Utilizando un radar de sondeo con antena biestática. Se sitúa la antena receptora en uno sondeo y la emisora en otro sondeo o en superficie. Este método se conoce como *cross hole* si cada antena está en un sondeo, y como *down hole* si la antena emisora está en superficie.
-
- Analizando las variaciones en la amplitud de la onda directa. En este tipo de medidas se pueden utilizar tanto antenas monoestáticas como biestáticas.
- Situando una antena emisora en una de las superficies del medio y la antena receptora en una superficie paralela. El tiempo de propagación de la onda directa entre antenas, conocido el espesor del medio, permite determinar la velocidad de propagación de la señal.
- Utilizando un ensayo de punto medio común con antenas biestáticas.
- Mediante tomografía

Algunos de estos procedimientos se pueden emplear para determinar la humedad en elementos estructurales, de hormigón o de mampostería. En muchos casos, son elementos de los que se conoce su espesor y, a menudo, presentan secciones pequeñas y las superficies son de fácil acceso sin necesidad de realizar perforaciones. Esto permite situar las antenas en superficies paralelas, de manera que se puede obtener la velocidad a partir de la onda directa, además de utilizar la onda reflejada cuando se sitúan las dos

antenas en la misma superficie. En el caso del estudio de cimentaciones profundas se requieren perforaciones para realizar el estudio.

2.4.2. Detección de cavidades y humedades

La sensibilidad del georradar para detectar cambios en la permitividad dieléctrica del medio puede utilizarse también para evaluar la porosidad (cantidad de huecos) y a su vez, la calidad y resistencia del hormigón (Rodríguez *et al.*, 2016).

Las cavidades se detectan porque un aumento de porosidad equivale a un aumento en la velocidad de propagación de la señal en el caso de un medio seco. Y una disminución de la velocidad en el caso de un medio saturado.

El método también es útil para localizar grietas, zonas con fisuras y huecos internos. Si el daño tiene un tamaño suficiente, se detecta como una anomalía en el radargrama, debida a la reflexión de la señal en la grieta o en el hueco. En muchos casos se trata de anomalías hiperbólicas.

Cuando el tamaño de las fisuras es pequeño, pero el sector tiene un daño extenso, con mucha fisuración, se produce dispersión de la señal, lo que aumenta el ruido de fondo de las trazas. A este ruido debido a la dispersión de la onda en pequeñas heterogeneidades del medio se le conoce como *clutter*. El incremento de este efecto en un registro puede ser un indicador de la existencia de un sector con un importante grado de fisuración o con oquedades de pequeño tamaño (Maser, 2009).

Estos estudios requieren una alta resolución, por lo que Saribudak, (2009) recomienda el empleo de antenas de frecuencias mayores a 1500 MHZ.

CAPITULO 3- CONCEPTOS TEÓRICOS Y METODOLOGÍA DE ESTUDIO

3.1. CONCEPTOS TEÓRICOS: CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y PROPAGACIÓN DE ONDAS

El georradar o radar de subsuelo, GPR por sus siglas en inglés (*Ground Penetrating Radar*), es un método de prospección geofísica no destructivo basado en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas. Las ondas son emitidas por una antena y se propagan por el interior del medio que se quiere estudiar. Cuando alcanzan una interfaz que separa dos zonas con diferentes parámetros electromagnéticos se produce reflexión y refracción de la energía incidente. Parte de ella continúa propagándose hacia el interior del medio tras sufrir un cambio de dirección, y otra parte de ellas se refleja y retorna hacia la superficie del medio donde es captada por una antena receptora. Las señales recibidas se muestran en tiempo real en un monitor (Jol, 1996; Daniels, 2000; Busby *et al.*, 2004). El equipo tiene una unidad de control que procesa las señales y las presenta como trazas individuales (A-scans) que se agrupan formando secciones bidimensionales (B-scans o radargramas). Estos registros pueden procesarse posteriormente para mejorar las imágenes o para formar pseudoimágenes tridimensionales (C-scans) interpolando datos de radargramas paralelos.

Aplicado inicialmente al estudio del subsuelo para la localización de elementos enterrados y para estudios geológicos, se ha utilizado posteriormente con gran éxito en el estudio de elementos estructurales para analizar posibles patologías (por ejemplo, en la detección de oquedades y grietas). La técnica ha mostrado grandes ventajas, sobre todo combinada con otros métodos. En la actualidad es una técnica aceptada de en múltiples aplicaciones (Jol, 2008), y se ha incluido en algunas normativas de inspección de infraestructuras, como por ejemplo en la *Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods* ASTM D6429-99, 2011; *Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation* ASTM D6432-19, 2019; *Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar* STM D6087-08, 2015.

Los registros que se obtienen indican la respuesta del medio frente a un campo electromagnético.

La radiación electromagnética es una combinación de un campo eléctrico (\vec{E}) y un campo magnético (\vec{M}) que se propagan oscilando en planos perpendiculares entre sí. Además, la dirección de la propagación de la onda es perpendicular a ambos campos (Figura 3.1.1) (Daniels, 2004)

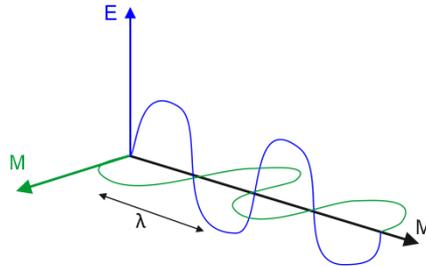


Figura 3.1.1. Onda Electromagnética representada en tres dimensiones con sus componentes de campo eléctrico (en azul) y campo magnético (verde), siendo λ la longitud de onda.

Las ecuaciones de Maxwell (Ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4) describen la propagación de las ondas electromagnéticas y relacionan los campos eléctrico y magnético con las densidades de carga y de corriente eléctrica en función de la posición r y del tiempo t (Carcione, 1996; Benci & Fortunato, 1998)..

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}(r, t) = \rho(r, t) \quad (3.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(r, t) = 0 \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(r, t) + \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}(r, t) = 0 \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(r, t) - \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}(r, t) = \vec{j}(r, t) \quad (3.4)$$

Donde: \vec{E} = Intensidad de campo eléctrico, \vec{H} = Intensidad de campo magnético, \vec{D} = Desplazamiento eléctrico, \vec{B} = Inducción magnética, ρ = Densidad de carga y \vec{j} = Densidad de corriente eléctrica.

A partir de las ecuaciones de Maxwell se define la ecuación de propagación del campo eléctrico y del campo magnético. Las ecuaciones de onda para los campos eléctrico y magnético resultantes, son:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.5)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.6)$$

Suponiendo el caso de una onda plana, en la que los campos eléctrico y magnético son función del tiempo y de una única coordenada espacial, a partir de las ecuaciones de onda pueden determinarse unas expresiones para cada uno de los campos:

$$\vec{E}(r, t) = \vec{E}_0 e^{i\omega t} e^{-\gamma r} \quad (3.7)$$

$$\vec{H}(r, t) = \vec{H}_0 e^{i\omega t} e^{-i\gamma r} \quad (3.8)$$

En estas expresiones, el factor de decaimiento espacial determina la variación de la amplitud del campo en función de la distancia:

$$\begin{aligned} \vec{E}(r) &= \vec{E}_0 e^{-\gamma r} \\ \vec{H}(r) &= \vec{H}_0 e^{-\gamma r} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Siendo γ la constante de propagación o número de onda complejo:

$$\gamma = i \frac{\omega}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} = i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} = \alpha + i\beta$$

Donde: β = Constante de fase, α = Factor de atenuación

La constante de fase y el factor de atenuación dependen de la pulsación ω , de la conductividad σ , de la permitividad dieléctrica ε y de la permeabilidad magnética μ (Meles, 2011):

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu \varepsilon \omega^2}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon \omega}\right)^2} - 1 \right)} = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon \omega}\right)^2} - 1 \right)} \quad (3.10)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \sigma \varepsilon \omega^2}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon \omega}\right)^2} + 1 \right)} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\mu_r \varepsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon \omega}\right)^2} + 1 \right)} \quad (3.11)$$

Donde: $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ es la velocidad de la luz en el vacío

A partir de estas expresiones puede observarse que la propagación de una onda electromagnética depende de sus características (pulsación) y, además, de tres parámetros característicos del medio por el que se propaga: Conductividad Eléctrica, Permitividad Dieléctrica y Permeabilidad Magnética.

3.1. Conductividad Eléctrica, σ

La conductividad se define como la capacidad del material para permitir el paso de la corriente eléctrica. Es un parámetro complejo que tiene una parte real, σ' , y una parte imaginaria, σ'' , expresándose:

$$\sigma = \sigma' + i \sigma'' \quad (3.12)$$

La conductividad de un material juega un papel fundamental en la absorción de la energía de la onda electromagnética. Este parámetro relaciona el campo eléctrico aplicado con la densidad de volumen de corriente debido a cargas eléctricas libres, esta expresada por la siguiente ecuación constitutiva (Daniels, 2004):

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3.13)$$

3.1.2. Permitividad Dieléctrica ϵ

La permitividad dieléctrica es la relación entre el desplazamiento eléctrico y la intensidad de campo eléctrico. Su valor indica la capacidad de polarización de un material bajo el efecto de un campo eléctrico (Rappaport, 2008).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.14)$$

Donde (ϵ) es la constante llamada permitividad dieléctrica absoluta y es el producto de la permitividad dieléctrica relativa (ϵ_r), que es un valor adimensional (que se muestra en la tabla 3.1) y la permitividad dieléctrica en el vacío ($\epsilon_0=8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m).

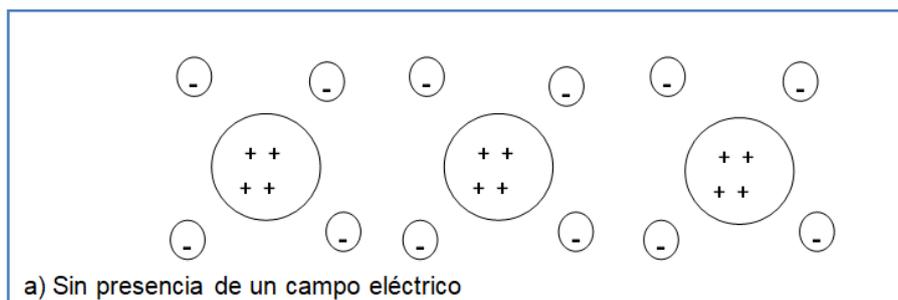
$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (3.15)$$

La tabla 3.1 presenta la conductividad y la permitividad dieléctrica relativa de algunos de los materiales que habitualmente se pueden encontrar en estudios con radar de subsuelo.

Tabla 3.1. Valores de conductividad y de permitividad dieléctrica relativa (Rojas-Poveda, 2015)

Material	Conductividad estática $\sigma(mS/m)$	Permitividad dieléctrica relativa (ϵ_r)
Aire	0	1
Arcilla (seca)	1-100	2 – 20
Arcilla (con agua)	100-1000	15 – 40
Cemento (seco)	1-10	4 – 10
Cemento (con agua)	10-100	10-20
Agua (dulce)	0.1-10	78-88
Agua (congelada)	1-0.000001	3
Agua de mar (dulce)	4000	81-88
Agua de mar (congelada)	10-100	4-8
Granito (seco)	0.001-0.00001	5 – 8
Granito (fracturado y mojado)	1-10	5 – 15
Caliza (seco)	0.001-0.0000001	4 – 8
Caliza (con agua)	10-100	6 – 15
Arenisca (seca)	0.001-0.0000001	4-7
Arena (seca)	0.0001-1	3 – 6
Arena (con agua)	0.1-10	10 - 30
Arena costera (seca)	0.01-1	5-10
Suelo arenoso (seca)	0.1-100	4-6
Suelo arenoso (con agua)	10-100	15-30
Suelo limoso (seca)	0.1-1	4-6
Suelo limoso (con agua)	10-100	10-20
Suelo arcilloso (seca)	0.1-100	4-6
Suelo arcilloso (con agua)	100-1000	10-15
Suelo promedio	5	16

Cuando un material está sometido a la acción de un campo eléctrico se puede producir polarización. Este fenómeno consiste en la reorganización de las cargas internas del material. La polarización es un fenómeno que produce un ordenamiento de las cargas eléctricas positivas y negativas de un átomo en presencia de un campo eléctrico próximo, generando una tensión entre dichas cargas eléctricas llamado momento dipolar que es proporcional al campo eléctrico aplicado (Rojas-Poveda, 2015).



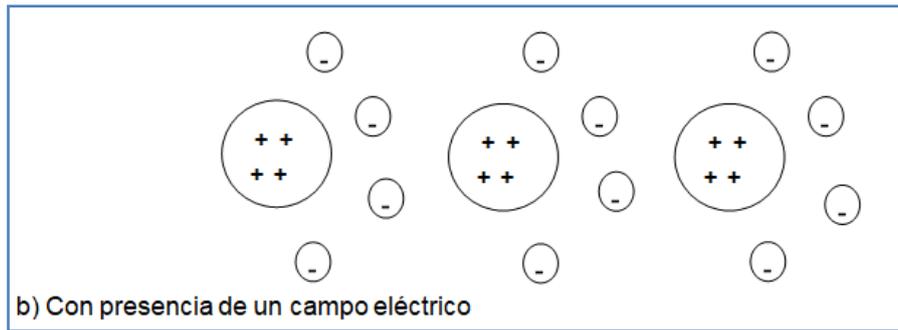


Figura 3.2. Esquema que muestra el proceso de polarización al aplicar un campo eléctrico (adaptada de Rojas-Poveda, 2015).

Al polarizarse un material debido a un campo eléctrico externo, el pequeño desplazamiento de las cargas transforma parte de la energía electromagnética en calor. Esto se traduce en una pérdida de energía. La permitividad dieléctrica no es un valor constante, ya que sus dos componentes dependen, entre otros parámetros, de la frecuencia de la antena.

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon'(\omega) + j \varepsilon''(\omega) \quad (3.16)$$

La permitividad dieléctrica relativa de un material se puede, obtener experimentalmente utilizando el GPR. Para ello debe calcularse la velocidad media de propagación de la señal por el interior del material. En el caso de una muestra de material de espesor d conocido, si se realiza la medida situando tanto la antena emisora como la receptora sobre la misma superficie del medio, los tiempos registrados serán tiempos dobles de propagación (los transcurridos desde que la antena emisora emite la señal hasta que la antena receptora la capta, tras haberse producido una reflexión en la superficie posterior del medio). Considerando el espesor d conocido y el tiempo medido en el A-scan, se determina la velocidad como

$$v = \frac{2d}{(t_2 - t_1)} \quad (3.17)$$

Siendo t_1 el tiempo que se corresponde con el primer máximo de la amplitud, asociado al acoplamiento de la onda directa con la reflexión en la superficie del medio (este máximo se asociaría con la superficie del medio sobre la que se ha situado la antena), y t_2 el tiempo correspondiente al máximo de amplitud en el A-scan asociado con la reflexión en la superficie posterior del medio de espesor d .

En la ecuación 3.15 la distancia d está multiplicada por 2 ya que la onda recorre dos veces la distancia definida por el espesor del medio (la separación entre las dos superficies).

Una vez conocida la velocidad media de propagación de la onda por el material estudiado, su permitividad dieléctrica relativa se puede obtener a partir de la relación entre ambos parámetros. En el caso de un medio dieléctrico perfecto, en el que el factor de pérdidas es cercano a la unidad, esta relación tiene una expresión sencilla

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.18)$$

Siendo $c_0 = 30$ cm/ns la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío

Con la relación 3.15 y la ecuación 3.16, se determina la permitividad dieléctrica relativa en función de la distancia entre las dos superficies (la del medio y la reflectora) y de los tiempos de propagación medidos en las señales de radar (Kalogeropoulos, 2012).

$$\epsilon_r = \left(\frac{c_0}{2d} (t_2 - t_1) \right)^2 \quad (3.19)$$

3.1.3. Permeabilidad magnética μ

La permeabilidad magnética es la relación constante que existe entre la inducción magnética (\mathbf{B}) y la intensidad de campo magnético (\mathbf{H}). Este parámetro puede escribirse como producto entre la permeabilidad magnética relativa del material, una constante adimensional (μ_r), y la permeabilidad magnética en el vacío ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) (Pérez-Gracia, 2001).

$$\vec{D} = \mu \vec{E} = \mu_r \mu_0 \vec{E} \quad (3.20)$$

μ es un valor complejo, donde la parte real (μ') representa la energía magnética almacenada por el material en presencia de un campo electromagnético, y la parte imaginaria (μ'') las pérdidas magnéticas.

$$\mu = \mu' + i \mu'' \quad (3.21)$$

En muchos de los materiales del subsuelo y de construcción (excepto los ferromagnéticos), la permeabilidad magnética relativa es cercana a la unidad, por lo que

su efecto sobre la onda de radar es despreciable y no depende de la frecuencia de la onda.

3.4. Velocidad de propagación

La velocidad de fase es la velocidad a la cual se propagan las ondas en la dirección de propagación, que es normal a las direcciones de los campos eléctrico y magnético, como se muestra en la Figura 3.1, y esta expresada por la ecuación (Leucci,2008)

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} \quad (3.22)$$

De la ecuación 3.9

$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\mu_r \epsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon \omega}\right)^2} + 1 \right)} \quad (3.23)$$

En medios de bajísima conductividad, como son en los que se aplica el GPR, el término de la ecuación 3.9, $\frac{\sigma}{\epsilon \omega} \cong 0$. Resultando la ecuación

$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (3.24)$$

En medios que tienen poco magnetismo, como es el caso de suelos y rocas comunes $\mu_r=1$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r} \quad (3.25)$$

De las ecuaciones 3.20 y 3.23, se obtiene la ecuación 3.22, donde la velocidad de propagación de la onda es función inversa de la raíz cuadrada de coeficiente de permitividad dieléctrica del medio por donde se propaga (Leucci, 2008):

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.26)$$

Con esta ecuación de velocidad se pueden calcular las velocidades de propagación, partiendo de valores de permitividad del material, existen algunas bibliografías que dan estos parámetros, pese que a ue tienen un rango de variación ayudan a estimar la velocidad de forma práctica y sencilla en la tabla 3.2.

Tabla 3.1.2. Velocidad de propagación de onda de algunos materiales (Munuera, 2016).

Material	Permitividad relativa (ϵ_r)	Velocidad de propagación (m/ns)
Aire	1	0,33
Arcilla (seca)	2 – 20	0,23 - 0,073
Arcilla (mojada)	15 – 40	0,085 - 0,052
Cemento (seco)	4 – 10	0,165 - 0,104
Cemento (mojado)	10 – 20	0,104 - 0,073
Granito (seco)	5 – 8	0,147 - 0,116
Granito (fracturado y mojado)	5 – 15	0,147 - 0,085
Caliza (seco)	4 – 8	0,165 - 0,116
Caliza (mojada)	6 – 15	0,134 - 0,085
Arena (seca)	3 – 6	0,19 - 0,134
Arena (mojada)	10 - 30	0,104 - 0,06

3.4. Longitud de onda

La longitud de onda (λ), es inversamente proporcional a la constante de fase (β) que, a su vez, depende la pulsación y de la velocidad de fase de la onda. De este modo, en el interior de un medio material, la longitud de onda está relacionada con la longitud de onda en vacío λ_0 y con la permitividad dieléctrica relativa ϵ_r : del material.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega} v = \frac{2\pi}{\omega} \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.27)$$

Por otro lado la longitud de onda se relaciona con la frecuencia de la onda y es un parámetro determinante para definir la resolución del método en cada caso.

La resolución que debe tener el instrumento es un factor especialmente importante al momento de estudiar objetos puntuales ubicados en un medio.

La resolución vertical permite determinar el espesor de un objeto gracias a que tanto su superficie superior como la inferior, generan las respectivas reflexiones (por el cambio de las propiedades electromagnéticas medio-objeto). Cuando la resolución es baja la superficie inferior ya no es detectada por lo cual no se puede calcular su espesor. La resolución está definida por la longitud de onda predominante, y su valor es un medio de dicha longitud de onda $\lambda/2$ (Pérez-Gracia, M.V. et al., 2009).

Por otra parte la resolución horizontal está dada por un valor empírico que depende de la resolución horizontal, la permitividad dieléctrica y la profundidad del objeto.

Por ejemplo para un hormigón con un velocidad de propagación 0.10 m/ns ($\epsilon_r=9$) y una frecuencia central del GPR de 1.6 GHz (Figura 3.1.3).

$$\text{Longitud de onda} = \lambda = v * t = \frac{v}{f(\text{rad})} = \frac{0.10 \frac{m}{ns}}{2\pi * 1.6 \frac{rad}{ns}} = 0.0094m = 0.94cm$$

$$\text{Resolución vertical máxima} \left(\frac{\lambda}{2}\right) = 2 * 0.94 = 1.88 \text{ cm}$$

La resolución horizontal es la distancia mínima a la cual dos objetos son detectados separadamente (si la distancia es menor el GPR lo detectará como un solo objeto), para un profundidad del objeto de 5.0 cm, está dada por la siguiente ecuación empírica:

$$\text{Resolución horizontal} = RV + \frac{p}{\sqrt{\epsilon+1}} = 3.76 + \frac{5.0}{\sqrt{9+1}} = 5.34cm \text{ (p=profundidad del objeto)}.$$

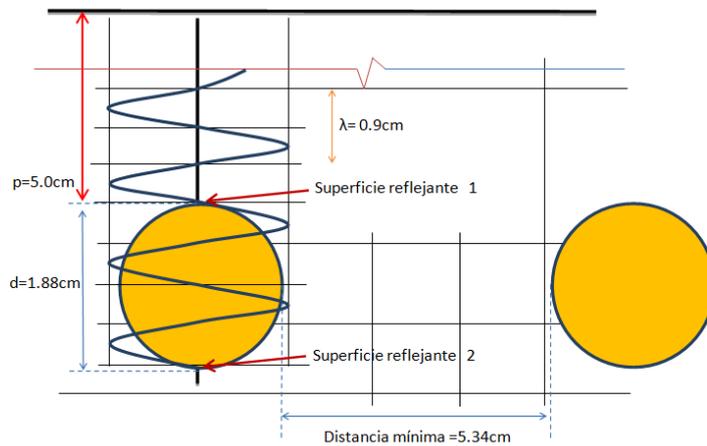


Figura 3.1.3. Esquema resolución horizontal y vertical (caso de ejemplo, dos barras en el hormigón armado).

Por lo tanto, puede considerarse que la capacidad del radar para detectar un objeto depende de su longitud de onda, relacionándola con el tamaño de dicho objeto. Por otro lado, la penetración en un medio también depende de la frecuencia de la señal:

- Para frecuencias más altas las longitudes de onda son menores y, por lo tanto, se obtiene una mejor resolución y una menor penetración en el medio.
- Las frecuencias más bajas implican una mayor longitud de onda por lo que se alcanza una mayor profundidad de penetración, pero se obtiene una resolución más baja.

Por este motivo cuando se requiere mayor precisión se emplean frecuencias altas, generalmente comprendidas entre 900 Mhz y 5.0 GHz. Un ejemplo de este tipo de estudios es la inspección de estructuras de hormigón armado o pretensado para analizar patologías en la construcción (Jol, 2008).

En cambio, cuando se requiere mayor alcance o profundidad, como es en el caso de estudios geológicos, las frecuencias deben ser más bajas y, en muchos estudios, están comprendidas entre los 500 MHz y los 10 MHz (Bristow & Jol, 2003).

3.2. CONCEPTOS TEÓRICOS: DAÑOS POR CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO

La corrosión es una patología del acero como consecuencia de un ataque electroquímico de un entorno agresivo. La causa principal es la tendencia que tiene el hierro a pasar de su estado elemental a un estado combinado, tal como se encuentra en la naturaleza. (Fontana, 2005).

En el hormigón armado el proceso de oxidación del acero inicia en la superficie de contacto entre la armadura y el hormigón. La presencia de agentes agresivos como el oxígeno, agua y sales, son la causa fundamental que desencadena este proceso. Estos agentes agresivos atraviesan el recubrimiento de las armaduras, principalmente debido a un escaso espesor y una elevada porosidad del hormigón. Al alcanzar el elemento metálico, inician el proceso proceso de corrosión de las armaduras.

3.2.1. Proceso de corrosión

La oxidación es un proceso electroquímico, que puede ser catódico (de reducción) y anódico (de oxidación), lo que implica zonas con diferente potencial electroquímico, generando un flujo de electrones.

En el hormigón armado la zona anódica y catódica está ubicada sobre la superficie del acero, mientras que el hormigón es el electrolito, completando así la celda electrolítica llamada pila de corrosión. (Fernández, 2008)

La corrosión en armaduras se puede dar básicamente de dos formas: por carbonatación y por cloruros. La diferencia es que la primera es un daño generalizado y la segunda es puntal y se produce más rápidamente (figura 3.2.1).

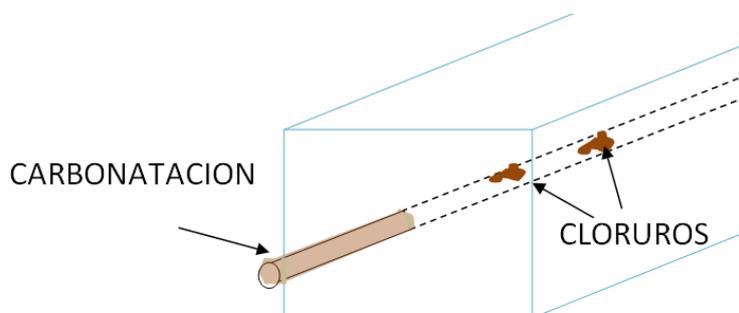


Figura. 3.2.1. Esquema de los dos tipos de corrosión, por carbonatación y por cloruros.

3.2.1.1. La carbonatación. Pérdida de alcalinidad

La carbonatación del hormigón es la reacción del dióxido de carbono (CO₂) de la atmosfera con sustancias alcalinas y componentes hidratados presentes en los poros del hormigón, que generan un descenso del PH (que normalmente es de 9.5) que ocasiona la despasivación del acero, es decir, un aumento de la velocidad de corrosión del metal por la eliminación total o parcial de la capa inerte que lo recubre (llamada capa pasiva), generando corrosión casi homogénea y generalizada (figura 3.2.2). Este proceso se produce cuando el PH del hormigón es inferior a 8.

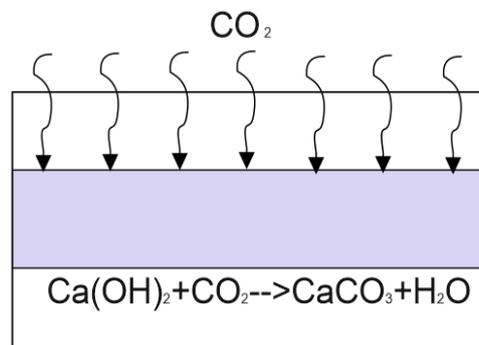


Figura. 3.2.2. Esquema del del proceso de carbonatación del hormigón.

En este proceso, la portlandita (componente del cemento) reacciona con el dióxido de carbono del aire, formando carbonato cálcico, como se muestra en la figura 3.2.2. Esta reacción generalmente cuando la humedad del medio es alta, ya que el dióxido de carbono reacciona con el agua formando ácido carbónico, que posteriormente reacciona con el hidróxido de calcio produciendo carbonato de calcio y agua (Fernández, 2008).

Cuando el hormigón ha sido completamente carbonatado el PH se reduce, lo que despasiva las armaduras, iniciándose el proceso de corrosión.

Los fenómenos que afectan la carbonatación son:

- La baja resistencia del hormigón. A menor resistencia se facilita el proceso de carbonatación en el hormigón. Algunos estudios demuestran que un hormigón de 150 KPa el frete de carbonatación avanza al doble de velocidad del que avanza en un hormigón de 300 MPa (Otsuki, el al., 2003).
- La humedad el medio. Para una humedad de entre el 60% y 75%, aumenta la reacción de carbonatación. Sin embargo, en el caso de una saturación total del medio, el proceso de carbonatación se detiene.

Para detectar la posible carbonatación, se aplica sobre la superficie del hormigón limpia una solución de fenolftaleína al 1% de etanol (que se torna de color púrpura cuando el PH se sitúa entre 9.5 y 10.0).

3.2.1.2. La corrosión por cloruros. Destrucción de la capa pasiva

Los iones despasivantes, como los iones cloruro, pueden romper la capa pasiva del acero, generando un ataque corrosivo en zonas localizadas a velocidades muy altas comparadas con el ataque por carbonatación (figura 3.2.3.). Este proceso se produce cuando el PH del hormigón está por encima de 3. Para una correcta protección de la capa pasiva el hormigón debe ser alcalino y presentar un pH comprendido entre 12.5 y 13.5.

En la corrosión por cloruros, la película pasiva se rompe en sectores puntuales, por lo que se produce una corrosión puntual por picaduras, que se produce en los sectores con mayor concentración de electrones, como son las soldaduras, fisuras o uniones entre barras de acero (Bello, 2013).

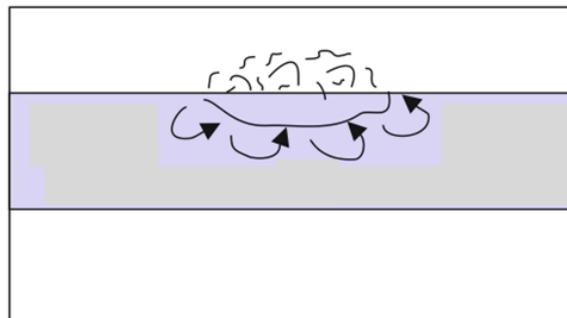


Figura. 3.2.3. Esquema del proceso de corrosión por iones cloruro.

Las causas de la presencia de iones cloruro en el hormigón son diversas, siendo las más frecuentes:

- Empleo de aditivos que tienen cloro como componente
- Ambientes salinos. Las estructuras que están construidas en estos entornos con alto contenido de sales están más expuestas a la corrosión por cloruros. Algunos de estos ambientes son:
 - Ámbitos marinos.
 - Ámbitos acuáticos

- Zonas con aguas que tengan un elevado contenido de sales (estructuras industriales donde existe presencia de residuos salinos).
- Adición de sales en zonas de helada. El problema de corrosión por cloruros se produce en tableros de puente sobre los que se distribuye sal o una solución salina para evitar que la nieve se convierta en hielo, con la correspondiente disminución en la adherencia de las ruedas con la capa de rodadura.

En la corrosión por cloruros, la película pasiva se rompe en sectores puntuales, por lo que se produce una corrosión puntual por picaduras, que se produce en los sectores con mayor concentración de electrones, como son las soldaduras, fisuras o uniones entre barras de acero (Bello, 2013).

3.2.2. Efecto de la corrosión en el hormigón armado

La corrosión ocasiona una reducción de la capacidad resistente de las armaduras ya que disminuye la sección resistente.

Así mismo, una corrosión elevada reduce la altura de las corrugaciones del acero, reduciendo la adherencia entre el acero y el hormigón. Una disminución de un 3% de la sección transversal de una barra se refleja en una disminución de un 20% de la corrugaciones (Bello, 2013).

Por otro lado, el principal efecto que produce la corrosión sobre el hormigón es el incremento del volumen del material, que genera tensiones radiales alrededor de la armadura iniciando un esquema de agrietamiento del hormigón alrededor de la armadura, que va creciendo incluso hasta llegar a provocar el desprendimiento del recubrimiento. (Figura 3.2.4.).

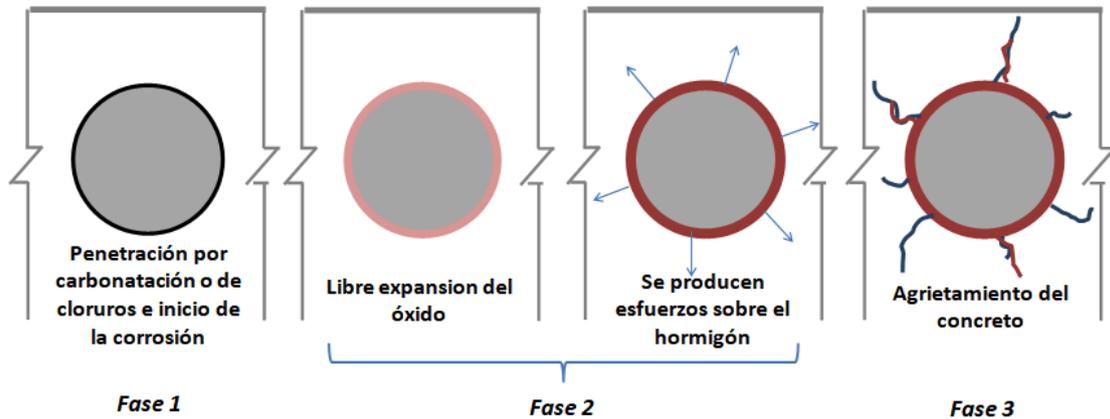


Figura 3.2.4. Proceso de desprendimiento del hormigón por corrosión descrita en tres fases (Hong et al., 2014).

La finalidad del recubrimiento es evitar que los factores ambientales dañen las armaduras, soportando el núcleo la mayor parte de las cargas solicitantes. Sin embargo, un elevado recubrimiento no garantiza la protección total de las armaduras frente a la corrosión, puesto que muchas ocasiones solo retrasa el inicio de este proceso. La pérdida de recubrimiento facilita la acción de los agentes corrosivos sobre las barras, aunque en ocasiones se puede producir corrosión sin una previa pérdida del recubrimiento. La corrosión puede producirse en armaduras internas o cuando el recubrimiento es el suficiente, sin generar indicios visibles en fases tempranas.

Por este motivo es importante la prevención, ya que los daños por corrosión en el hormigón armado son irreversibles, siendo los principales la pérdida de la sección efectiva y la pérdida de adherencia del acero con el hormigón (Figura 3.2.5.).



Figura 3.2.5. Daños por corrosión a) reducción de la sección del acero, b) pérdida de adherencia acero- hormigón.

3.2.2.1. Reducción de la sección de la armadura.

La reducción de la sección de la armadura es directamente proporcional a la reducción de su capacidad resistente. Además, la pérdida de ductilidad de la armadura produce, a su vez, una pérdida de ductilidad del elemento estructural al que pertenece. Este efecto es muy crítico si la estructura está emplazada en una zona de alta sismicidad, ya que en el caso de terremoto, la ductilidad de la estructura es un factor fundamental para la disipación de la energía sísmica.

La reducción de la sección de la armadura debe analizarse desde dos perspectivas. La primera, cuando la corrosión es homogénea sobre todo el contorno de la barra (corrosión por carbonatación). La segunda, cuando se producen picaduras en la sección del acero (corrosión por cloruros). En los dos casos se puede determinar el diámetro residual de la barra mediante la expresión:

$$\phi_R = \phi_o - \alpha P_x$$

Donde: P_x , es la profundidad de ataque, ϕ_R es el diámetro residual, ϕ_o es el diámetro original y α es el factor de corrosión.

Todos estos factores representan la geometría de la sección de la barra dañada (Figura 3.2.6.). En el caso de corrosión generalizada, el factor de corrosión es 2. Para una corrosión localizada, el factor de corrosión se sitúa entre 3 y 10.

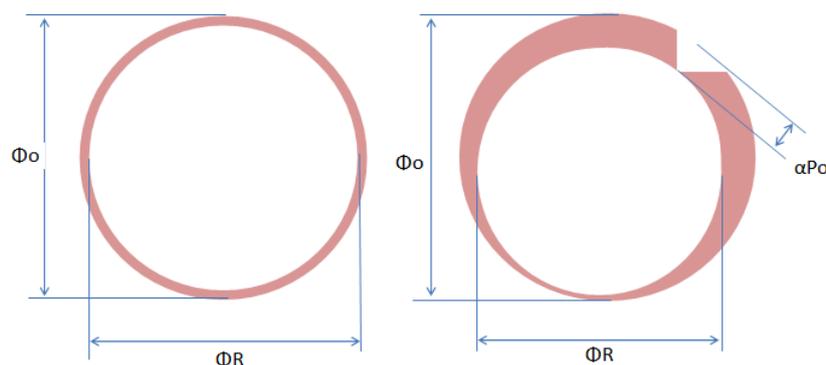


Figura.3.2.6. a) Corrosión homogénea; b) Corrosión por picaduras.

La pérdida de acero afecta directamente al diámetro de la sección de la armadura. La corrosión por picaduras (por cloruros) puede alcanzar pérdidas de sección de hasta un 50% del área de la barra no corroída, mientras que la corrosión generalizada (por

carbonatación) puede alcanzar pérdidas de sección de solo un 10%, asumiendo que ambas configuraciones han sufrido la misma intensidad de ataque corrosivo.

3.2.2.2. Pérdida de adherencia.

La pérdida de adherencia se produce en la interfaz armadura-hormigón. Es debida a que, durante la transformación de hierro metálico en óxido de hierro, el material pasa de un elemento compacto y resistente como es el hierro metálico, a un material de baja densidad y escasa resistencia mecánica como lo es el óxido de hierro. Este fenómeno ocasiona una reducción prácticamente total de la resistencia de adherencia entre los dos materiales.

La pérdida de adherencia de las barras con el hormigón cambia uno de los principios fundamentales de la teoría del diseño de hormigón armado, que afirma que debe existir un trabajo conjunto y monolítico entre sus dos materiales componentes. Todas las ecuaciones que respaldan las normas de hormigón armado, están desarrolladas bajo el principio de que las secciones permanecen planas antes y después de la deformación por cargas solicitantes, lo que significa que las deformaciones en el acero y el hormigón en un punto de contacto son las mismas, aspecto que solo está garantizado por una buena adherencia. (Jiménez et al., 2000)

La corrosión de las armaduras afecta a las estructuras de hormigón armado produciendo diferentes efectos:

- Pérdida de adherencia entre el acero y el hormigón.
- Pérdida parcial o total de las corrugaciones de la armadura. Ya se ha comentado que esta pérdida depende del grado de corrosión y que su sensibilidad es alta, ya que únicamente una pérdida del 3% de la sección transversal de la armadura equivale a una pérdida de más de un 20% de la altura de la corrugación. Debido a esta reducción, el efecto de acuñamiento (y, por lo tanto, la adherencia) disminuye notablemente (Castel, 2000).
- La corrosión genera tensiones radiales alrededor de la barra, que producen la fisuración del hormigón, llegando incluso a producir desprendimiento del recubrimiento de la armadura.
- Cuando la corrosión llega a la armadura transversal de las columnas, se puede perder la capacidad de confinamiento del núcleo del hormigón, reduciendo notablemente su resistencia y ductilidad (Bello, 2013).

3.2.3. Métodos de medición de la corrosión en armaduras emplazadas en elementos estructurales de hormigón

Actualmente existen varios métodos para la detección de la corrosión en el hormigón armado. Muchos de ellos se basan en el proceso electrolítico del fenómeno de corrosión, que se caracteriza por la formación de iones con carga eléctrica positiva y electrones libres con carga negativa. Estos métodos se basan en medir la carga eléctrica en el medio. El principal problema para aplicarlos es su carácter de ensayo destructivo, ya que es necesario taladrar hasta encontrar la barra en dos extremos, lo que además complica su utilización cuando se analiza áreas extensas.

Los métodos más usados son los de potencial espontáneo, los de potencial de corrosión, el método de confinamiento modulado de corriente, la reflectometría en el dominio del tiempo (*Time Domain Reflectometry* o TDR) y los sensores inductivos. En esta tesis se discute y analiza, además, la aplicación del método de prospección no destructivo mediante GPR para analizar daños por corrosión.

3.2.3.1. Potencial espontáneo

El método de prospección de potencial espontáneo consiste en medir, sobre la superficie del medio, diferencias de potencial natural que se producen debido a las reacciones electroquímicas en su interior. Cuando se produce corrosión en una armadura, se induce polarización en algunos sectores, lo que induce un potencial espontáneo que puede medirse con un voltímetro, pudiendo llegar a evaluar el grado de corrosión (Figura 3.2.7.)

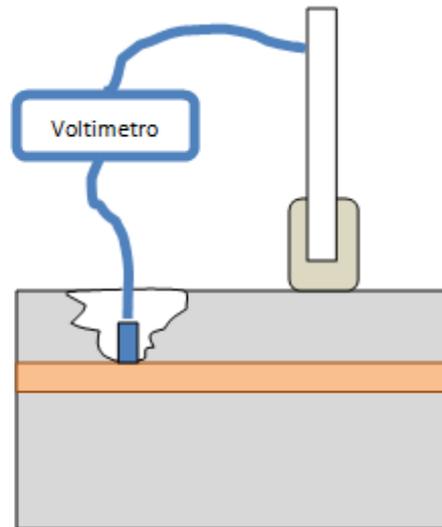


Figura. 3.2.7. Mecanismo del método de potencial espontáneo

El proceso es rápido, pero tiene el inconveniente de requerir un electrodo o terminal especial para conectar el voltímetro con la armadura.

Partiendo de las medidas de potencial espontáneo se puede determinar el grado de corrosión (Rosado, 1985). Para ello se considera que:

- Si los potenciales positivos superan los -0.20 voltios, la posibilidad de que la barra esté sana y no se haya producido ningún proceso de corrosión es superior al 90% de que la barra esté sana.
- Si los potenciales están entre -0.20 y -0.35 voltios, la posibilidad de una actividad corrosiva es incierta.
- Si los potenciales negativos son menores a -0.35 voltios, la posibilidad de que se esté produciendo corrosión se sitúa por encima del 90%.

Se considera la medida del potencial espontáneo como un buen indicador del grado de corrosión, aunque también es importante analizar en entorno del área de estudio, pues la presencia de cloruros o sulfatos podría cambiar radicalmente los parámetros de potencial eléctrico anteriormente señalados.

3.2.3.2. Medida del potencial de corrosión

Este método por su sencillez ha sido utilizado ampliamente en estructuras de hormigón armado. Este método realiza la estimación del potencial eléctrico de media en el acero de refuerzo, con el fin de determinar la actividad de corrosión. Está enmarcado en la

norma *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete (Withdrawn 2008)* ASTM C 876-91.

Se utiliza como método de análisis y también como técnica combinada con otros métodos, como el de resistencia de polarización. Sin embargo, no proporciona una medida directa de la velocidad de corrosión o de la corrosión total, aunque es una herramienta útil para confirmar si se ha producido o no corrosión, siendo un método que proporciona con bastante rapidez el resultado (Figura 3.2.8.).

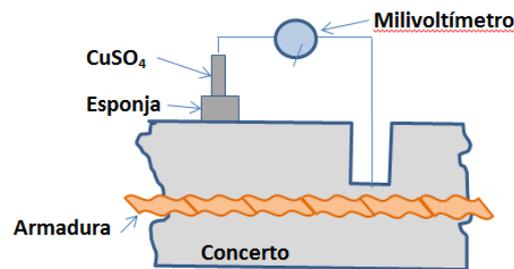


Figura. 3.2.8. Esquema del método de Potencial de corrosión.

Cuando se inicia el proceso de corrosión en la armadura dentro del hormigón armado, se produce diferencia de potencial entre las áreas de media celda anódicas y las áreas de media celda catódicas en la armadura. Este potencial de corrosión de media celda puede medirse comparando el valor con el obtenido en una celda de referencia normalizada, que presenta un valor constante conocido (Viveros, 2008).

El ensayo emplea un voltímetro de precisión de alta impedancia y un electrodo de referencia de CuSO_4 .

3.2.3.3. Método de confinamiento modulado de corriente

Existen varios métodos para calcular el valor de la resistencia de polarización real. Uno de más empleados es el método de confinamiento modulado de corriente, también llamado anillo de guarda. El procedimiento consiste en aplicar un pulso galvanostático de duración entre 30 y 100 segundos. Para aplicarlo se utiliza un electrodo central. Posteriormente se aplica otra contra corriente desde el anillo externo modulada mediante dos electrodos de referencia denominados, controladores de anillo, hasta lograr un equilibrio de la corriente interna y externa. (Feliú *et al.*, 1990).

Se debe señalar que este procedimiento es eficaz sólo si se emplea un confinamiento modulado y controlado a través del anillo de guarda, llamado efecto “s”, que se logra mediante dos sensores ubicados entre el electrodo central y el anillo de confinamiento, como se muestra el esquema de la Figura 2.3.9.

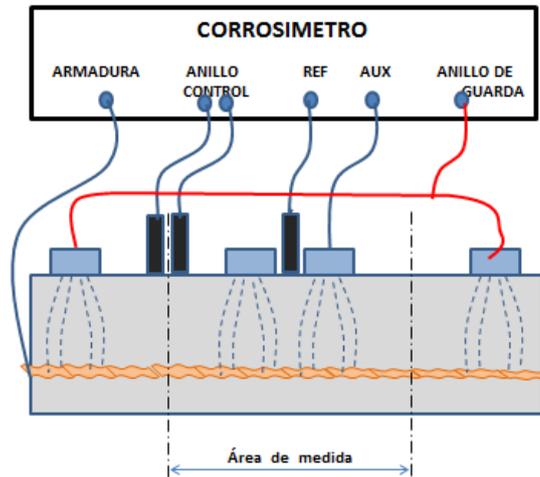


Figura. 2.3.9. Esquema método del confinamiento modulado (Modificado de Andrade et al., 2001).

3.2.3.4. Refractometría en el dominio del tiempo (TDR)

Este método detecta la corrosión en barras de refuerzo y cables de acero embebidos en el hormigón. Mide las discontinuidades de las líneas de transmisión eléctrica producto de los cambios de las propiedades electromagnéticas de la barra o cable que generan las superficies de oxidación, creando distorsiones que se incrementan al aumentar el grado de oxidación.

El equipo utilizado para realizar las medidas consta de dos conductores recubiertos que se introducen de forma permanente a lo largo de la barra o cable (Figura 2.3.10.), antes de ser hormigonada. Este dispositivo al estar inmerso en la estructura resulta un instrumento que monitoriza de forma permanente el proceso de corrosión (Liu *et al.*, 2002).

Al inicio del conducto está ubicado el elemento de detección, que consta de un generador de pulsos y un osciloscopio. El primero genera la señal, y el segundo detecta la señal que puede venir distorsionada en caso de que se presente oxidación o un proceso de oxidación en las armaduras o en los cables.

Este lector que capta las distorsiones producto de los sectores de barra o cable oxidados (Figura 2.3.11.), tiene la capacidad de no sólo de detectar la posición de los sectores con proceso de corrosión, sino también de determinar el grado de corrosión que presentan dichos tramos de barra o de cable.

De este modo, el método de TDR, además de permitir localizar los los sectores dañados, evalúa la severidad del daño de la barra o en el cable en estudio, es también capaz de detectar otros efectos como los agrietamientos por fatiga, agrietamientos producto de un elevado grado de oxidación, y también sectores de recubrimiento de hormigón que se encuentran cercanos al desprendimiento producto del aumento de volumen de acero de las barras a causa de la corrosión.

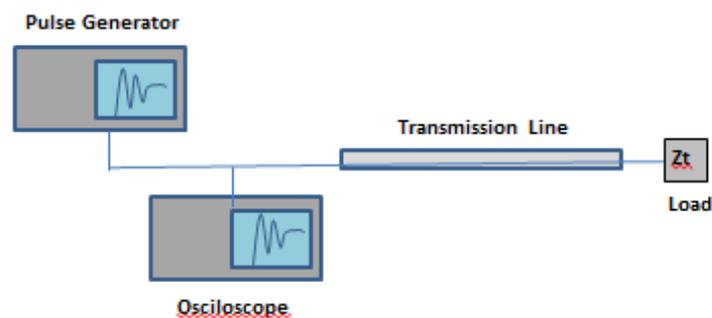


Figura.3.2.10. Esquema del método TDR.

Este método es un procedimiento que se emplea con más frecuencia en trabajos de monitoreo, ya que la línea de transmisión debe estar hormigonada junto a las barras que se desean estudiar. Por lo tanto no es adecuado para la observación de armaduras en las que no se ha dispuesto previamente el emplazamiento de la línea de transmisión

3.2.3.5. Método del sensor inductivo

Este método consiste en analizar la corrosión superficial de las barras a través de la inducción magnética sobre la barra oxidada, cuya respuesta es un campo magnético con una fase distinta a la fase original. Esta diferencia de fase determina el grado de corrosión de la armadura.

Utiliza una bobina de inducción para generar la onda magnética, que posteriormente se refleja en la armadura oxidada. El coeficiente de reflexión depende del grado de oxidación de la armadura. La reflexión se detecta mediante otra bobina llamada colectora, y posteriormente se analiza el cambio de fase entre la onda origen y la onda de respuesta (Figura 2.3.11.).

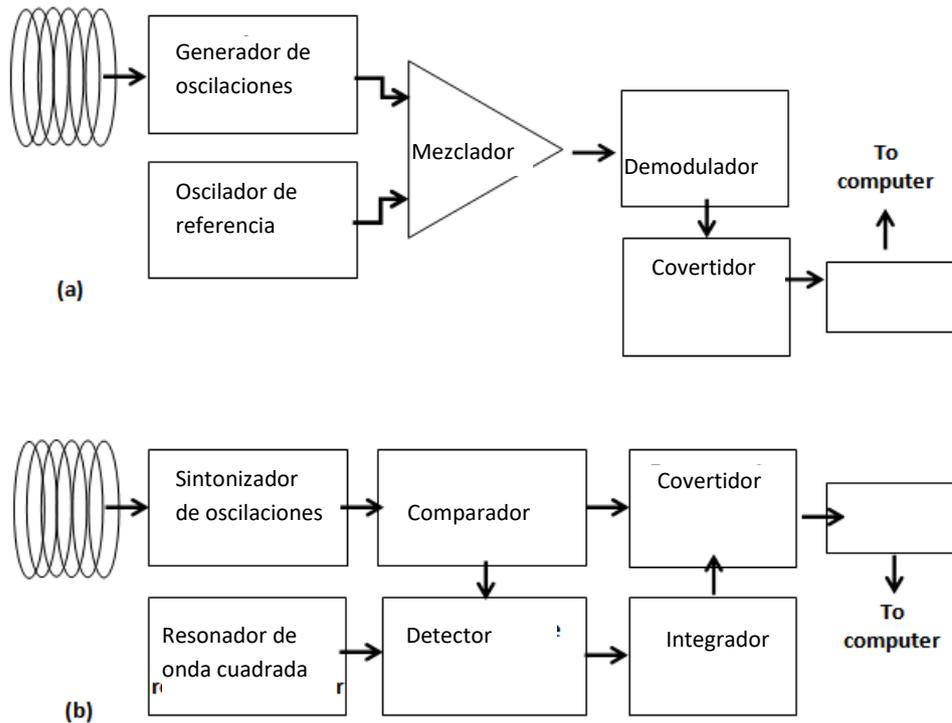


Figura. 3.2.11. Esquema del instrumento método del sensor inductivo. a) Inductor magnético. b) Colector magnético (Modificada de Miller et al., 2003).

El método se basa en las variaciones en la conductividad eléctrica y en la permeabilidad magnética del material que se producen debido a la oxidación (Miller *et al.*, 2003).

La figura 3.3.13. muestra las imágenes que se obtienen al aplicar este método. Se observa visualmente la diferencia que existe entre el sector oxidado y el no oxidado de una barra de acero.

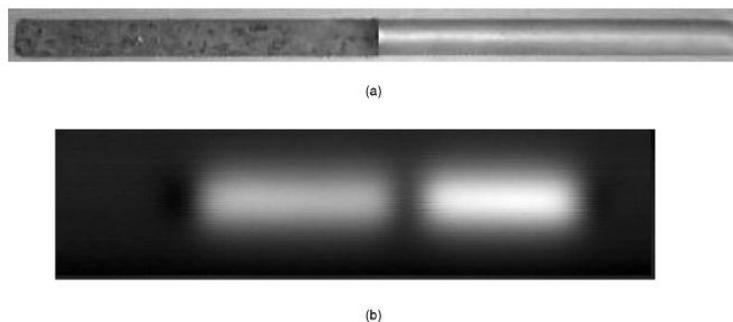


Figura. 3.2.13. a) Barra dañada. b) Anomalia detectada por el instrumento (Miller *et al.*, 2003).

Este procedimiento tiene un grado de precisión capaz de detectar zonas con corrosión hasta de 2 mm de espesor, sobre barras de 20 mm de diámetro recubiertas hasta con 30 mm de hormigón.

Como se puede ver este sistema emplea un tratamiento de ondas muy similar al que realiza el GPR, debido a que principalmente, la corrosión es detectada por una alteración de ondas reflejadas en sectores de armadura que presentan corrosión.

De esta manera dado que este método ya ha sido ampliamente empleado y con resultados satisfactorios, se puede afirmar que el empleo del GPR puede presentar resultados similares e incluso más satisfactorios.

3.2.3.6. Ground Penetrating Radar

Algunos estudios recientes aplican la prospección geofísica no destructiva con GPR para analizar la corrosión de elementos metálicos embebidos en hormigón. Los primeros resultados muestran diferencias entre los radargramas obtenidos en el caso de una armadura sana y en el caso de armaduras corroídas (Eisenmann *et al.*, 2012; Krishnajarapete, 2015).

Actualmente se puede alcanzar una resolución vertical teórica del orden de 0.5 milímetros con antenas de 6 GHz (Huston *et al.*, 2011). Esta resolución, considerada como $\lambda/4$, permitiría detectar la delaminación del sustrato de óxido de hierro producto de la corrosión, como se muestra en la figura 3.14.

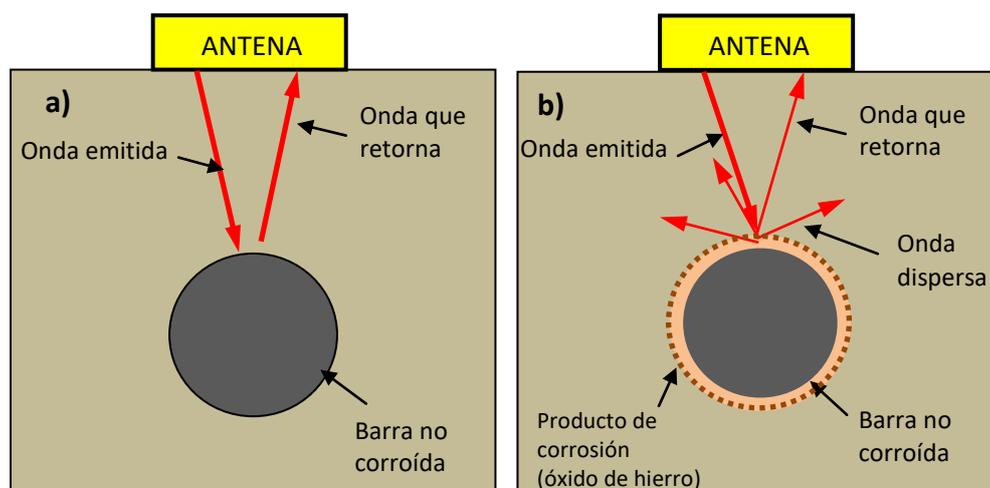


Figura 3.2.14. Retrodispersión de la onda de radar en el caso de una barra sin corrosión (a) y una barra con corrosión (b) (Hasan *et al.*, 2016).

Los resultados son aun más claros cuando se generan pseudosuperficies paralelas a la superficie del medio (*slices*) a partir de imágenes tridimensionales que se obtienen por interpolación de los B-scans, ya que permiten ver con mayor claridad las variaciones de amplitud de la señal debidas a los cambios en las barras de acero, por los distintos grados de corrosión (Figura 2.3.15.) (Kabir & Zaki, 2011).

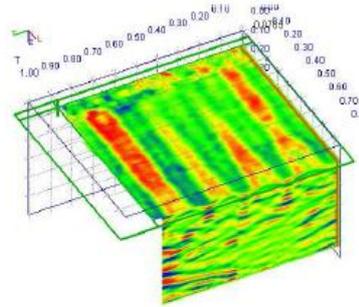


Figura 3.2.15. Pseudosuperficie (*slice*) en una representación combinada con los radargramas. Puede observarse la mayor amplitud asociada a la presencia de barras metálicas, y el efecto que produce sobre la imagen la corrosión de las barras centrales, donde se aprecia una fuerte atenuación de la señal (Kabir & Zaki, 2011).

Los resultados de algunos estudios demuestran que el georradar puede llegar a detectar corrosión. Estos estudios suelen presentar un análisis cualitativo del daño, basado en las imágenes de radar. La interpretación tridimensional de los registros puede proporcionar unas imágenes más claras y evidentes de las zonas dañadas por corrosión. El método permite identificar estas zonas debido a la fuerte atenuación que se produce en la señal.

3.3. EQUIPO Y METODOLOGÍA

3.3.1. Equipo de radar de penetración terrestre

El equipo de radar está compuesto básicamente por una unidad de control, antenas emisoras y receptoras, baterías, un monitor para visualizar los registros, una unidad de almacenamiento de datos y, en ocasiones, otros dispositivos auxiliares (habitualmente para posicionar las antenas) como son odómetro y el GPs (Figura 3.3.1).

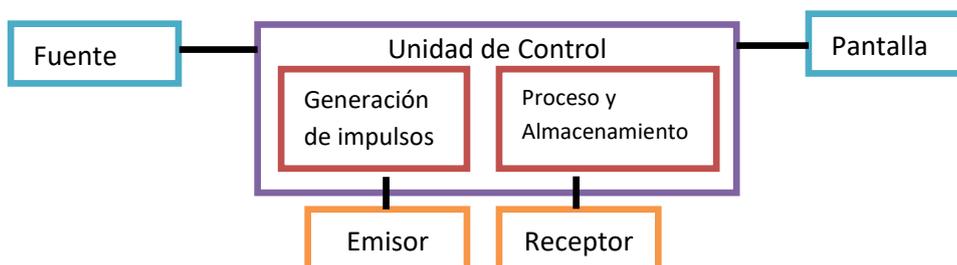


Figura 3.3.1. Esquema del equipo radar

- Un GPS para un posicionamiento espacial del instrumento a fin de ofrecer resultados más adecuados con el entorno

3.3.1.1. La unidad de control

La unidad de control o unidad central es una computadora con la que se controlan todos los elementos del equipo. Mediante esta unidad se determinan los parámetros para la adquisición de datos, se almacenan los registros, se gobiernan las antenas y se interpretan los pulsos electromagnéticos que reciben, transformándoles en diferencias de potencial. Mediante esta unidad también se puede realizar un procesamiento de datos rápido y se gestiona la visualización de los registros en tiempo real, pudiéndose modificar la ganancia para amplificarla.

3.3.1.2. La fuente de alimentación

Es la unidad encargada de proporcionar la energía que necesitan los diferentes componentes del equipo. Generalmente se trata de baterías recargables de ion-litio.

3.3.1.3. La pantalla

La unidad de control está unida a una pantalla en la que se pueden ver los registros en tiempo real, tanto en forma de A-scan como en forma de B-scan. La pantalla suele tener un teclado u otros controles, para poder acceder a todas las opciones que regulan tanto la adquisición como la visualización de los datos. Actualmente las pantallas de los equipos comerciales tienen elevada resolución y permiten mostrar imágenes en blanco y negro o en gamas de colores preseleccionadas.

3.3.1.4. Las antenas

Una primera clasificación de antenas permite separarlas en dos grandes grupos: las monoestáticas y las biestáticas. Las primeras tienen un único dipolo que alterna su función como emisor y receptor. Las antenas bi-estáticas están compuestas por dos dipolos, uno de ellos que ejerce las funciones de antena emisora y el otro de antena receptora.

Tanto las antenas monoestáticas como las biestáticas pueden ser isotrópicas o bien tener una dirección de emisión y recepción privilegiada (antenas apantalladas). Las antenas apantalladas suelen ser más pesadas y de mayor tamaño, pero permiten reducir el ruido debido a reflexiones en objetos externos al medio (clutter). La existencia de este ruido produce registros confusos, ya que se superponen las señales procedentes del interior del medio con las procedentes del exterior.

3.3.1.5. Odómetro

Consiste en una rueda de diámetro conocido y un contador de vueltas. Durante la adquisición de datos el odómetro debe ir unido a la antena y en contacto con la superficie del medio. Al desplazar la antena, la rueda gira, y de este modo se puede determinar la distancia recorrida en cada instante a lo largo del perfil.

3.3.1.6. GPS

Permite proporcionar la ubicación espacial georreferenciada de las antenas.

3.3.2. Adquisición de datos

Los registros de georradar son en realidad registros puntuales. Mediante los parámetros de adquisición de datos se determina el intervalo de tiempo entre pulsos emitidos por la antena y la ventana temporal durante la que se realizará el registro. Si, por ejemplo, se realiza una adquisición de datos con trazas cada 2 segundos, cada registro será una única traza separada 2 s de la siguiente, sea cual sea la distancia que se haya recorrido con la antena durante esos 2 segundos. Si se realiza una adquisición de datos con odómetro, indicando que se obtenga una traza cada 2 cm, la separación entre registros puntuales será de 2 cm. Estos registros puntuales son los A-scan o trazas (Figura 3.3.2.). Cada uno de ellos presenta una cierta longitud que depende de la ventana temporal de registro que se haya seleccionado, representando la amplitud de la señal en cada uno de los instantes de tiempo.

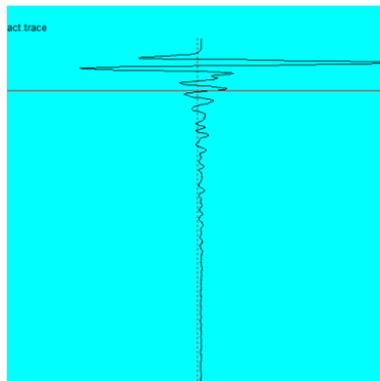


Figura 3.3.2. Registro puntual o A-scan

Sin embargo, como la densidad del muestreo es elevada, los registros de radar suelen presentarse como secciones bidimensionales llamadas B-scans o radargramas (Figura 3.3.3.). En realidad, cada una de estas secciones es un conjunto de A-scans puntuales. Cada uno de estos registros es un mapa de amplitudes (que se representan utilizando una escala prefijada de colores o de gama de grises) que, en el eje horizontal muestra la posición de la antena o el punto en el que se ha adquirido cada A-scan a lo largo de una línea de adquisición de datos, y en el eje vertical el tiempo doble de propagación, que puede transformarse en profundidad conociendo la velocidad de propagación de la onda en el medio.

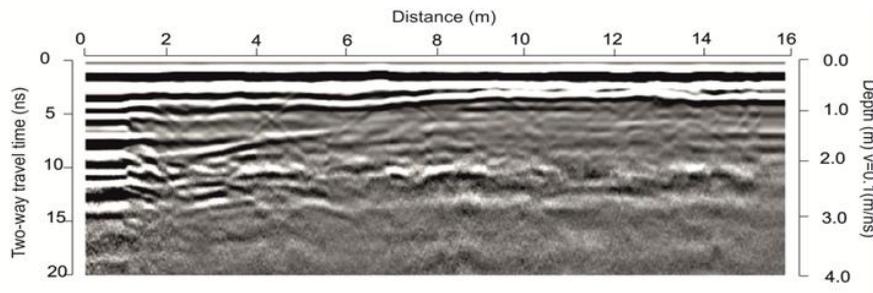


Figura 3.3.3. Radargrama o B-scan

De este modo, la presentación de los registros obtenidos durante la detección de objetos aislados, como por ejemplo barras de acero inmersas en hormigón muestra una sección continua donde los objetos puntuales embebidos en el medio se representan mediante hipérbolas. Esta representación es debida a que las antenas emiten y reciben en un cono de emisión, de manera que antes de quedar situadas sobre la vertical del objeto ya reciben reflexiones en su superficie. El tiempo de propagación de estas reflexiones disminuye hasta su valor mínimo, en el instante en el que la traza se corresponde con la posición sobre la vertical del objeto. (Huston *et al.*, 2000). La unión de todas estas trazas produce la conocida forma hiperbólica de los objetos puntuales en los radargramas (Figura 3.3.4).

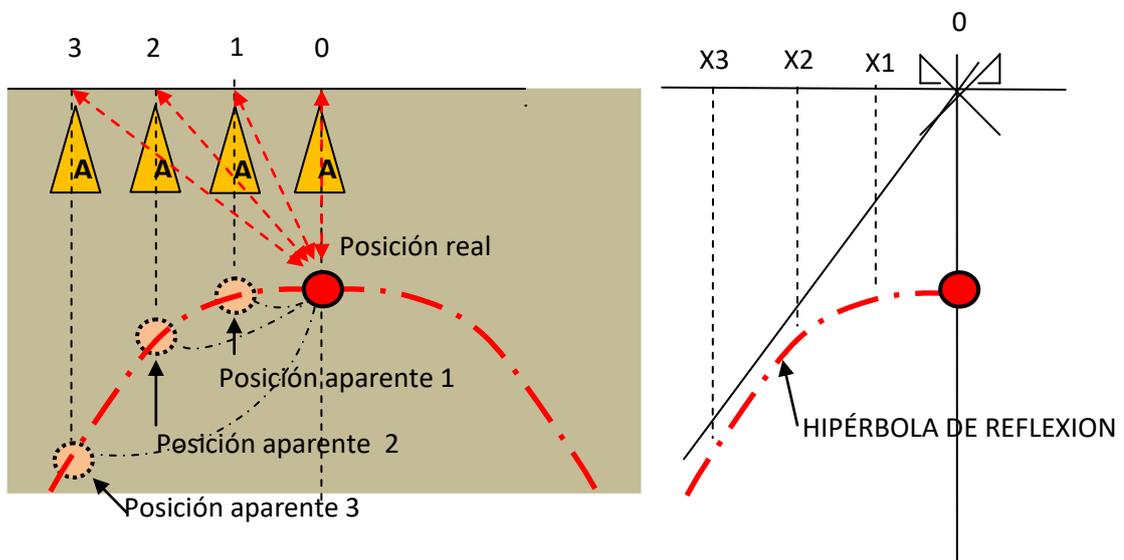


Figura3.3.4. La reflexión en elementos puntuales genera anomalías hiperbólicas debido al cono de emisión de energía (Modificada de Huston et al, 2001)

Muchas de las antenas utilizadas en estudios de ingeniería civil son antenas direccionales. Es decir, están diseñadas para que la emisión y la recepción de la energía se concentre en una única dirección del espacio que es la perpendicular a la superficie del medio que se estudia. Esta energía se emite principalmente en un cono cuya

proyección a una profundidad determinada (o en un tiempo determinado) conforma lo que se denomina huella de la antena (figura 3.3.5). Esta configuración permite emitir la mayor intensidad de energía hacia el interior del medio, permitiendo detectar con mayor claridad las anomalías asociadas a reflexiones en el interior del medio, ya que no se registran anomalías correspondientes a reflexiones en elementos externos al medio o, si se registran, son eventos de muy poca intensidad.

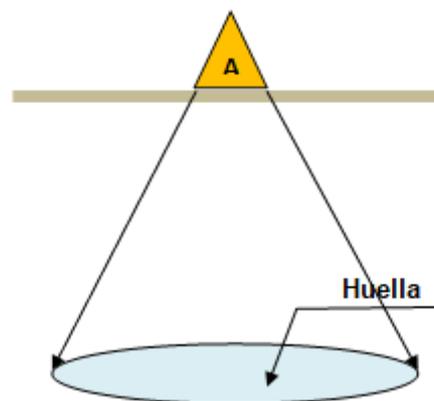


Figura 3.3.5. La huella de la antena se produce debido al cono de emisión. Es la zona iluminada a una determinada distancia (Modificada de Huston et al, 2001).

Los registros de radar se suelen obtener desplazando la antena sobre la superficie del medio. En ocasiones puede utilizarse más de una antena situadas sobre la misma superficie o en superficies opuestas. Hay varios métodos de adquisición de datos, que dependen del número de antenas utilizado y de su disposición sobre el suelo:

- Punto medio común (*common mid point*)
- Reflexión y refracción de gran ángulo (*Wide Angle Reflection and Refraction*)
- *Common offset* con un emisor y un receptor
- *Common offset* con un conjunto (*array*) de antenas
- Transiluminación
- Tomografía

3.2.2.1. Common Mid Point (CMP)

La adquisición de datos mediante CMP se realiza con dos antenas (una emisora y otra receptora) que se desplazan una respecto de la otra manteniendo un punto medio fijo.

Estas antenas pueden irse aproximando una a la otra o bien alejándose una de la otra, tal como se muestra en la figura 3.3.6. (Huisman *et al.*, 2003).

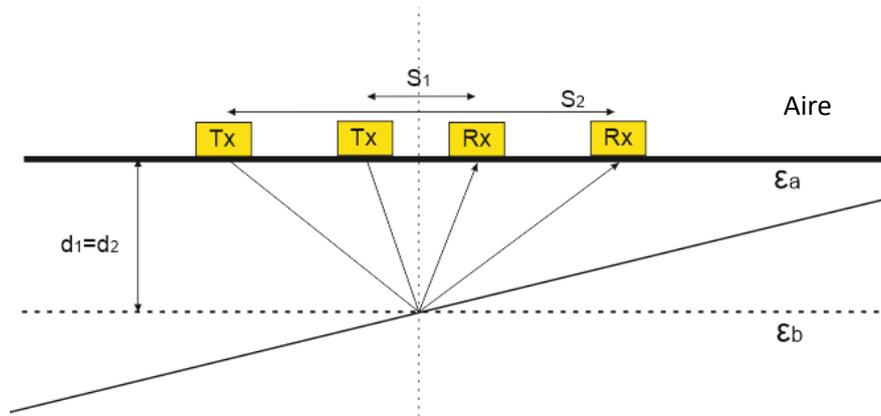


Figura 3.3.6., Esquema de *Common Mid Point* (Modificada de Gruber *et al.*, 1996).

3.2.2.2. Wide Angle Reflection and Refraction (WARR)

Este método de adquisición de datos consiste en mantener la antena transmisora fija en una ubicación, mientras la antena receptora se aleja gradualmente (Huisman *et al.*, 2003) (Figura 3.3.7).

Los registros muestran las ondas directas y refractadas como líneas rectas, mientras que las anomalías debidas a la reflexión en una superficie plana se observan como ramas de hipérbolas.

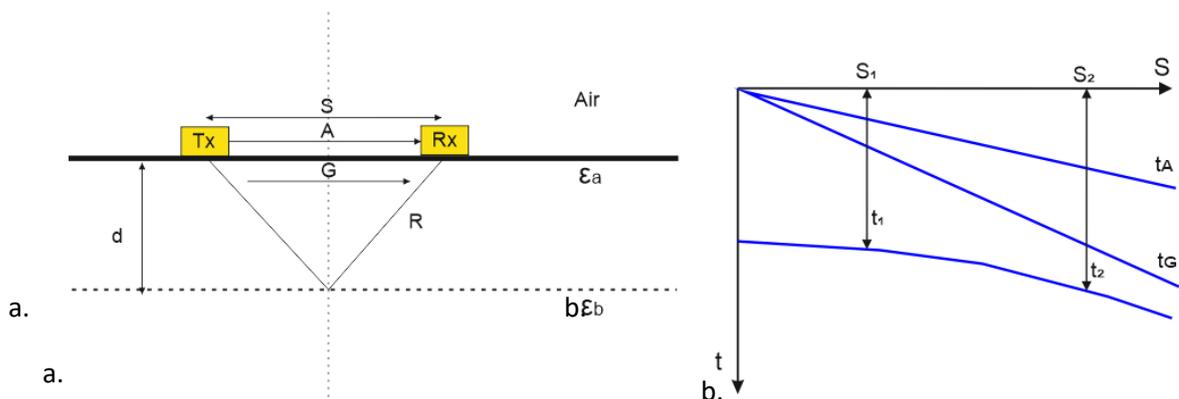


Figura 3.3.7. Esquema y representación del WARR (Modificada de Gruber *et al.*, 1996).

Como se observa en la figura 3.3.7, durante la toma de datos la antena transmisora se encuentra estática, mientras la antena receptora se desplaza hacia la derecha. El registro muestra tres anomalías debidas, cada una de ellas, a las ondas que se propagan desde la

antena transmisora y la antenna receptora. La onda “A” es la onda directa que se propaga por el aire; la onda “G” es también una onda directa pero que se propaga a menor velocidad por la superficie del medio-; la onda “R” es la que se transmite al interior del medio y se refleja en una discontinuidad electromagnética (Huisman *et al.*, 2003).

3.2.2.3. Common Offset

Este método se realiza con una única antena o bien con dos antenas que se desplazan en la misma dirección, manteniendo fija su separación. Es la forma de adquisición de datos más utilizada por su sencillez y rapidez. La figura 3.9 muestra el proceso de adquisición de datos.

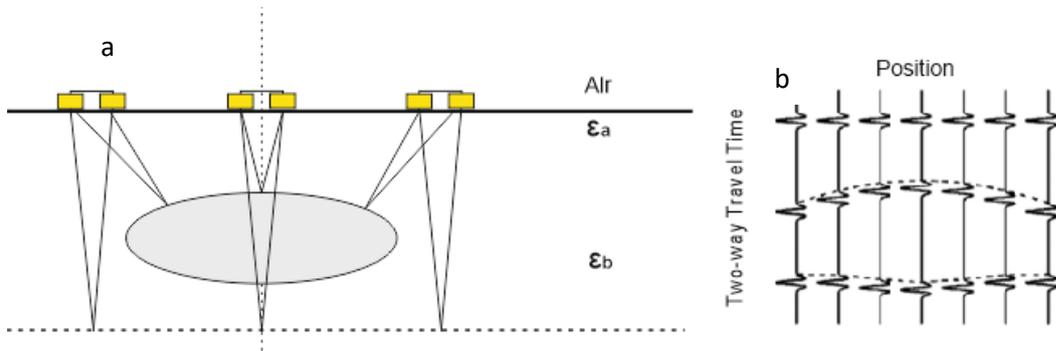


Figura 3.3.8. Disposición del instrumento y resultados (Modificado Huisman *et al.*, 2003).

Este método tiene dos alternativas que están definidas en función de la distancia que existe entre la antena transmisora y la antena receptora. Por ambos procedimientos las trazas A-scan se verán como la figura 3.3.8.b derecha, donde claramente se ve como se define el objeto y la base del medio en estudio.

3.2.3. Procesado de datos

Los registros de radar incluyen los efectos debidos a las señales que llegan desde el interior del medio debido a la reflexión de la energía. Pero también incluyen registros que se consideran ruido, y que se superponen con las señales de interés, generando un registro confuso y poco limpio.

La señal que se registra tras su propagación por el medio puede superponerse con otras señales y, al mismo tiempo, atenuarse debido a la absorción del medio y a la dispersión

del frente de ondas. Los efectos que pueden dificultar el reconocimiento de las señales son debido a acoplamiento son:

- Interferencia o ruido exterior por ruido como emisoras de televisión, radios, etc.
- Interferencia o ruido producto de ondas dispersas que llegan al instrumento producto de reflexiones aleatorias provenientes del interior del medio.

Los efectos de atenuación se producen por:

- Atenuación óhmica, producida por las propiedades electromagnéticas del medio (permitividad dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad eléctrica).
- Atenuación por dispersión, producto de la irradiación en otras direcciones o dispersión de la onda.
- Atenuación por absorción de energía por el medio.

El procesado que se realiza tras la adquisición de datos tiene como objetivo mejorar la calidad de los registros y su visualización, aumentando el ratio señal/ruido. (Robinson *et al*, 2014). Los filtros que se aplican en el procesado deben permitir mejorar la relación señal/ruido, considerando en todo momento las limitaciones del método de prospección.

3.2.3.1. Eliminación del ruido

En los registros de georradar puede aparecer ruido superpuesto a la señal. El ruido puede tener diferente origen. Las principales causas de ruido en los A-scan son debidas a:

1. Ruido electrónico debido a los componentes de las antenas y al cableado
2. Ruido debido a la reconstrucción de la señal, obtenida a partir de la interpolación de medidas puntuales (jitter)
3. Reflexiones en elementos diferentes a los que se quieren estudiar (clutter). Estos elementos que producen interferencia con la señal pueden estar situados en el interior del medio o en el exterior.
4. Ruido de fondo de la señal debido a la energía procedente de la dispersión de la energía debido a irregularidades de tamaño del orden de una cuarta parte de la longitud de onda.

5. Interferencias con señales que emiten a frecuencias que están situadas dentro del rango de las antenas utilizadas.
6. Interferencias con campos eléctricos generados por tendidos eléctricos

Algunos autores han realizado un análisis de los diferentes tipos de ruido, comparando los distintos procesados que permiten mejorar la relación señal/ruido. La mayor parte de los trabajos utiliza el análisis frecuencial para determinar las bandas de frecuencia que presentan picos lejos de la frecuencia central de la antena. Esto permite definir los parámetros para aplicar filtros paso banda en el dominio temporal, disminuyendo el efecto de las señales fuera de la banda de frecuencias seleccionada. Un interesante análisis lo presenta Ostoori et al (2018), proponiendo descomponer la señal en una suma de componentes oscilatorios intrínsecos finitos, para una eliminación de ruido componente por componente. La figura 3.3.9 muestra los resultados del procesado utilizado.

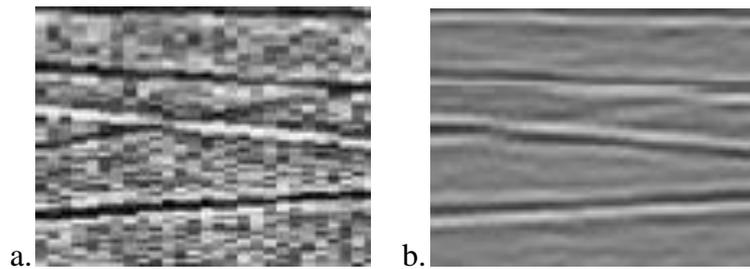


Figura 3.3.9. a) Radargrama original con ruido. b) Radargrama procesado, en el que se observa una gran disminución del ruido (Ostoori et al, 2003).

3.2.3.2. Correcciones topográficas

Un radargrama representa siempre la superficie como un plano horizontal. Si la superficie tiene una topografía irregular, las anomalías debidas a las reflexiones en elementos internos sufren una deformación. Para obtener una imagen más realista del interior del medio, se debe adaptar el registro a la topografía del medio. Esto se realiza mediante correcciones topográficas (Farhah-Bostanudin, 2013).

La figura 3.3.10 muestra el cambio en el registro tras haber aplicado una corrección topográfica.

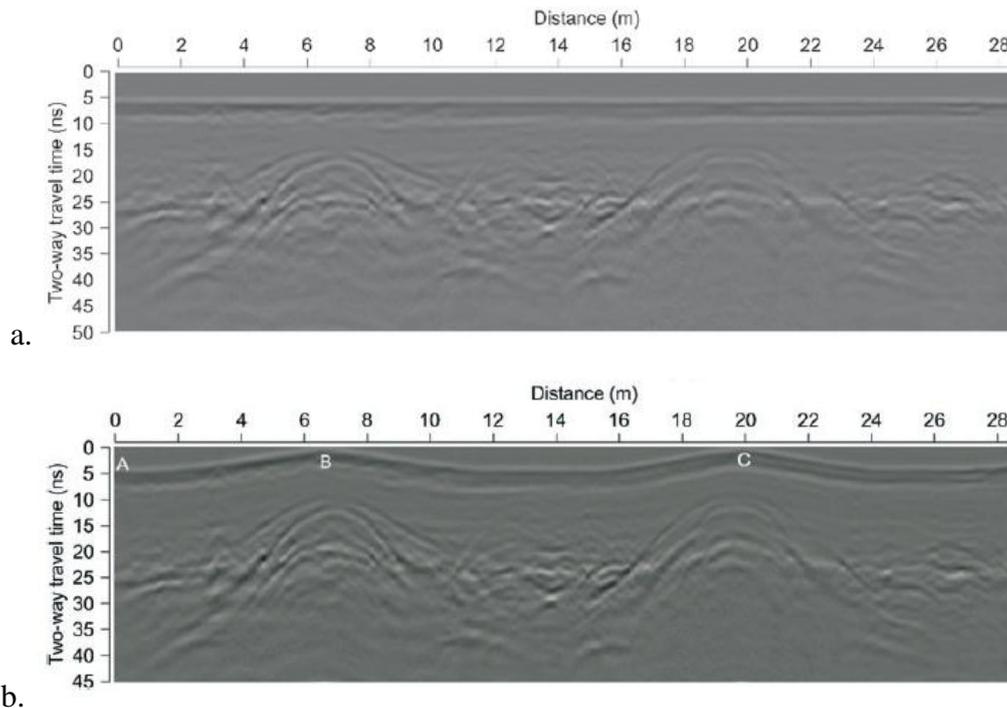


Figura 3.3.10. a) Radargrama de la cubierta de la Iglesia Santa María del Mar. b) Radargrama tras aplicar una corrección topográfica para adaptar el registro a la superficie de la cubierta.

3.2.3.3. Corrección del origen de tiempos

Se utiliza para ajustar las trazas a un mismo origen de tiempos antes de procesarlas, para que todos los ejes temporales coincidan y las anomalías estén referidas a un plano común. En la práctica es la (Robinson *et al.*, 2013). Asociar el origen de tiempos con la superficie del medio es un procedimiento básico es un parámetro indispensable para una correcta interpretación de resultados y para poder realizar medidas precisas de la profundidad o del espesor de los materiales (Yelf, 2014).

3.2.3.4. Ganancia

La ganancia se utiliza para compensar la atenuación que sufren las ondas durante su propagación. Este ajuste permite destacar anomalías muy poco relevantes en zonas de mayores tiempos de propagación del registro.

Uno de los procedimientos más empleados es el Control Automático de Ganancia (AGC), cuyo procedimiento consiste en ajustar la amplitud de la traza dentro una ventana temporal que va desplazándose en el tiempo, amplificando las trazas en zonas de menor amplitud, figura 2.3.12.

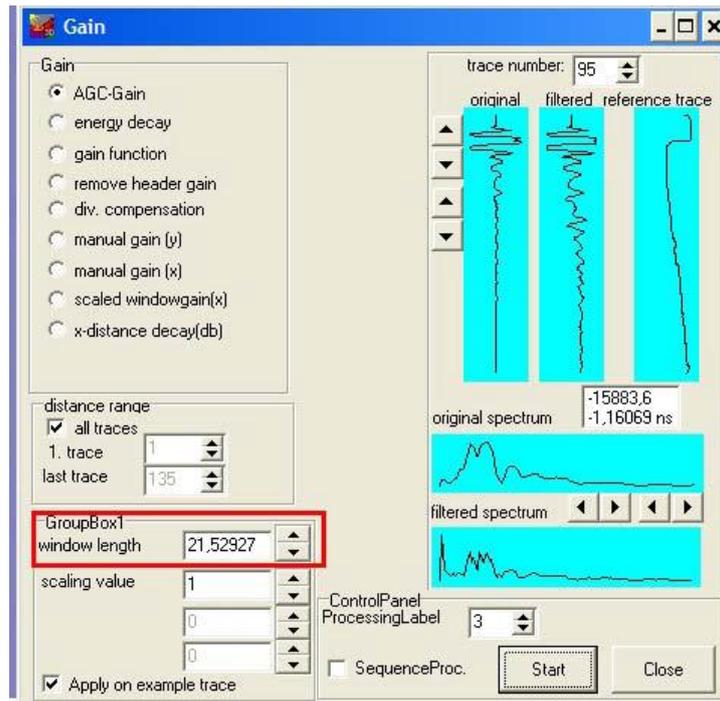


Figura3.3.12. Amplificación de la amplitud en el tiempo empleando AGC

3.2.3.5.. Filtro dewow

Es un filtro que sirve para eliminar el efecto de campos estáticos o cuasi-estáticos asociados a la electrónica de la antena o a campos de inducción cercanos, que hacen que la onda altere de su eje de propagación producto de las componentes de continúa.

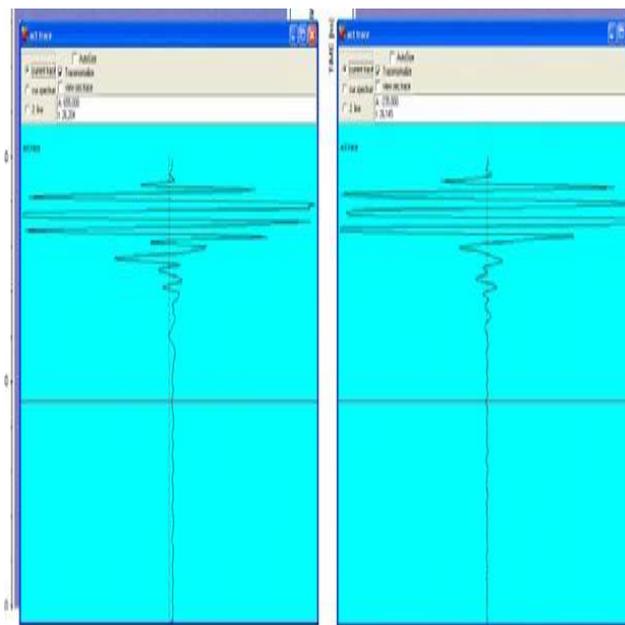


Figura3.3.14. Dewow filtering

3.2.3.6. Filtro paso alta

Es otro filtro temporal del tipo vertical (la escala del tiempo está expresada verticalmente en el radargrama), que sirve para eliminar los ruidos de bajas frecuencias, que generalmente están asociados al tipo de antena, a cables que van de la unidad de control a la antena y a la unidad de control propiamente dicha.

Para su aplicación es necesario pasar la onda de un dominio temporal a un dominio frecuencial, definir la frecuencia central y a partir de ello eliminar las frecuencia bajas que perjudican la información (figura 3.3.15),

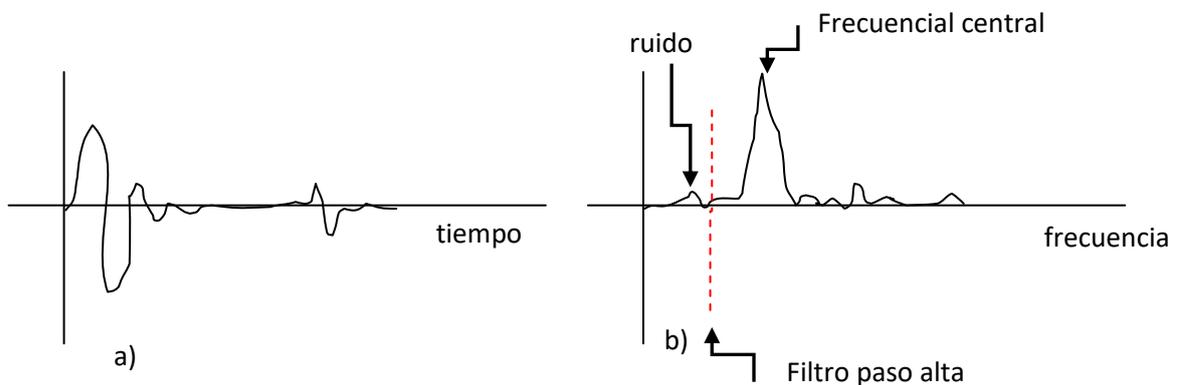


Figura 3.3.15. Filtro paso alta a) Dominio temporal, b) Dominio frecuencial

3.2.3.7. Filtro paso baja

Es otro filtro temporal del tipo vertical (la escala del tiempo está expresada verticalmente en el radargrama), que sirve para eliminar los ruidos de frecuencias altas.

Para su aplicación es necesario pasar la onda de un dominio temporal a un dominio frecuencial, definir la frecuencia central y a partir de ello eliminar las frecuencia altas que perjudican la información (figura 3.3.16),

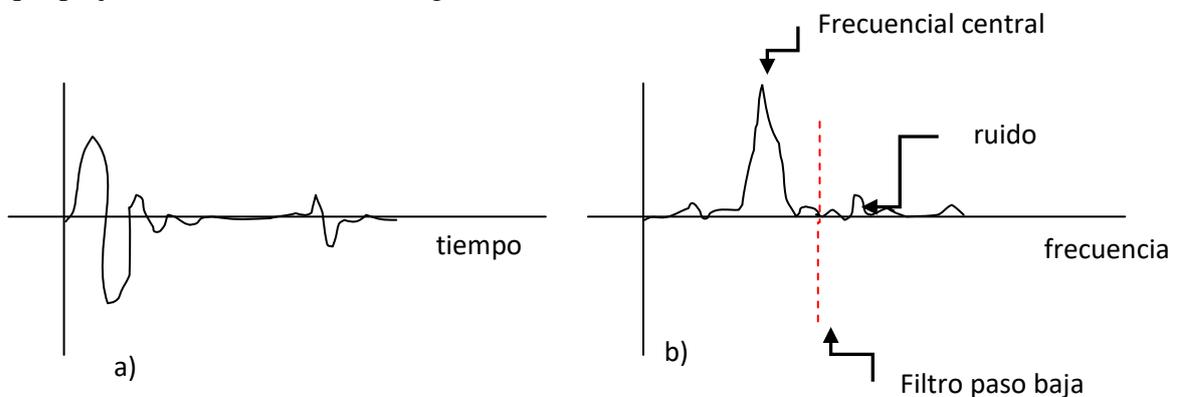


Figura 3.3.16. Filtro paso baja a) Dominio temporal, b) Dominio frecuencial.

CAPITULO 4-
ENSAYOS DE LABORATORIO

4. ENSAYOS DE LABORATORIO

4.1. Introducción

En este capítulo se describen los ensayos preliminares de laboratorio que incluyen la calibración de los equipos, así como la descripción de diferentes ensayos realizados con armaduras de acero en probetas de hormigón.

En la primera parte se propone un conjunto preliminar de ensayos y pruebas orientadas al reconocimiento de características y evaluación de determinadas capacidades de la antena de frecuencia central 1,6GHz, manufacturada por el fabricante sueco MALA (Mala, 1997) y que ha sido utilizada en el apartado experimental de este trabajo de investigación. Una vez reconocidas las características del equipo de prospección formado por la antena, la unidad central y otros accesorios, se han realizado ensayos diseñados para estudiar, entre otros, el apantallamiento, el efecto clutter, el efecto de scattering y la identificación y cuantificación volumétrica de elementos de hormigón embebidos en medios granulares bajo condiciones de humedad y saturación controladas. El objetivo de este conjunto de ensayos es adquirir conocimiento, capacidad y competencias respecto del funcionamiento básico del equipo de radar y de la interpretación de los radargramas obtenidos.

La segunda parte, consta de ensayos en los que se analizan probetas de hormigón con barras de acero embebidas. Los resultados de estos ensayos permitirán definir algunas características generales de las probetas como son: dimensiones, diámetro mínimo de barras y separación mínima entre barras. El objetivo de estos experimentos es determinar las características más convenientes de probetas diseñadas, únicamente, para el estudio del efecto de corrosión en el hormigón armado.

Los objetivos principales de este capítulo son:

- Calibrar y conocer las características y capacidades del equipo de prospección utilizado en el apartado experimental de este trabajo. Esencialmente, el equipo utilizado consta de una antena de tipo mono estática integrada cuya frecuencia central de emisión es de 1,6GHz y manufacturada por la firma MALA.

- Diseñar y realizar los ensayos preliminares de corrosión orientados a la determinación de las características geométricas más convenientes de probetas diseñadas para el estudio del efecto de corrosión en el hormigón armado.

4.2. Ensayo 1: Apantallamiento y clutter

Las antenas de equipos de prospección Ground Penetrating Radar (GPR), tienen un determinado grado de apantallamiento, cuyo nivel depende del fabricante y de la frecuencia central a la que trabajan. Por esta razón, es importante calibrar las antenas, los equipos y accesorios que las acompañan, y determinar la capacidad y desempeño de los mismos antes de su uso en tareas de investigación (Huston, 2000).

Este ensayo pretende recrear el efecto clutter y verificar el apantallamiento lateral de la antena manufacturada por la firma MALA, de tipo mono-estática integrada y de frecuencia central 1,6 GHz que será utilizada en todos los ensayos de laboratorio de este trabajo.

El efecto clutter se define como la reflexión no deseada proveniente de objetos o superficies ajenos al medio en estudio. Se genera debido a que parte de la señal emitida por la antena transmisora se propaga fuera del área en estudio. Dependiendo del grado de apantallamiento de la antena, pueden aparecer objetos indeseados en las imágenes de los radargramas complicando su interpretación.

4.2.1. Objetivo del ensayo

En este ensayo se pretende generar un efecto clutter controlado para estudiar el grado de apantallamiento de la antena MALA de 1,6 GHz de frecuencia central y evaluar el comportamiento del equipo, previa a su aplicación en los demás ensayos de laboratorio.

4.2.2. Procedimiento del ensayo

El ensayo consiste en recrear artificialmente el efecto clutter, utilizando objetos de acero, dada la alta reflectividad que genera el cambio de medio entre aire-metal. Con este propósito se diseñan y realizan dos ensayos:

Ensayo 1

Se posiciona la antena en el centro de una mesa y se orienta su emisión y recepción hacia abajo. Posteriormente, permaneciendo la antena completamente estática y en la

posición indicada, se procede a desplazar, paralela al plano de la mesa y a una cierta distancia de la misma, una pieza tubular de acero hacia la antenna. La pieza es un redondo de acero de 2 cm de diámetro que se desplaza en un primer ensayo a 40 cm sobre la misma y, en un segundo ensayo se desplaza a 40 cm por debajo del plano de la mesa. Ambos esquemas de ensayo se detallan gráficamente en la Figura 4.1.

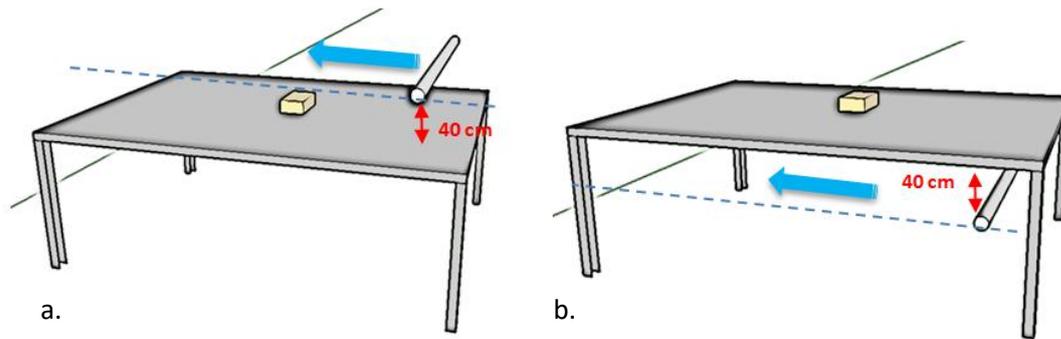


Figura 4. 1: Esquema del ensayo 1, a) Desplazamiento del redondo de acero a 40cm sobre el plano de la mesa en la que se sitúa la antenna, b) Desplazamiento a 40 cm por debajo del plano en el que se sitúa la antenna.

Ensayo 2

En este ensayo, se posiciona la antena en un extremo de la mesa, orientada hacia abajo y ajustada en modo de adquisición temporal. Paralelamente, una placa metálica rectangular de dimensiones 20cmx10cm se sitúa en un extremo de la mesa y se desplaza, deslizándose en contacto con la mesa y a una velocidad constante, hacia la antena. La distancia inicial máxima entre la antena y la placa metálica es de 2m. El esquema de este ensayo se detalla en la Figura 4.2.

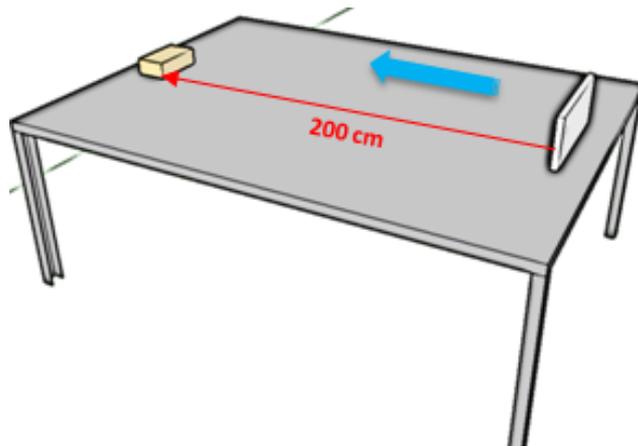
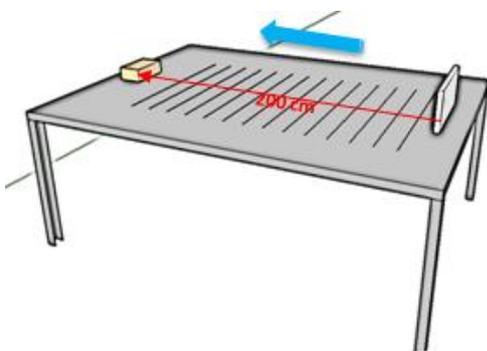


Figura 4. 2: Esquema del ensayo 2. La placa metálica se desplaza en dirección a la antena.

Ensayo 3

En este ensayo, al igual que para el ensayo 2, se posiciona la antena en un extremo de la mesa (orientación hacia abajo) y se ajusta en modo de adquisición temporal. La placa metálica se desplaza, deslizándose sobre la superficie de la mesa, siguiendo un recorrido rectilíneo hacia la antena. No obstante, y a diferencia del ensayo 2, se divide la distancia en tramos de 15cm, y la antena se detiene durante 10 segundos para cada intervalo de desplazamiento de 15cm. El esquema de este ensayo se recoge en la Figura 4.3.



a.



b.

Figura 4. 3: a) Esquema del ensayo 3. Recorrido de la placa metálica en dirección a la antena; b) Fotografía del dispositivo utilizado para el ensayo 3.

4.2.3. Procesado de datos

En todos los ensayos se aplicaron los filtros Background, Removal, Ganancia Energy Decay y filtrado Dewow. Asimismo, se ha ajustado la ventana temporal para poder observar el fenómeno desde el momento en que empieza a detectarse la señal.

4.2.4. Resultados

Una vez procesados los radargramas adquiridos, se realiza una interpretación y análisis de los mismos en correspondencia con cada uno de los ensayos diseñados y realizados.

Prueba 1

Cuando el objeto metálico se desplaza a 40 cm sobre de la mesa y a velocidad constante, el radargrama refleja pocas variaciones en su registro (ver Figura 4.4), por lo que se concluye que la antena tiene un buen apantallamiento superior, dado que no se detectan elementos que se encuentran sobre el nivel del elemento transmisor.

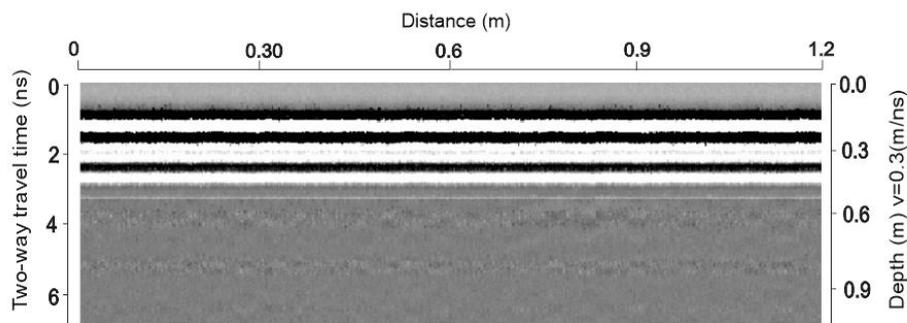


Figura 4. 4: Ensayo 1. Radargrama del redondo de acero desplazándose a 40cm sobre el nivel de la antena.

Por otro lado, cuando el elemento metálico está situado bajo del nivel de la antena, su detección es clara en el radargrama. Este resultado es el esperado cuando se realiza un estudio con la técnica de GPR (ver Figura 4.5).

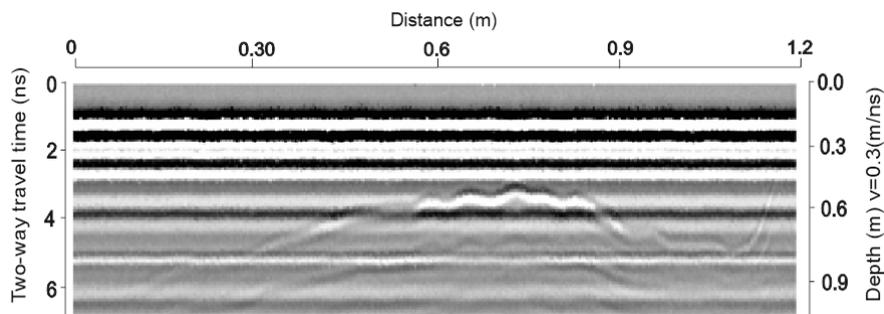


Figura 4. 5: Ensayo 1. Radargrama del redondo de acero desplazándose a 40cm por debajo del nivel de la antena.

Prueba 2

En este ensayo el objeto metálico (placa rectangular) se acerca a la antena a una velocidad constante, el radargrama muestra una línea continua (ver Figura 4.6). Dicha línea es ascendente y presenta una pendiente homogénea a medida que la placa metálica se acerca a la antena. Además, se observa que se mantiene la misma pendiente en tramos, lo que indica que la velocidad de aproximación fue constante en estos tramos.

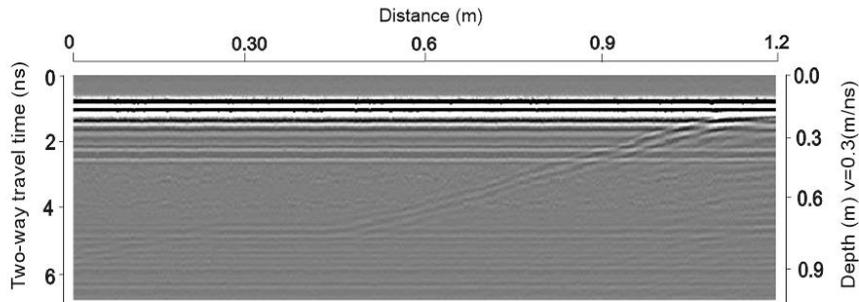


Figura 4. 6: Radargrama del ensayo 2. Placa metálica con acercamiento lateral (velocidad constante en dirección de la antena).

Prueba 3

En este ensayo, a diferencia del planteamiento para el ensayo 2, se puede observar que los intervalos de tiempo quedan reflejados en el radargrama como pequeños segmentos rectos a modo de mesetas a diferentes alturas. La separación de estos segmentos asciende a medida que la placa se acerca a la antena (ver Figura 4.7).

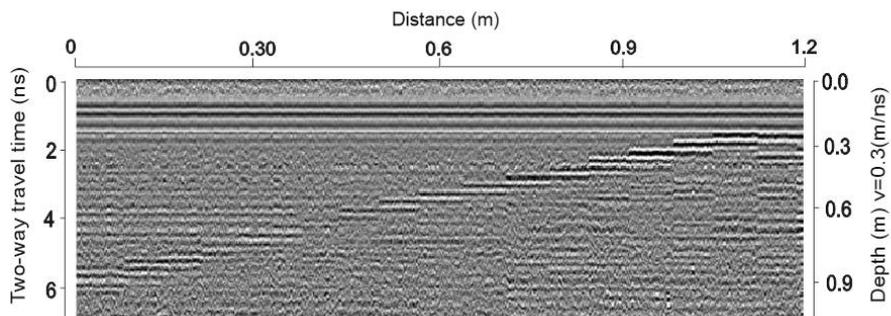


Figura 4. 7: Radargrama del ensayo 3. Placa metálica con acercamiento lateral en dirección de la antena, con pausas de 5 segundos para cada intervalo de desplazamiento de 15cm.

4.2.5. Conclusión

Los ensayos planteados han permitido determinar el nivel de eficiencia del grado de apantallamiento lateral de la antena. Se ha podido comprobar que no existe un apantallamiento lateral completo y que los objetos metálicos situados en el volumen de registro y adquisición pueden ocasionar ruidos indeseados en las imágenes del radargrama. Este efecto puede conducir a una distorsión en la interpretación de los resultados, circunstancia que será tomada en consideración para realizar futuros ensayos con esta antena.

4.3. Ensayo 2: Análisis de *Scattering*

El scattering, también denominado dispersión angular, consiste en la separación de ondas de distintas longitudes al atravesar un determinado medio material. El efecto se produce cuando un medio está compuesto por pequeñas heterogeneidades naturales o incluye alteraciones puntuales, en el que el tamaño promedio de estas heterogeneidades supera la longitud de onda electromagnética emitida por el equipo GPR. Dichas heterogeneidades producen reflexiones de las ondas en direcciones aleatorias, de modo que las ondas retrodispersadas no se dirigen, necesariamente, hacia la antena receptora. Este efecto supone una disminución de ondas que deberían retornar al instrumento de registro.

Este fenómeno puede, en ocasiones, no ser deseable, y en otras circunstancias puede ser beneficioso. Por ejemplo, en algunos casos, al pretender detectar objetos específicos, el efecto de scattering supuso que fueran más visibles las alteraciones del medio que los propios objetos.

Analizar el efecto de scattering puede ayudar a comprender uno de los efectos observables cuando se realizan prospecciones de medios en los que existe corrosión de elementos metálicos. En estos casos, la consideración y el estudio de la difusión en zonas próximas al volumen afectado por el proceso de corrosión permiten completar la interpretación de los correspondientes radargramas (Huston, 2000; Moreno, 2008).

4.3.1. Objetivo del ensayo

Simular en laboratorio el efecto de scattering, aportando un volumen de material granular a un medio homogéneo. El efecto se genera seleccionando un material granular, grava con un tamaño menor a 20mm, al ser elementos pequeños y redondeados generan muchas superficies de reflexión, más aún si un grupo de estos elementos están enterrados en un medio uniforme.

4.3.2. Procedimiento del ensayo

En este ensayo se emplean dos materiales para obtener el medio en el que se desea realizar la prospección. Por un lado, se utiliza arena de mar seca (árido fino) para generar el volumen de medio homogéneo y, por otro lado, se aportan piedras de canto rodado (árido grueso), cuyas dimensiones corresponden a un material granular grueso (grava).

Con este propósito, en una cubeta llena de arena fina y de dimensiones 80x50x20cm, se entierra una bolsa plástica conteniendo 5 kg de grava, ubicando la bolsa en la proximidad de un extremo del recipiente, tal y como se detalla en el esquema de la Figura 4.8.

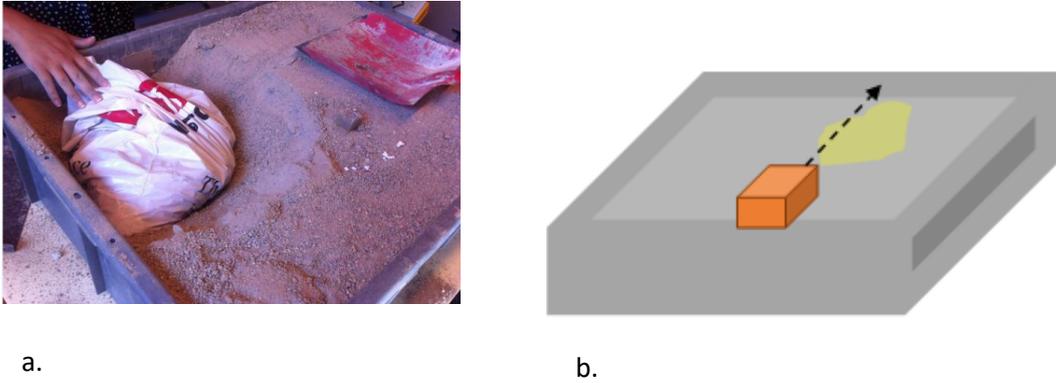


Figura 4. 8: Ensayo para el análisis de scattering: a) Detalle sobre la ubicación del material granular. b) Esquema del posicionamiento de la antena de radar sobre la cubeta.

La grava utilizada se embolsa en plástico para evitar que la arena de la cubeta acceda a los huecos existentes en el volumen de material granular grueso (grava). De este modo, se consigue un contraste dieléctrico aire-grava bien definido.

4.3.3. Adquisición de datos

La adquisición de datos se realizó con una antena de 1,6 GHz de frecuencia central. La antena, centrada transversalmente a la cubeta, se desplaza siguiendo el eje longitudinal de la misma. En este ensayo se obtuvieron 10 perfiles (ver Figura 4.9).

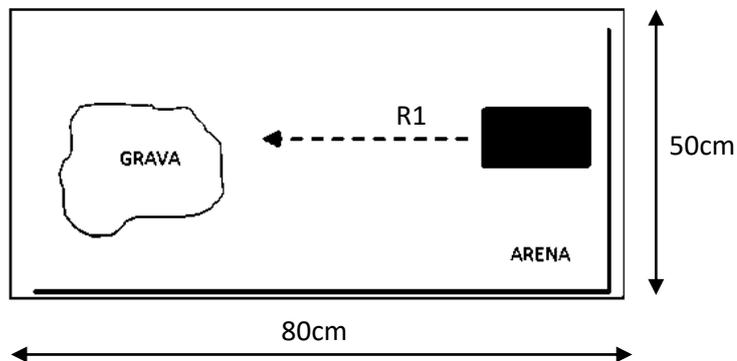


Figura 4. 9: Ensayo para el análisis de scattering. Esquema de adquisición de datos, R1 indica la dirección de las trazas.

4.3.4. Procesado de datos

En todos los ensayos se aplicaron los filtros *Background Removal* y *Ganancia energy decay*. Así mismo se ha ajustado la ventana temporal para poder observar el fenómeno desde el inicio de detección de la señal.

4.3.5. Resultados del ensayo y discusión

En este ensayo se adquirieron 10 perfiles correspondientes a trazas coincidentes con el eje longitudinal de la cubeta. La mayor parte de los registros muestran resultados similares, por lo que, en este apartado, se procede al análisis de un radargrama que se ha considerado como representativo del grupo de registros.

La imagen del radargrama seleccionado y procesado (ver Figura 4.10), permite identificar, con suficiente claridad, la superficie de contacto entre la antena y el material, en el extremo derecho se observa las anomalías generadas por las reflexiones en las superficies del material granular. Asimismo, las alteraciones generadas por las reflexiones aleatorias. El origen de estas alteraciones son las discontinuidades dieléctricas existentes en las superficies de contacto aire-grava.

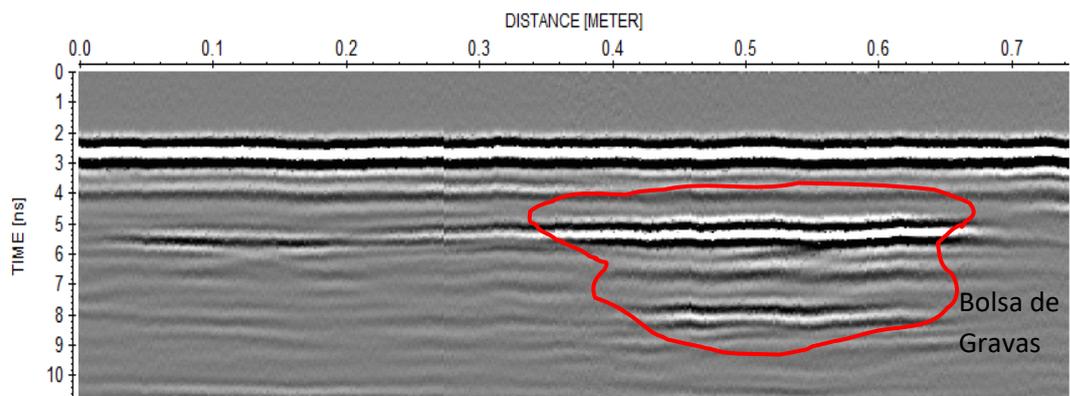


Figura 4. 10: Ensayo para análisis de scattering. Radargrama longitudinal representativo.

A partir de las imágenes de los radargramas obtenidos, ha sido posible identificar la geometría de la cubeta, especialmente la superficie y la base, así como la zona exacta donde se ha situado volumen que contiene el material granular embolsado. En esta zona se observan anomalías correspondientes a un gran número de reflexiones aleatorias generadas en superficies reflejantes cuyo origen son las discontinuidades dieléctricas existentes en el contacto aire-partículas de grava (Salinas, 2018).

Los resultados de estos ensayos experimentales sirvieron para evidenciar que el efecto de scattering puede interferir en la identificación de determinados elementos y en la interpretación de los radargramas. El tamaño relativo entre la longitud de onda característica de los equipos utilizados y el tamaño promedio de los elementos a identificar es un factor a tener en cuenta en cualquier campaña de medidas. La longitud de la onda debe ser menor que la dimensión de los objetos a ser analizados, para que el objeto pueda ser detectado por el equipo.

4.4. Ensayo 3: Identificación de modelos de cimentación en un medio homogéneo

Las cimentaciones son uno de los elementos estructurales más susceptibles a sufrir un proceso de oxidación de sus armaduras, principalmente por el contacto permanente con el subsuelo. La humedad y otros agentes incluidos en el terreno suponen una acción químico-física que, en determinados casos y en función al grado de agresividad, hacen necesaria su oportuna detección.

Actualmente los equipos de prospección GPR permiten detectar y delimitar geoméricamente los elementos enterrados gracias al cambio de propiedades dieléctricas existente entre el terreno y el hormigón. De la misma manera, las antenas GPR de alta frecuencia son capaces de detectar el contraste dieléctrico que se produce en la superficie de contacto entre las armaduras de acero y el hormigón.

Esta campaña experimental está dirigida a determinar la posición del modelo de zapata a escala e intentar definir su geometría. Para esto se empleará una zapata de hormigón construida a escala. En el diseño de los ensayos propuestos también se estudia la influencia del nivel de saturación de los suelos en la prospección de elementos enterrados de hormigón armado. Para ello se plantearán dos ensayos con suelos secos y con suelos con un determinado grado de saturación de agua.

4.4.1. Objetivo del ensayo

En los ensayos se pretende evaluar la capacidad de los equipos de prospección GPR utilizados para detectar la geometría y otros detalles relativos a objetos de hormigón armado enterrados en suelos con diferentes grados de saturación de agua.

4.4.2. Procedimiento del ensayo

En el diseño de los ensayos se utiliza un modelo a escala de una zapata de cimentación aislada, emplazada en un medio que simula las mismas condiciones de un suelo natural. Con este propósito se ha construido una zapata de hormigón armado con una relación de escala 1:10 respecto de una zapata aislada convencional. Los materiales utilizados para la zapata son mortero de cemento y alambre metálico para simular una armadura dispuesta en forma de parrilla en la base de la zapata (Figura 4.11). Las dimensiones del modelo de zapata son 16x10cm de base y una columna de 3x3 cm (ver Figura 4.11c).

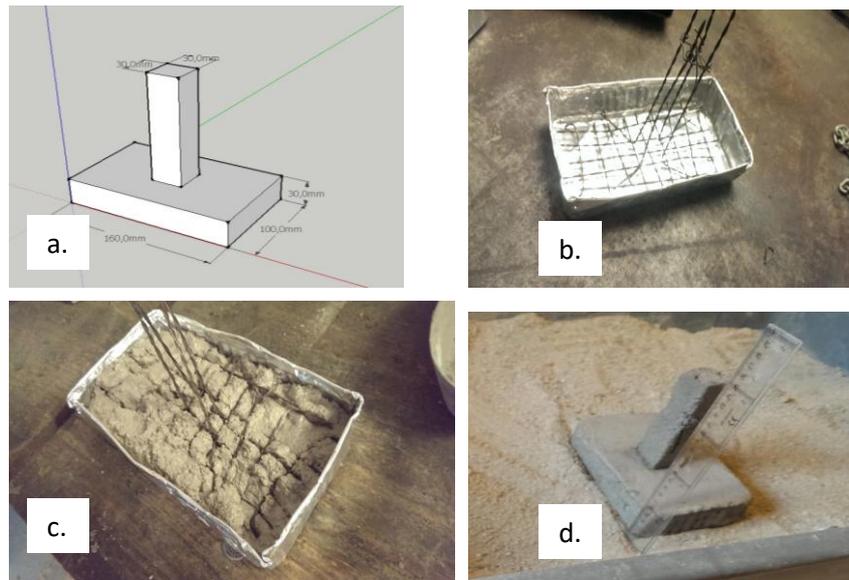


Figura 4. 11: Construcción de la zapata a escala de hormigón armado: a) Medidas de la zapata a escala, b) Encofrado y armado de la zapata, c) Hormigonado de la zapata, c) y d) Modelo a escala terminado.

Finalizada la construcción de la zapata, esta se entierra, a una profundidad de 5cm, en una cubeta de dimensiones 80x50cm y rellena de arena fina. La zapata se entierra hasta quedar completamente cubierta de arena (ver Figura 4.12).

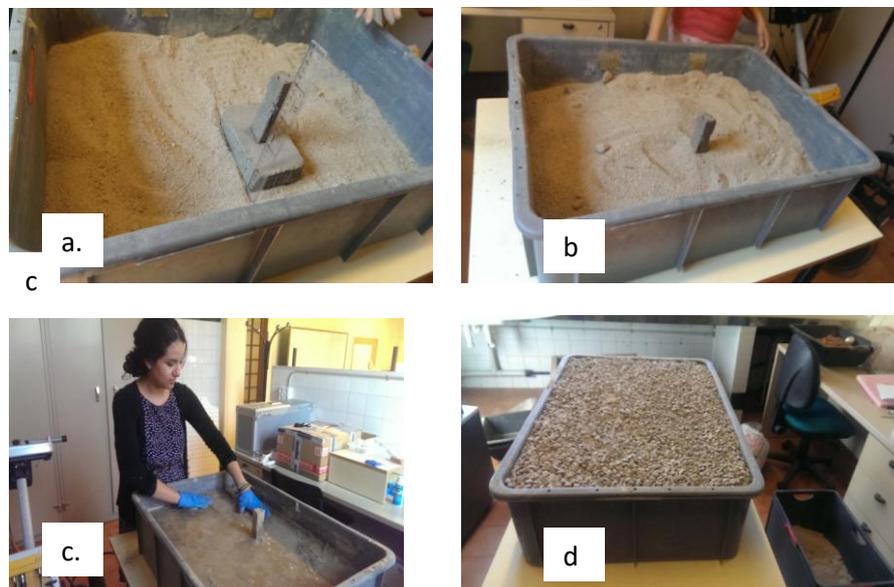


Figura 4. 12: Ensayo con elementos de cimentación a escala de hormigón armado: a) Cubeta y posición de la zapata a escala antes de cubrir con arena, b) Cubeta y zapata después de cubrir totalmente con arena, c) Nivelación de las capas, d) Modelo cubierto preparado para la adquisición.

El modelo de zapata a escala se ubica, tal y como se muestra en la Figura 4.13, aproximadamente a una profundidad media de la cubeta y en una posición horizontal equidistante respecto a los extremos de la cubeta.

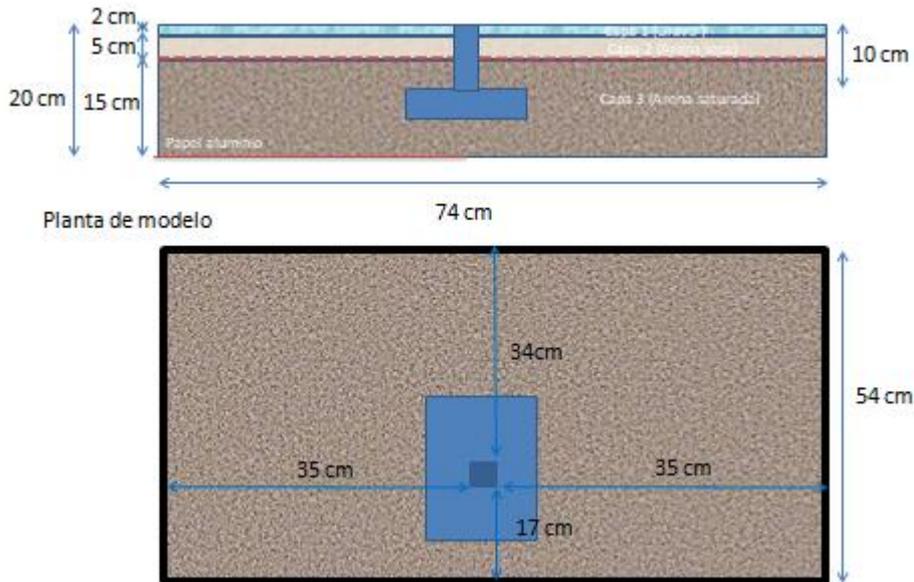


Figura 4. 13: Ensayo con elementos de cimentación a escala. Alzado y Planta de la zapata a escala y de su posición relativa respecto a los límites de la cubeta.

Después de instalar la zapata en la cubeta, se realizan dos prospecciones. En la primera adquisición se simula un terreno completamente seco, utilizando para ello un relleno de arena seca. Posteriormente, y para simular un terreno saturado de agua, se llena la cubeta con agua hasta la superficie, saturando de este modo todo relleno. Entonces se procede a realizar la segunda adquisición.

4.4.3. Adquisición de datos

Teniendo en cuenta la posición de la zapata con respecto a la cubeta, se procede a la adquisición de datos, en dos etapas. La primera, simulando un medio seco y la segunda vertiendo agua en la cubeta con objeto de simular un suelo saturado.

Para una ordenada adquisición de datos se utiliza un elemento auxiliar consistente en una placa rígida de poliestireno expandido sobre la que se marca una retícula con líneas marcadas transversalmente cada 5 cm y longitudinalmente cada 2 cm. Los perfiles se registran sobre las marcas longitudinales, en la misma dirección y cada 2 cm (ver Figura

4.14). El objetivo de estas medidas es generar un modelo 3D utilizando el software específico GPR Slice (Goodman, 2004).

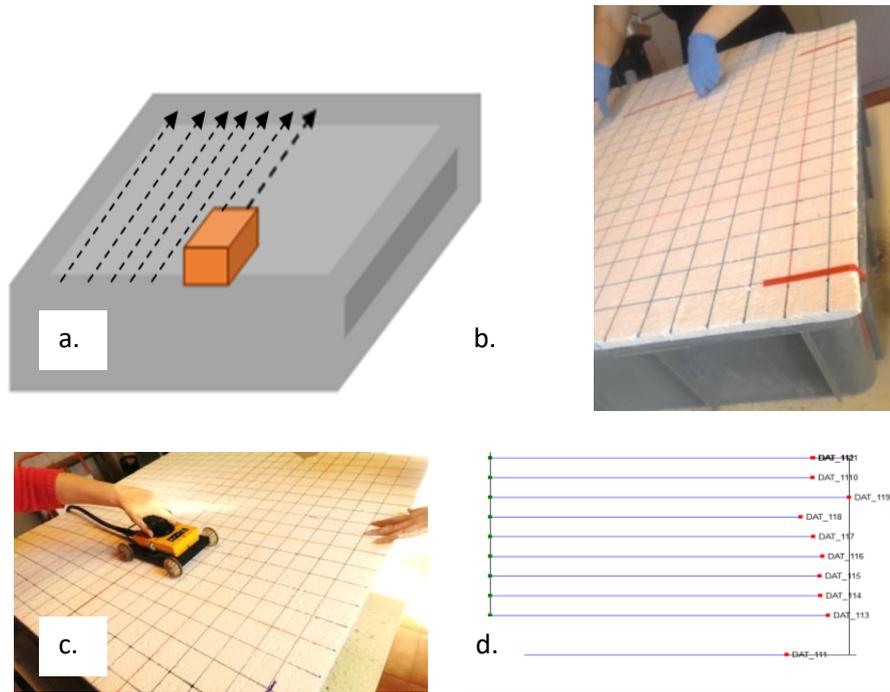


Figura 4. 14: Ensayo con elementos de cimentación a escala a) Esquema de adquisición de datos, b) Posicionamiento sobre la cubeta de la placa rígida que contiene la retícula, c) Adquisición de datos, d) Trazas de radar a procesar utilizando el programa GPR Slice.

4.4.4. Procesado de datos

Los perfiles adquiridos se procesan utilizando el programa GPR Slice (Goodman, 2004), con el propósito de generar una imagen en 3D del modelo. Todos los registros fueron pre procesados utilizando los filtros de *Background Removal* y Ganancia manual.

4.4.5. Resultados de los ensayos y discusión

A continuación se describen los resultados obtenidos en los dos casos ensayados, esto es, en terreno seco y en terreno saturado.

Ensayo con terreno seco

Analizando la imagen del radargrama que pasa por el eje del modelo de la zapata enterrada, se puede identificar con relativa claridad su ubicación y también es posible determinar la dimensión de uno de sus lados, que en este caso es de 10 cm y corresponde con bastante exactitud las medidas reales de la misma (ver Figura 4.15).

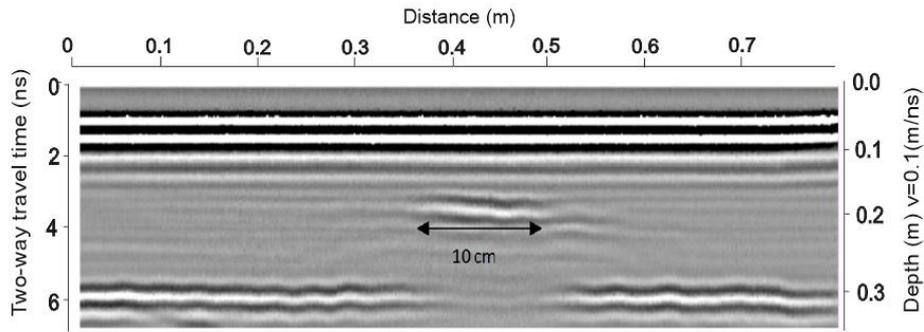


Figura 4. 15: Ensayo con elementos de cimentación a escala y terreno seco. Radargrama longitudinal cuya traza pasa por el medio de la cubeta y coincide con el eje del modelo de zapata a escala.

Para generar un modelo 3D de la zapata a escala se emplea el programa GPR Slice (Goodman, 2004). Este software es capaz de reconstruir un volumen 3D a partir de varios radargramas paralelos y utilizando un algoritmo de interpolación. La precisión del volumen reconstruido depende de la densidad de traza utilizada, de modo que, a mayor densidad de traza, mayor es la precisión en el volumen analizado. El objetivo es obtener, a partir de una buena densidad de trazas horizontales, una interpretación fiable de la forma y dimensiones del objeto. El software GPR Slice construye un volumen sólido a partir de la interpolación de los radargramas, de este volumen se pueden obtener las secciones horizontales que se desee, en este caso se realiza secciones cada 3cm (ver Figura 4.16).

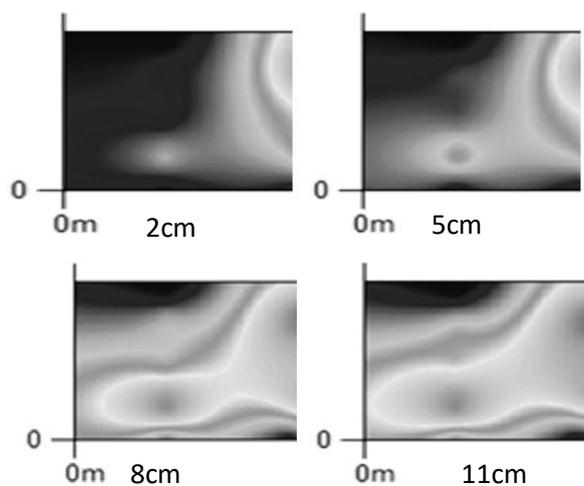


Figura 4. 16: Ensayo con elementos de cimentación a escala y terreno seco. Secciones horizontales generadas con el programa GPR Slice, cada 3cm.

En la Figura 4.17, se puede observar una sección vertical, situada a la altura de la zapata, en la que se puede identificar la posición de la base de la zapata.

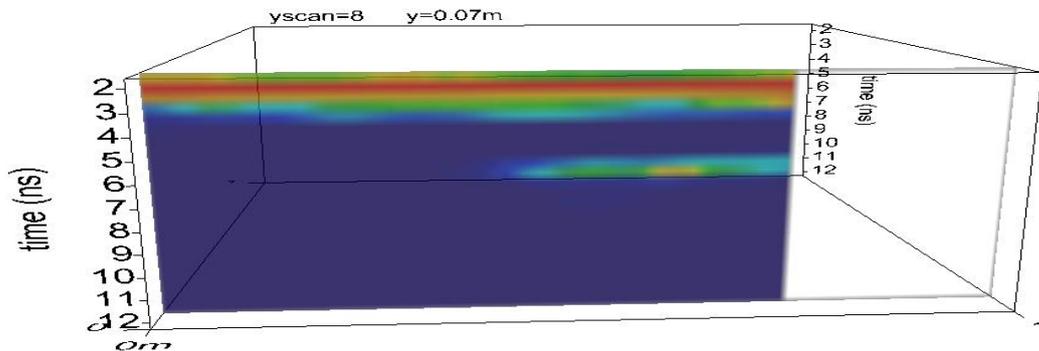


Figura 4. 17: Ensayo con elementos de cimentación a escala y terreno seco. Sección vertical del volumen generado en el programa GPR Slice

Ensayo con terreno saturado

Tomando en cuenta que se llena la cubeta de agua hasta cubrir todo el material, y al ser la permeabilidad de la arena mayor que la del hormigón, es posible situar con bastante claridad la sección y profundidad de la zapata (ver Figura 4.17). En este caso también es posible determinar las dimensiones geométricas aproximadas de la zapata. En cuanto a la sección de columna sobre la zapata, de dimensiones 3x3cm, su identificación en los radargramas no es clara.

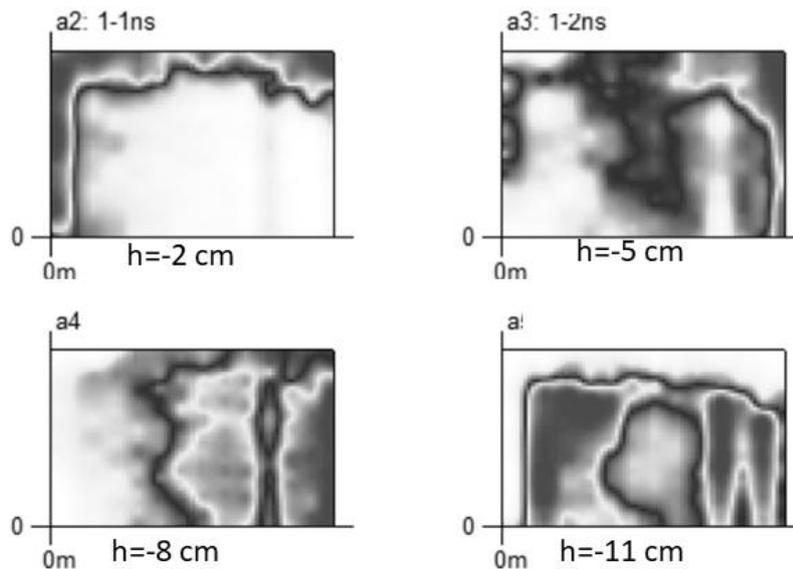


Figura 4. 18: Ensayo con elementos de cimentación a escala y terreno saturado. Secciones horizontales generadas con el programa GPR Slice cada 3cm.

Al igual que en el ensayo con terreno seco, en el ensayo con terreno saturado es posible determinar la posición de la zapata. La diferencia con respecto al anterior ensayo es que el ensayo con suelo saturado los contrastes son más acentuados. Asimismo, también se pueden observar con mayor intensidad los efectos de contorno generados por los límites de la cubeta (ver Figura 4.18).

A una profundidad de 11cm, se puede apreciar la geometría de la zapata con bastante exactitud. Esto es posible, presumiblemente, porque la zapata está menos saturada que el terreno que la envuelve, y esto genera un contraste más claro.

En el ensayo, a pesar de que tanto la zapata como su entorno tiene un componente común, como es la arena, el GPR detecta la zapata con bastante precisión solo por la diferencia de compacidad

Este resultado es de primordial importancia para investigaciones futuras, por las siguientes razones:

- Dos materiales con el mismo componente, en este caso hormigón y arena, presentan distinta permitividad dieléctrica, solo por tener distinto grado de consolidación. Por tanto, este cambio en la compacidad de los materiales genera, en el contacto entre los materiales, una superficie reflejante a las ondas electromagnéticas.
- En los dos casos se distingue la posición y dimensiones aproximadas del modelo de zapata, pero la imagen es difícil de interpretar, principalmente por efectos de contorno de los bordes de la cubeta que al ser de reducidas dimensiones crea efectos reflejados en el radargrama, más aun si el terreno está saturado de agua, el caso de terreno seco, los efectos de contorno son menos visibles.
- Las dos pruebas confirmaron que el agua influye en los resultados y que incluso puede ayudar a generar mayor contraste entre terreno y hormigón, especialmente cuando el hormigón no está totalmente saturado.

4.5. Ensayo 4: estudio preliminar del efecto de corrosión en probetas con una única barra

Los efectos producidos por la oxidación del acero provocan un deterioro estructural en el hormigón, generando una disminución de la sección de acero y la pérdida de adherencia de las barras, resultando ser los factores principales de la disminución de la resistencia del hormigón.

La corrosión es uno de los mayores problemas en estructuras de hormigón armado. La detección en fase temprana del proceso de corrosión es clave para evitar daños severos e incluso el colapso de estructuras.

Los ensayos propuestos en esta campaña experimental pretenden verificar la capacidad de los equipos de prospección GPR para identificar la presencia de corrosión en armaduras de elementos de hormigón. Con este objetivo se proponen unos ensayos previos para determinar la capacidad de las antenas de alta frecuencia, en condiciones idealizadas de laboratorio, para distinguir elementos con diferentes grados de corrosión.

En este sentido, autores como (Eisenmann, 2018), afirman que las ondas reflejadas que retornan a la antena receptora de un equipo GPR, son diferentes en amplitud cuando se comparan los registros correspondientes a una armadura corroída con los de una armadura sana.

Para llevar a cabo estos ensayos se diseñan y construyen dos probetas de hormigón en las que se colocan dos barras con distinto grado de corrosión: En una probeta se coloca una barra corroída y en otra una barra sana. Ambas probetas se analizan con una antena de alta frecuencia y las interpretaciones se realizan en base a una comparación de las imágenes de los radargramas obtenidos.

4.5.1. Objetivo del ensayo

Este ensayo pretende determinar las diferencias cualitativas existentes entre las imágenes de los radargramas correspondientes a muestras con corrosión y muestras sanas. Se propone un análisis comparativo y cualitativo de las imágenes que producen la reflexión de barras de acero con un determinado grado de corrosión y las barras exentas de corrosión.

4.5.2. Procedimiento del ensayo

Para los ensayos se elaboraron dos probetas prismáticas de hormigón en las que se incluyó una única barra de acero de 12 mm de diámetro. En una de las probetas se incluyó una barra que, previamente a su hormigonado, sufrió un estado avanzado de corrosión. En una segunda probeta se incluyó una barra completamente sana.

Las dimensiones de las probetas prismáticas: 15x15x20cm (ver Figura 4.19), fueron escogidas a fin ser cómodamente manipuladas y para garantizar un recubrimiento aproximado de las armaduras de 6 cm, valor muy común en elementos de hormigón armado.

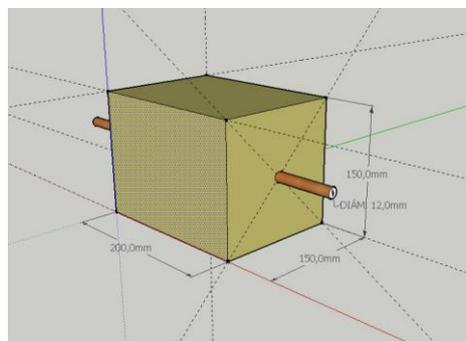


Figura 4. 19: comparativo de corrosión. Geometría de las probetas.

4.5.3. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos, se procede a trazar varios perfiles que cruzan transversalmente el eje de las probetas. Las trazas se han realizado sobre las dos probetas colocadas en paralelo y en contacto, para, de este modo, disponer en un mismo radargrama las señales correspondientes a las dos armaduras. Esta estrategia permite realizar una comparación rápida de las señales sobre un mismo radargrama (ver Figura 4.20).

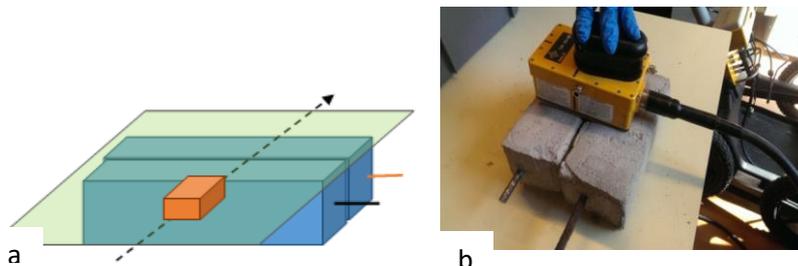


Figura 4. 20: Estudio comparativo de corrosión. a) Esquema de adquisición de datos, b) Etapa de adquisición de datos con antena de alta frecuencia.

4.5.4. Procesado de datos

Para el procesamiento de los radargramas se utilizó el programa Reflex ®, con un ajuste al nivel 0 en la cara superior de la probeta, posteriormente se aplicó solo dos filtros denominados Pasa Banda, *Background Removal* ambos encargados de eliminar el ruido indeseado, para permitir ver las barras.

4.5.5. Resultados y discusión

Para analizar los resultados se ha seleccionado el radargrama más representativo. Dado que el perfil fue adquirido transversalmente a las barras de refuerzo y debido a la alta reflectividad del acero, el resultado esperable es que ambas barras, corroída y sana, deberían ser claramente identificados. Pero el análisis de los radargramas revela que la barra corroída, a pesar del postproceso aplicado, no se identifica de modo claro, tal y como queda evidenciado en la Figura 4.21

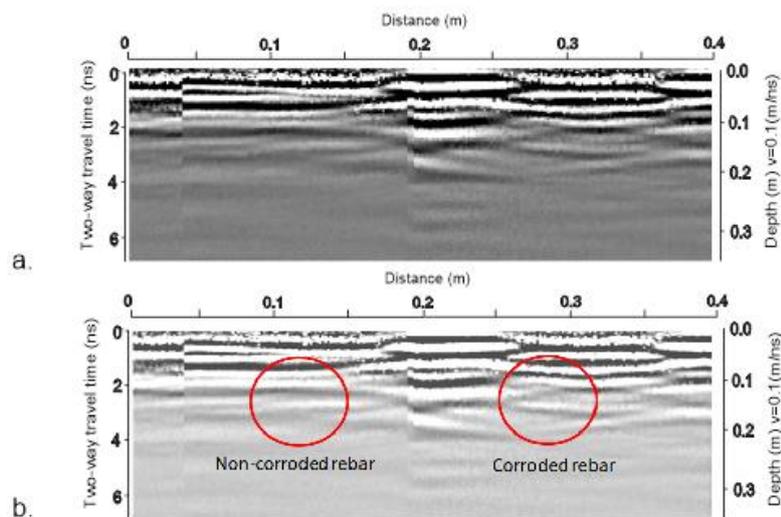


Figura 4. 21: Estudio comparativo de corrosión. Radargrama longitudinal, a) Radargrama original sin procesar, b) Interpretación del radargrama.

El estudio comparativo muestra imágenes en las cuales el efecto de contorno es importante. Probablemente, ello puede ser debido a las esquinas de las probetas. No obstante, las barras se pueden identificar y se aprecia una diferencia entre ambas imágenes, de modo que la barra sana genera una reflexión más clara, mientras que la barra corroída muestra una imagen más difusa.

En los radargramas destacan notablemente los efectos de contorno. Atendiendo a la geometría de las muestras, los vértices de las dos probetas prismáticas explican el origen de estas múltiples reflexiones. En el estudio comparado de los radargramas, es posible, aunque de forma muy tenue, percibir la diferencia de reflexión generada en las barras corroída y no corroída. No obstante, se considera que los resultados de estos ensayos no son del todo satisfactorios, debido a que los efectos de contorno generados en las aristas de las probetas prismáticas no permiten identificar con claridad las barras y el estado de las mismas.

4.6. Ensayo 5: análisis preliminar del efecto de corrosión en probetas con múltiples barras

Los ensayos propuestos en esta campaña pretenden analizar el efecto de corrosión cuando se tiene una armadura constituida por varias barras paralelas y equidistantes, separadas a intervalos de dimensiones del orden del diámetro de la armadura y colocadas en una sola probeta de hormigón. La campaña de ensayos con probetas prismáticas descritas en la sección anterior, evidenció que la geometría de la cubeta y los efectos de contorno que esta introducía en las mediciones, alteraban de forma significativa los resultados. Por tanto, en esta campaña experimental se propone utilizar un medio y una geometría que no generen efectos de contorno. En este sentido, se ha dispuesto colocar la probeta de hormigón en un banco de arena suficientemente grande para evitar efectos de contorno. La solución ha sido desplazar los ensayos a una playa en la que se ha controlado las condiciones de la arena en el entorno de la armadura. En estos ensayos, se podría hablar de una cubeta de arena de dimensiones semi infinitas.

4.6.1. Objetivo del ensayo

Analizar los cambios en la señal que produce el efecto de corrosión en el hormigón armado, comparando dos probetas que contienen una barra al interior en un caso corroída y en el otro sana.

4.6.2. Procedimiento del ensayo

Se elabora una probeta de hormigón, que incluye una armadura formada por 6 barras de acero de 12mm de diámetro, equidistantes y paralelas entre sí. En el conjunto, 3 barras están afectadas por corrosión y otras 3 barras están exentas de corrosión (barras sanas). Las barras se disponen con una separación variable (entre 3 y 5 cm). Las dimensiones de la probeta de hormigón son 15x30x30cm y la armadura se sitúa en su interior con un recubrimiento de 4cm (ver Figura 4.22). Finalmente, la probeta se coloca en la arena para evitar efectos de contorno.

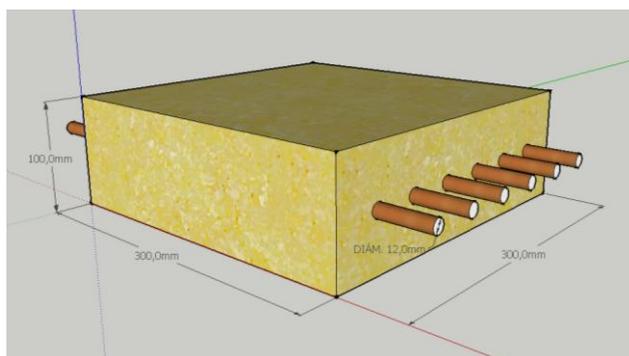


Figura 4. 22: Ensayo sobre corrosión. Geometría de la muestra.

La separación de las barras ha sido de 3 cm (las tres primeras barras) y de 5cm (las últimas tres), todas las barras son de 12 mm de diámetro, tres barras corroídas y tres sanas. Todas estas han sido ubicadas de forma intercalada (sana-corroída-sana), con el objetivo de ver si la antena es capaz de identificar la diferencia entre barras sanas y corroídas al estar muy próximas una de otra.

Para mayor precisión se emplea la antena de mayor frecuencia disponible, en este caso una de 1600 MHz (ver figura 4.19).

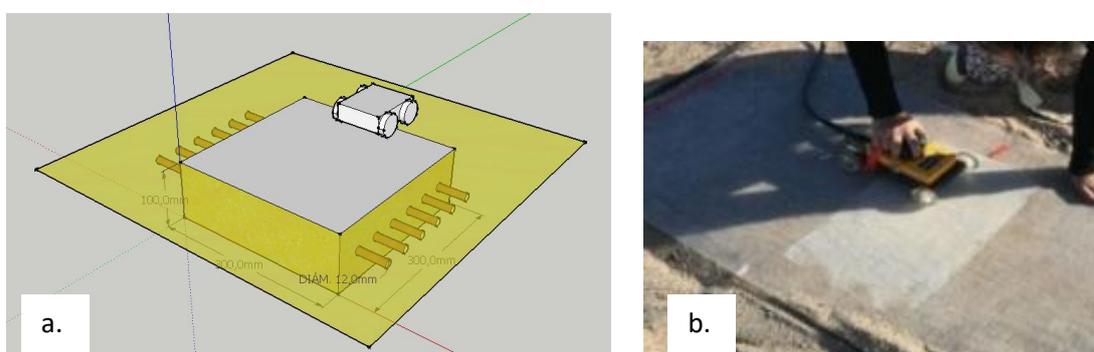


Figura 4. 23: Ensayo sobre corrosión. a) Esquema de adquisición de datos, b) Mediciones sobre la probeta de hormigón colocada en el banco de arena.

4.6.3. Resultados y discusión

Los resultados mostrados en la figura 4.23, no son favorables. El problema es que no es posible identificar individualmente las barras. El radargrama devuelve una imagen en la que se aprecia una gran reflexión única que no permite identificar separadamente las barras.

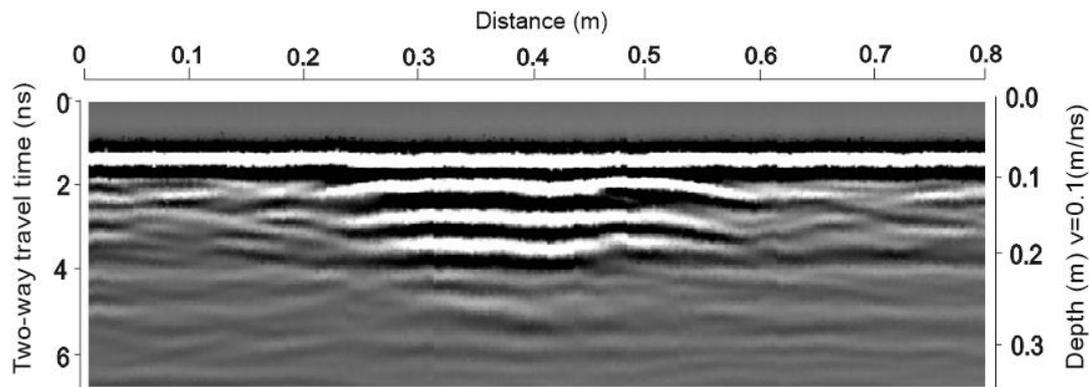


Figura 4. 24: Ensayo sobre corrosión. Radargrama longitudinal.

En el ensayo propuesto se utilizó un medio continuo semi-infinito con el propósito de eliminar los efectos de contorno. Efectivamente, estos efectos no aparecen en los radargramas. No obstante, en los radargramas no es posible identificar las barras y tampoco son identificables las hipérbolas generadas por cada una de ellas. Este resultado desfavorable es debido, posiblemente, a dos circunstancias que concurren en el ensayo: i) El reducido diámetro (12mm) de las barras y, ii) la separación entre los ejes de las barras (inferior a 7cm). El problema es que estas distancias son inferiores a la resolución horizontal que tiene el equipo de adquisición, en el que la frecuencia central a la que trabaja la antena utilizada es de 1.6 GHz.

Conclusiones

El conjunto de ensayos descritos en este capítulo, se han diseñado con el propósito de conocer las características y evaluar las capacidades y las limitaciones del equipo de prospección utilizado, una antena de alta resolución y frecuencia central 1,6GHz, manufacturada por el fabricante sueco MALA (Mala, 1997). A partir de los resultados obtenidos, se pueden exponer las siguientes conclusiones:

- Se ha podido comprobar que no existe un apantallamiento completo en los laterales de la antena. En consecuencia, los objetos metálicos situados en la proximidad de la zona de registro pueden ocasionar ruidos indeseados en los registros de los radargramas y, por tanto, este efecto puede dificultar la interpretación de las imágenes de los radargramas.

Respecto de los ensayos preliminares diseñados para analizar probetas de hormigón armado, los resultados obtenidos permiten extraer las siguientes conclusiones:

- Los resultados muestran muchos efectos de contorno y de acoplamiento en el radargrama. Se ha determinado que la adquisición de datos en laboratorio con la antena directamente sobre las probetas, generan efectos de contorno importantes, que se deben al cambio de medio (Aire – Hormigón) y al tamaño reducido de las probetas (10cmx10cnx30cm). Para mitigar estos efectos se ha visto que es muy útil enterrar las probetas en arena, debido a que las propiedades electromagnéticas de la arena son muy similares a las del hormigón.
- Cuando se ha enterrado la probeta en la arena de mar, se han visto reducidos considerablemente el efecto de contorno. Se ha determinado que la arena de mar como medio uniforme minimiza los efectos de contorno indeseados.
- Respecto de la distancia de separación entre los ejes de las barras en las armaduras: La resolución horizontal del equipo de prospección evidencia que existe un límite inferior en la separación de los ejes de las barras que permite detectar de forma separada las barras de la armadura. Este límite, para una antena de 1,6GHz, es de, aproximadamente, 7cm. Para separaciones entre ejes inferiores a esta resolución horizontal, la armadura es reconocida como un reflector compacto de modo que no es posible identificar las barras como elementos separados.

CAPITULO 5.
ANÁLISIS DE CORROSIÓN
MEDIANTE TECNOLOGÍA GPR

5. CAPITULO 5. ANÁLISIS DE CORROSIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍA GPR

5.1. Introducción

El daño generado por la corrosión es un problema frecuente en las estructuras y construcciones de hormigón armado. La corrosión de las armaduras provoca la degradación del acero y, a largo plazo, la reducción y, en ocasiones, la pérdida total de la sección efectiva de las armaduras (Rodríguez *et al.*, 1997; Al-Sulaimani *et al.*, 1990; François *et al.*, 2018).

Es por ello que la detección temprana del fenómeno de corrosión es importante para el mantenimiento de estructuras de hormigón armado. Normalmente, la corrosión se manifiesta a partir de señales como desprendimientos y manchas de óxido, pero en muchos casos, especialmente cuando las armaduras son internas, el fenómeno es prácticamente indetectable ya que no se presentan evidencias del mismo en la superficie exterior de las estructuras.

El método de evaluación más común es la inspección visual, sin embargo, la dificultad de detectar daños ocultos requiere mucha experiencia y, en muchos casos, la corrosión en fases tempranas es, prácticamente, indetectable. Los métodos más comunes para la detección de corrosión en elementos estructurales de hormigón armado están descritos en el capítulo 3.

Para el análisis cualitativo y cuantitativo de los cambios en la señal de GPR producidos por la corrosión, analizado en este capítulo, se plantean dos campañas de laboratorio, basadas en los lineamientos de los ensayos preliminares de corrosión del capítulo 4.

Las campañas planteadas, son las siguientes:

- El primer ensayo (Test A), está orientado al análisis de posibles cambios en la señal GPR en prospecciones sobre muestras de hormigón armado con corrosión y muestras sin corrosión. Para ello se elaboraron dos probetas de hormigón geoméricamente idénticas y con un armado consistente en una barra centrada en el interior. En una de las probetas se incluyó una barra sana y en la otra probeta se utilizó una barra previamente corroída.

- El segundo ensayo (Test B), se centra en el análisis de los cambios de la señal GPR dependiendo del grado de corrosión y de sus efectos sobre el hormigón en contacto con las armaduras. Para ello se elaboran cuatro probetas de hormigón geoméricamente iguales, con una barra centrada en el interior. En este ensayo, inicialmente, todas las barras utilizadas eran sanas y, posteriormente, las probetas pasaron por un proceso de corrosión gradual en una cámara de curado. De este modo, y ajustando cuatro procesos de curado diferentes, se obtuvieron cuatro probetas con distintos estados de corrosión.

Con estos ensayos, el objetivo planteado es evaluar el efecto que genera la corrosión en el hormigón armado, mediante una aproximación cualitativa y cuantitativa utilizando prospecciones no invasivas y no destructivas GPR. Atendiendo a este objetivo, el propósito del ensayo 1 (Test A), ha consistido en identificar y comparar los cambios en los radargramas correspondientes a la probeta con armadura sana y la probeta con armadura afectada por corrosión. Del mismo modo, en el ensayo 2 (Test B), el propósito ha sido identificar, además de los efectos en los radargramas de las barras con distintos grados de corrosión, la existencia de otros efectos detectables en los radargramas y generados por la alteración del hormigón en la proximidad de las armaduras afectadas por corrosión. Adicionalmente, en el ensayo 2 se ha propuesto comprobar si es posible diferenciar mediante análisis cualitativo y cuantitativo de los radargramas, los distintos grados de corrosión que afectan las cuatro probetas del ensayo.

5.2. Metodología

Una aplicación común de la tecnología GPR en la evaluación de estructuras, es la detección de armaduras en el hormigón. Generalmente, la prospección GPR se aplica para determinar la ubicación de las barras de armado, para obtener una imagen en 3D de la distribución de las mismas, o bien para determinar el diámetro de las barras de refuerzo en estructuras de hormigón armado (Xu *et al.*, 2012, Soldovier *et al.*, 2010).

La importancia de la detección de corrosión en las estructuras de hormigón armado, ha llevado al empleo de técnicas GPR en este campo, mostrando potencial en el análisis cualitativo por comparación de imágenes (Hong *et al.*, 2017; Hubbard *et al.*, 2003; Agred *et al.*, 2018). Asimismo, algunos estudios han demostrado una disminución

significativa en la amplitud de la onda cuando hay corrosión en las barras de armado, orientando, sobre la base de este efecto, la posibilidad de análisis cuantitativo (Hong *et al.*, 2017).

La atenuación de la señal podría estar asociada con la corrosión del refuerzo, facilitando la detección de zonas dañadas a nivel general y sin determinar el grado de daño. Sin embargo, otros factores podrían afectar la amplitud de onda, oscureciendo los resultados y llevando a interpretaciones complejas de los radargramas. La atenuación de la señal depende básicamente de: i) La profundidad de los objetivos; ii) La existencia de otros objetivos de tamaño pequeño o heterogeneidades en el concreto o en la superficie del concreto en contacto con las barras de armado; iii) La geometría de la barra de refuerzo. Estos factores son fuentes de incertidumbre y solo permiten la definición de resultados aproximados. Sin embargo, algunas correlaciones en la amplitud podrían mejorar las interpretaciones finales.

5.2.1. Diseño de ensayos y descripción de las probetas.

Para realizar los análisis, se han diseñado dos campañas de laboratorio diferentes en las que se utilizaron distintas probetas de hormigón armado preparadas en laboratorio. Respecto de los materiales utilizados en la preparación de las probetas, en todos los casos las utilizó un hormigón C30, cuya resistencia característica es $f_{ck} = 30$ MPa. Asimismo, las barras de armado empleadas eran de un acero de tipo S460, cuya resistencia característica es $f_{yk} = 460$ MPa. Se han utilizado estos materiales debido a que son muy comunes en el ámbito de la edificación. La resistencia a la compresión de las probetas ha sido verificada en el laboratorio mediante una prueba de compresión (Figura 5.1).

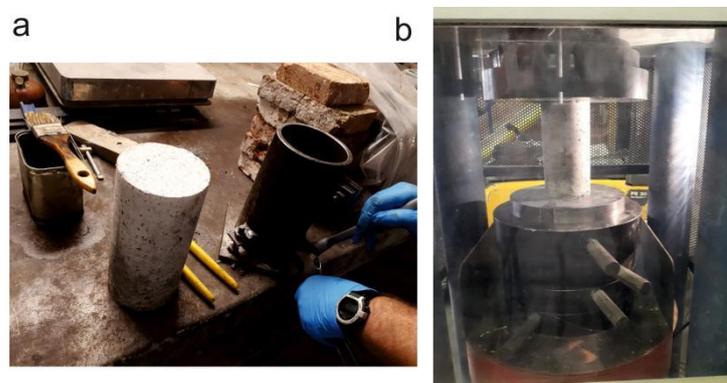


Figura 5.1. Ensayo de compresión simple. a) Preparación de probeta de 10cm de diámetro y 20cm de alto, b) Detalle del ensayo.

A continuación, se describe la preparación de cada uno de los ensayos Test A y Test B

Test A

Para esta campaña se elaboraron dos probetas, que denominaremos S-1A y S-2A, con barras de 12mm como única armadura situada en el centro de cada probeta (Figura 5.2).

En la primera probeta (S-1A), se embebió una barra de refuerzo exenta de corrosión en el hormigón fresco. En la segunda probeta (S-2A), se utilizó una barra de refuerzo afectada previamente por un nivel avanzado de corrosión. De este modo, la barra previamente corroída fue embebida en el hormigón fresco de la probeta. Las dimensiones de las probetas fueron 30x8x8 cm. Transcurrido un tiempo preceptivo de fraguado, no se agregaron procesos de corrosión adicionales y las muestras se sometieron a una prospección no invasiva utilizando los equipos GPR. Las características de estas muestras se resumen en la Tabla 1.

Test B

En este segundo grupo de ensayos, se elaboraron 4 probetas de hormigón de dimensiones de 30x20x7cm y que denominaremos S-1B, S-2B, S-3B y S-4B. Al igual que en el anterior Test, las probetas fueron hormigonadas con una barra de diámetro 12mm y centrada en la probeta. En este caso todas las barras estaban inicialmente exentas de corrosión. Después del hormigonado tres de las cuatro probetas han pasado por un acelerado proceso de corrosión, en condiciones ambientales artificiales.

El proceso de corrosión aplicado a las muestras de hormigón duró un año y fue realizado por medio de una cámara de curado en la que se generó un ambiente agresivo para las barras. La base técnica de este proceso fue generar un ambiente húmedo y cálido, atmósfera donde las variables monitoreadas del proceso fueron la temperatura y la humedad (a una temperatura de 20°C y a una humedad del 95%). La Tabla 1 muestra el proceso de envejecimiento por corrosión aplicado en la cámara de curado a cuatro muestras incluido en el Test B.

Tabla 5.1. Tiempo de corrosión de las muestras en la cámara de curado Test A y Test B.

Specimen	Time chamber corrosion	Concrete type	Steel type	Sizes	Medium	Figure
S-1A	0	C30/35	S460	30x8x8cm	Wet Sand	
S-2A	0	C30/35	S460	30x8x8cm		
S-1B	0	C30/35	S460	30x20x7cm	Dry Sand	
S-2B	3	C30/35	S460	30x20x7cm		
S-3B	6	C30/35	S460	30x20x7cm		
S-4B	12	C30/35	S460	30x20x7cm		

Para la adquisición de datos, las probetas de los Test A y Test B fueron previamente enterradas en arena seca en el Test A y en arena húmeda en el Test B (Figura 5.2). El objetivo de esta preparación era obtener imágenes de radar claras y evitar los efectos de contorno, como bien recomiendan los ensayos preliminares del Capítulo 4.

Las muestras se enterraron a una profundidad de 10 cm en el Test A y a una profundidad 4 cm en el Test B. La velocidad de onda en la arena se determinó experimentalmente en ambas pruebas, siendo el valor promedio aproximado para el Test A, $\bar{v}_A \approx 13\text{cm/ns}$, correspondiente a una constante dieléctrica $k_A \approx 5,3$ y una velocidad promedio para el Test B, $\bar{v}_B \approx 8\text{cm/ns}$, correspondiente a una constante dieléctrica de $k_B \approx 14$.

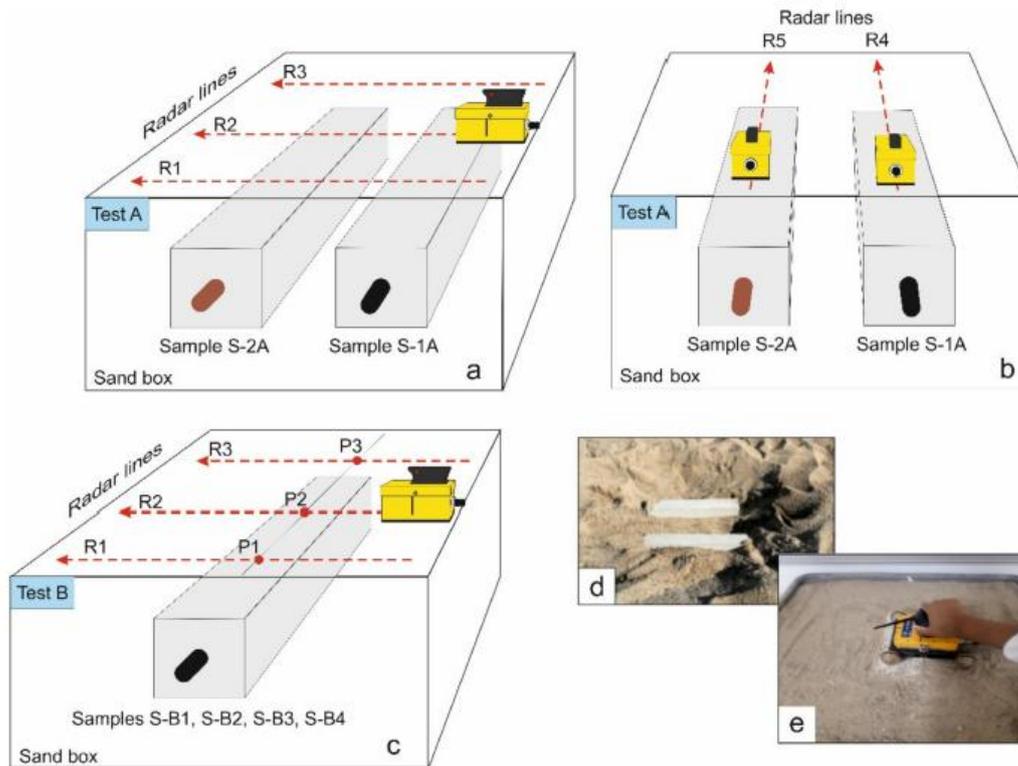


Figura 5.2. Adquisición de datos. a) Trazas transversales en el Test A; b) Trazas longitudinales en el Test A; c) Esquema de adquisición de datos en el Test B; d) Preparación de las muestras (especímenes enterrados en arena Test A; e) Preparación de las muestras, especímenes enterrados en arena Test B.

5.2.2. Adquisición de datos

Con el propósito de evaluar la capacidad de GPR en la evaluación cualitativa y cuantitativa del grado de corrosión de armaduras en hormigón armado, se realizó un experimento que consistió en adquirir trazas de GPR en los dos grupos de ensayo, Test A y Test B. El equipo de radar emplea una antena de 1,6 GHz de frecuencia, dipolar, manufacturada por Mala Geosciences (Mala, 1997).

Tal y como se ha indicado, las muestras se enterraron en arena (Figura 5.2 e y d), y para ello se utilizó un recipiente de cloruro de polivinilo (PVC), cuyas dimensiones fueron 100x100x40 cm. Se verificó que dichas dimensiones eran suficientes para evitar efectos de contorno durante la etapa de prospección GPR.

En el Test A (Figura 5.2 a, b), los radargramas se obtienen moviendo la antena a lo largo del eje de la muestra (líneas de muestreo longitudinales R4A y R5A) y en la dirección ortogonal al eje de las probetas (líneas de muestreo transversales R1A, R2A y R3A).

En el Test B (Figura 5.2 c), los grupos de perfiles se adquirieron moviendo la antena solo en la dirección ortogonal (perfiles transversales R1B, R2B y R3B).

Los parámetros de adquisición de datos de radar se resumen en la Tabla 2.

Tabla 5.2. Parámetros de adquisición de datos de radar.

Antenna Type	Centre Frequency (MHz)	Bandwidth (MHz)	Radar Line Sampling	Time Sampling	Time Window (ns)
Shielded antenna	1600	1400	2 scans/cm	356	8

5.3. Resultados

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en las dos campañas de laboratorio realizadas:

5.3.1. Test A

5.3.1.1. Análisis cuantitativo

El análisis de los radargramas (B-scan) que cruzan ambas probetas (S-1A y S-2A), permitió la observación clara de la barra en las dos probetas (Figura 5.3). En todas las imágenes se detectaron las superficies superior e inferior de las probetas de hormigón. Así mismo se identifican anomalías causadas por los efectos acoplados en los bordes de ambos especímenes.

La amplitud de la onda reflejada en las superficies, ha sido menor que la amplitud de la onda reflejada en la barra metálica debido al contraste entre amplitudes.

Las imágenes de radar destacaron pequeñas diferencias entre las barras sana y corroída, siendo más difusa la imagen producida por el reflejo en el espécimen afectado por corrosión. Además, el tiempo de viaje bidireccional correspondiente a la onda reflejada en la barra corroída, ha sido ligeramente mayor que el tiempo asociado a la probeta conteniendo la barra sana. Asimismo, se observó que el efecto cambió en las diferentes perfiles, probablemente debido a los cambios a lo largo de la barra de refuerzo.

La zona más borrosa en los rardargramas (B-scan), correspondía con una parte específica de un espécimen (Figura 5.4). En esas imágenes, se registró una sección nebulosa sobre el espécimen corroído, probablemente debido a la dispersión en la parte más corroída de la barra metálica.

El resultado podría indicar cambios en el grado de corrosión a lo largo de la misma barra de refuerzo. Contrariamente, en el caso de una barra de refuerzo no corroída, se observa una reflexión longitudinal homogénea.

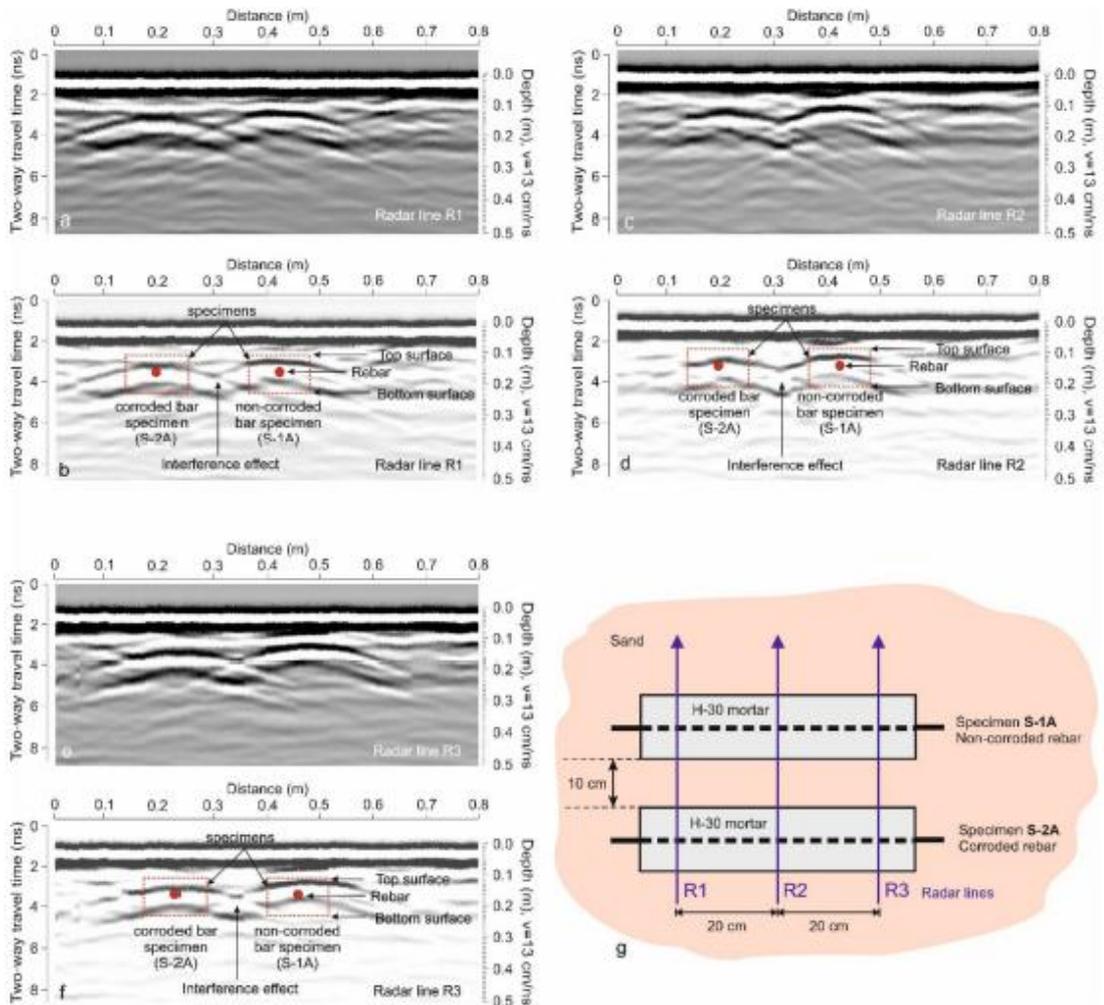


Figura 5.3. Interpretación de las perfiles, (a, b) Probeta R1, (c, d) Probeta R2 y (e, f) Probeta R3, (g) Orientación de las perfiles (B-scan) respecto de las probetas.

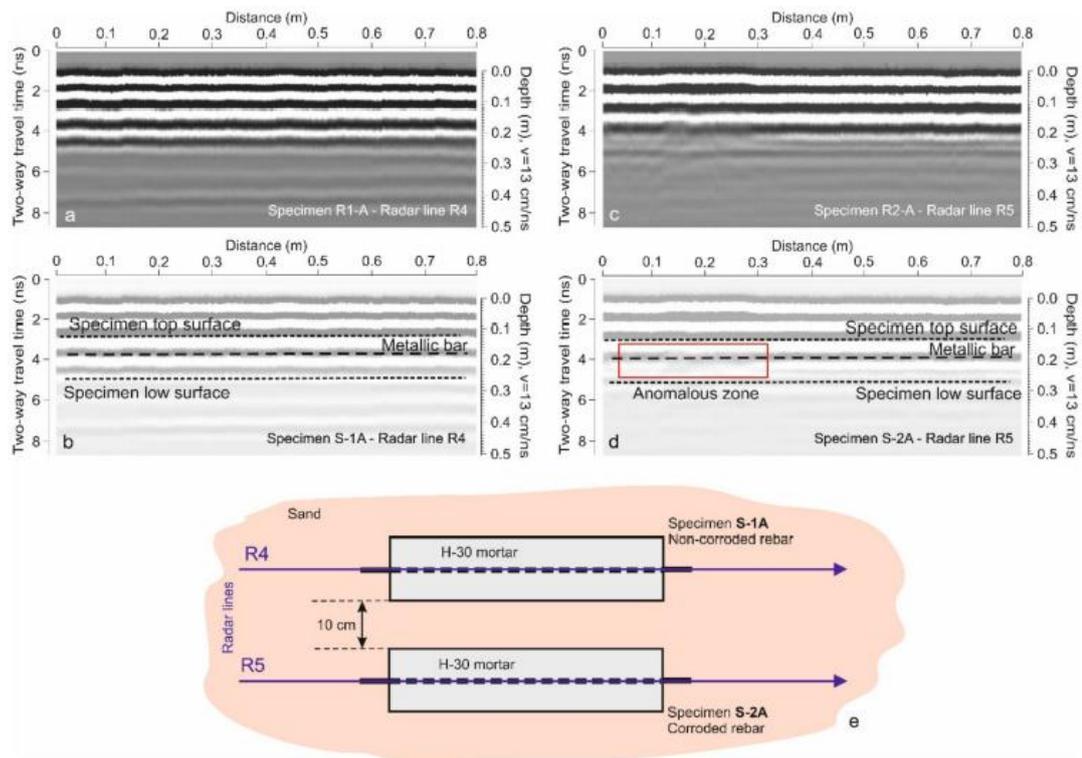


Figura 5.4. Interpretación de las perfiles, (a, b) probeta R4 y (c, d) probeta R5, (e) Orientación de las perfiles (B-scan) respecto de las probetas.

5.3.1.2. Análisis cuantitativo de la amplitud

Un análisis de amplitud detallado requiere la evaluación de las A-scan, de la traza que pasa sobre la barra. La Figura 5.5, muestra los A-scans obtenidos en cada una de las mediciones, así como el valor absoluto de la amplitud.

La caída de la amplitud de la onda reflejada, A , se ha definido en función de la dispersión geométrica y la atenuación como consecuencia de la absorción y la dispersión:

$$A = A_0 r^{-\beta} e^{-\alpha r} \quad 5.1$$

Donde

A , es el coeficiente de atenuación por expansión geométrica del frente de ondas

A_0 , es el coeficiente de atenuación inicial de la señal

r , es la distancia recorrida por la onda

α , es el coeficiente de atenuación

β , es el coeficiente de fase

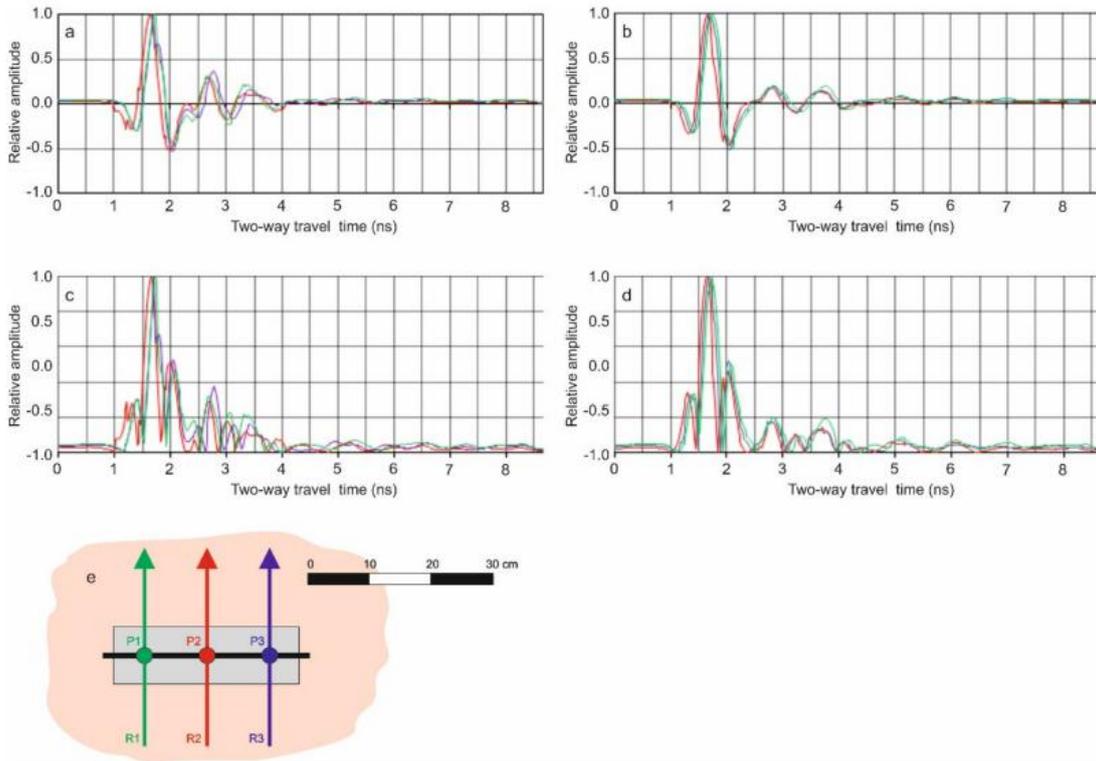


Figura 5.5. a) A-scan probeta R1-A; b) A-scan probeta R2-A; c) Valor absoluto de amplitud probeta R1-A; d) Valor absoluto de amplitud probeta R2-A y e) Líneas de adquisición, cada color corresponde a una línea de radar diferente en la misma prueba.

Suponiendo que la distancia recorrida es pequeña y la velocidad de la onda es aproximadamente la misma, el único término que influye en el decaimiento de la amplitud es la parte asociada a la absorción de energía. Por lo tanto, la atenuación se representa por la disminución de la amplitud de la onda reflejada en la barra metálica.

Los valores de la amplitud se trazaron en función del tiempo de viaje de ida y vuelta. Esa representación definía la amplitud en función del tiempo (Figura 5.6), y la atenuación estaba representada por un solo término en el que se incluían todos los términos del decaimiento:

$$A = A_0' e^{-\alpha' t} \quad 5.2$$

Asociando α con α' , utilizando la conversión de tiempo de ida y vuelta en profundidades.

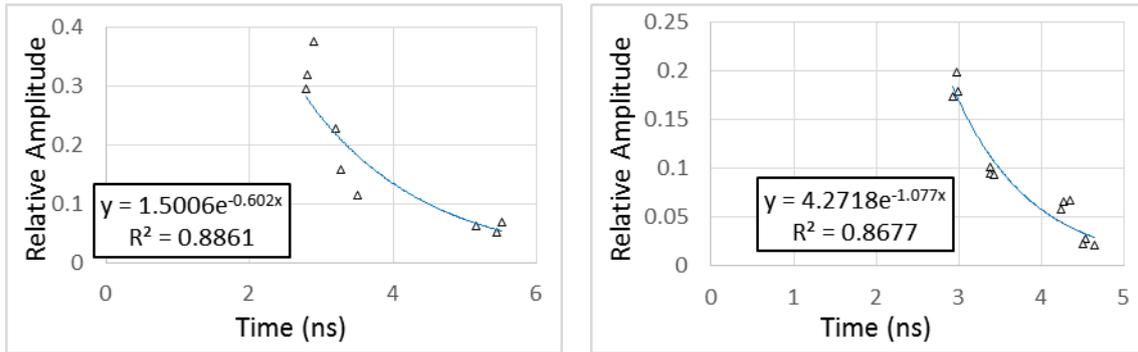


Figura 5.6. Amplitud de la onda reflejada versus tiempo (a) Probeta R1-A (barra no corroída); (b) Probeta R2-A (barra corroída).

Comparando ambos casos, la disminución de la amplitud es mayor en el caso de la barra corroída (probeta R2-A). En la Tabla 3 se presentan los resultados de ambos ajustes, observándose un cambio importante en la atenuación para el caso de la probeta con la barra corroída.

Tabla 5.3. Atenuación de la amplitud de onda reflejada con el tiempo. Ajuste de parámetros para el Test A.

Parámetros	Probeta R1-A	Probeta R2-A
	Barra No-corroída	Barra corroída
α' (s ⁻¹)	0.60	1.07
R ²	0.886	0.867

La diferencia en el decaimiento de la amplitud, parece estar asociado directamente con la corrosión de la barra.

En el Test A, el hormigón no se vio afectado por la corrosión de la barra de refuerzo, debido a que el proceso de corrosión ocurrió antes de la fabricación y hormigonado de la probeta. Por lo tanto, el cambio en la atenuación probablemente se debió a la dispersión de la energía incidente en la superficie irregular de la barra.

Al retirar la barra corroída de la probeta de hormigón (probeta R2-A), se pudo observar que la superficie de la barra presentaba un aspecto irregular. De este modo un anillo irregular de metal afectado rodearía un núcleo de metal sano. Esta superficie perimetral corroída de la barra (Figura 5.7), podría haber producido una cierta dispersión y, como consecuencia, un mayor decaimiento de la amplitud de la onda reflejada si se compara con el ensayo utilizando la probeta con la barra de refuerzo no corroída (probeta R1-A).

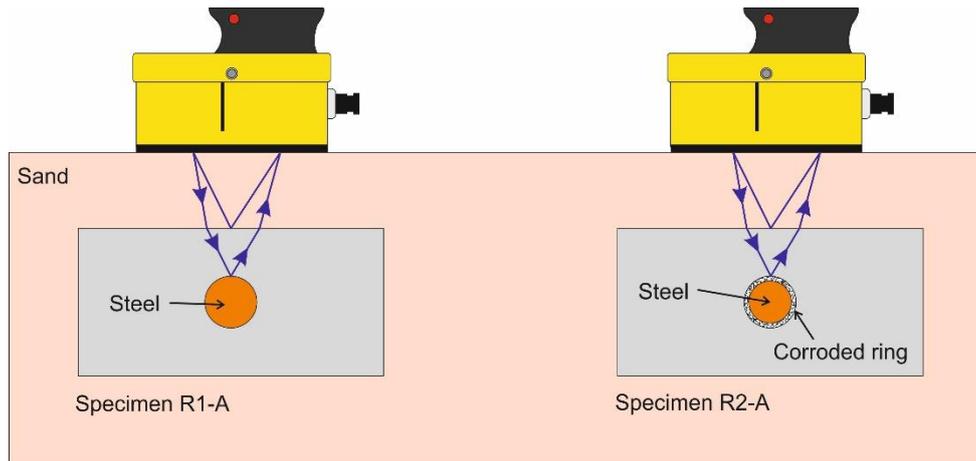


Figura 5.7. Test A- Diferencia entre las dos probetas. En la probeta R2 se observa un anillo corroído alrededor de la barra de refuerzo.

5.3.2. Test B

5.3.2.1. Análisis cuantitativo

En este ensayo se han utilizado cuatro probetas en las que las armaduras presentaban diferentes grados de corrosión. Se utilizó una probeta exenta de corrosión (probeta S1-B) y tres probetas con grados crecientes de corrosión en sus armaduras (probetas S2-B, S3-B y S4-B). El proceso de corrosión fue aplicado a posteriori en las armaduras, esto significa que, inicialmente, todas las armaduras eran sanas y tras ser embebidas y fraguar en el hormigón, se les aplicó un proceso que condujo a su corrosión. De este modo, las tres muestras con corrosión se obtuvieron después de una permanencia de tres, seis y doce meses respectivamente, en un cámara de curado para forzar la corrosión.

Las probetas fueron enterradas en arena para evitar efectos de contorno durante la adquisición, al igual que se realizó en el Test A. En este caso los perfiles de adquisición de radar eran perpendiculares al eje longitudinal de las probetas.

La Figura 5.8, muestra los B-scans obtenidos sobre las probetas con grados crecientes de corrosión. El resultado son los radargramas S-1B, S-2B, S-3B y S-4B, que se corresponden, respectivamente, con la probeta exenta de corrosión, con tres meses, con seis meses y con un año de corrosión.

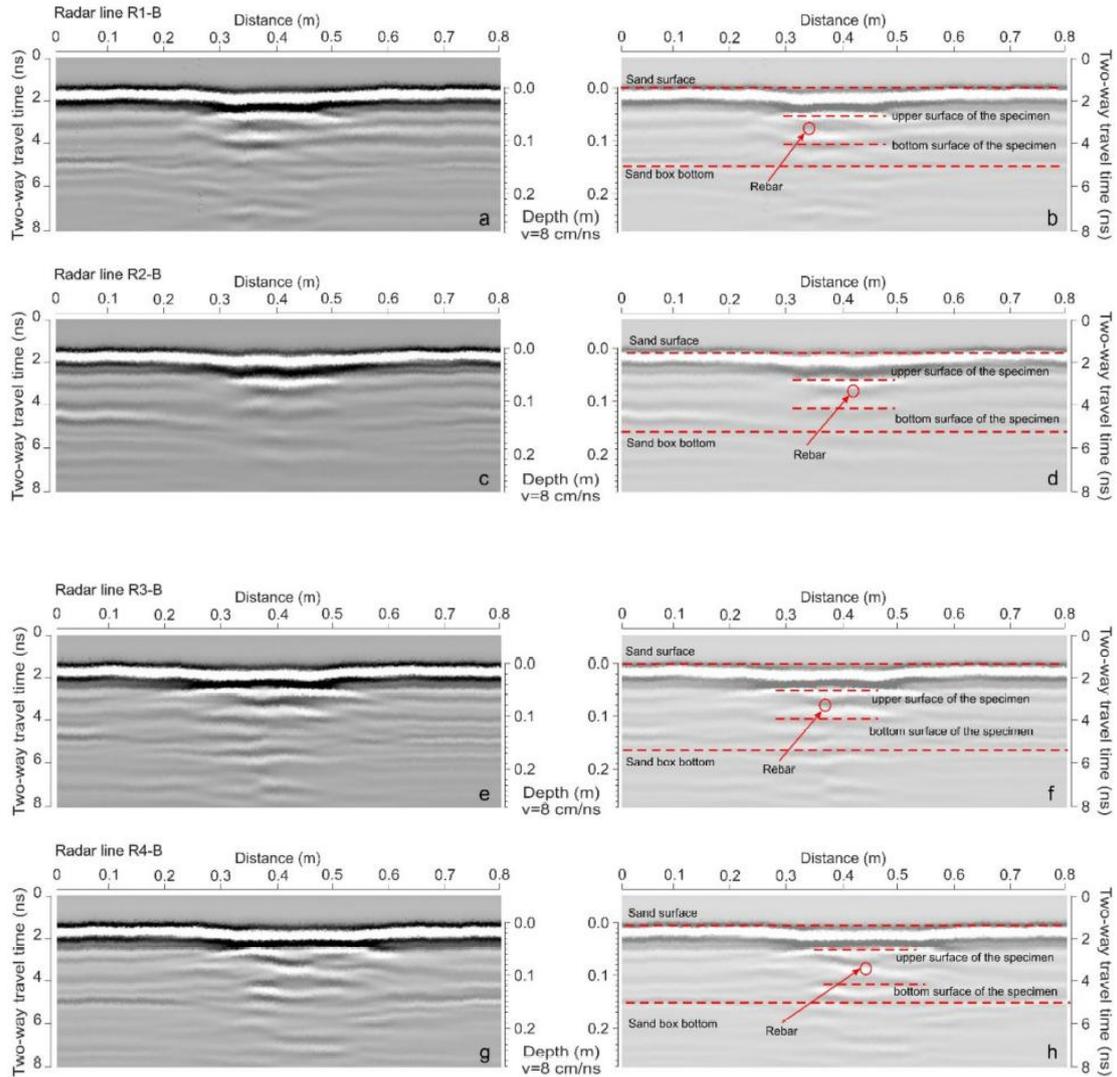


Figura 5.8. Test B, B-scan e interpretación para las cuatro probetas. a-b) B-scan e interpretación para S-1B; c-d) B-scan e interpretación para S-2B; e-f) B-scan e interpretación para probeta S-3B; g-h) B-scan e interpretación para S-4B.

En todos los B-scan analizados (Figura 5.8), la probeta de hormigón se puede identificar claramente y es posible identificar sus superficies superior e inferior, aunque la detección de la parte inferior es menos clara.

Pese a la existencia de diferencias en las anomalías, la barra de acero se ha podido identificar en todos los casos. El resultado más destacado ha sido la diferencia entre los reflejos sobre las probetas con corrosión y la probeta con la barra no corroída.

La anomalía producida en la barra no corroída (B-scan S-1B), es más clara que las anomalías debidas a las otras barras con algún grado de corrosión. Se observa que la imagen es menos clara a medida que aumenta el tiempo de corrosión.

5.3.2.2. Análisis cuantitativo de amplitudes

La traza obtenida sobre la barra de cada probeta (A-scan), será utilizada para el análisis de las amplitudes de la onda reflejada. La Figura 5.9 presenta los A-scan correspondientes a cada una de las medidas. En la Figura 5.10 se muestra el valor absoluto de las amplitudes para los mismos A-scan.

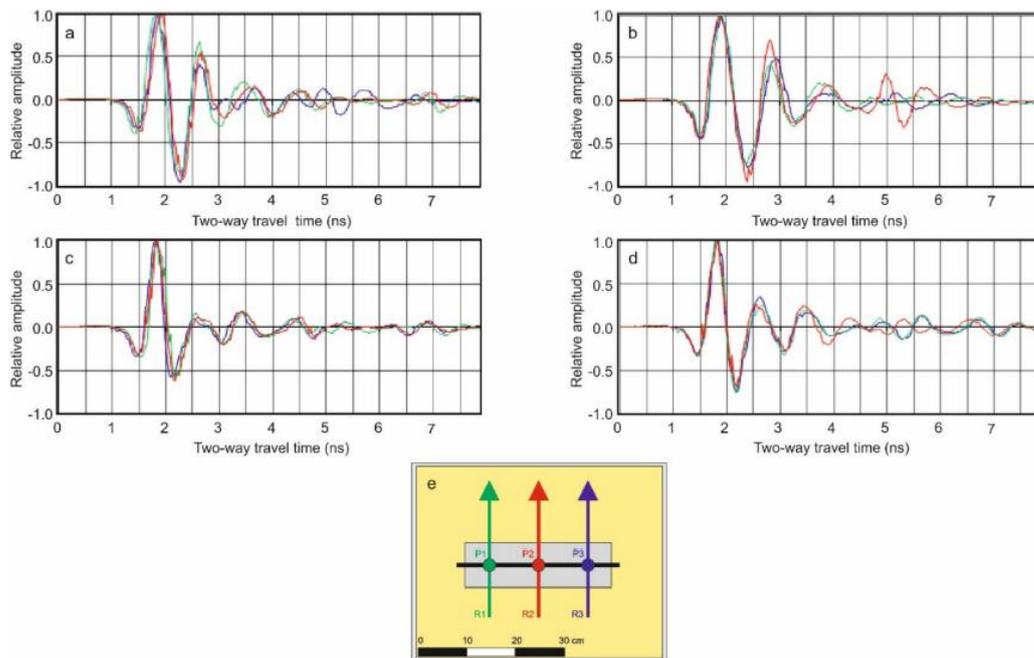


Figura 5.9. A- scan de muestras obtenidas en el Test B: a) R1-B (armadura no corroída); b) R2-B (3 meses de corrosión); c) R3-B (6 meses de corrosión); d) R4-B (12 meses de corrosión); e) Orientación de los perfiles, cada color corresponde a un perfil diferente en la misma prueba.

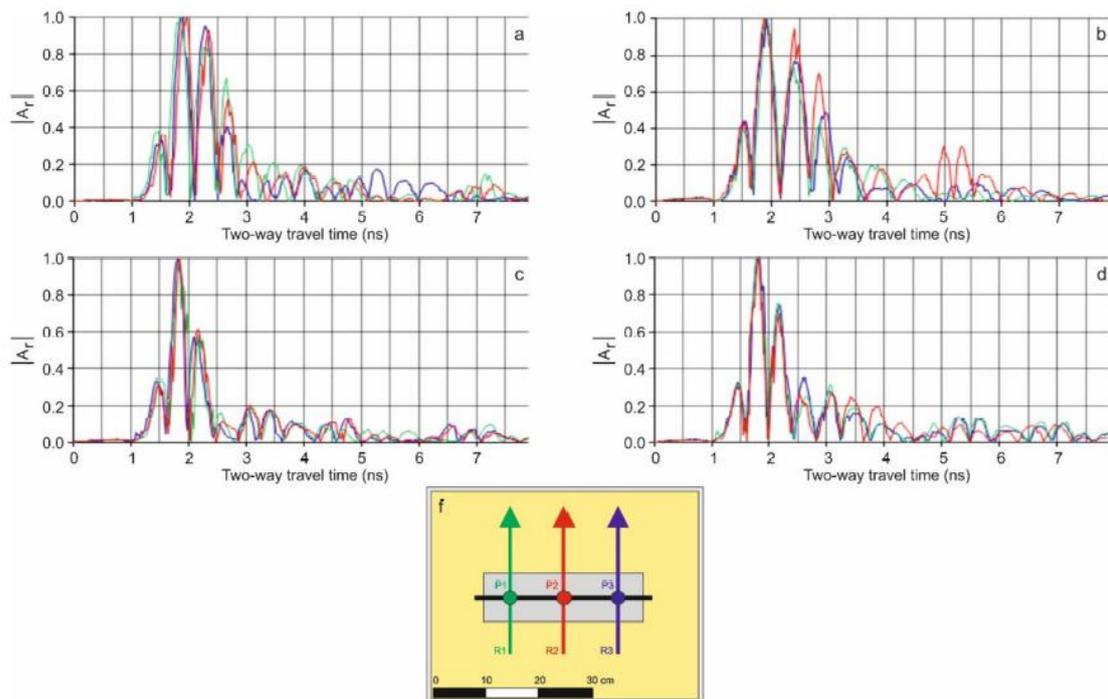


Figura 5.10. Valor absoluto de las amplitudes de los A- Scan en el Test B: a) R1-B (armadura no corroída); b) R2-B (3 meses de corrosión); c) R3-B (6 meses de corrosión); d) R4-B (12 meses de corrosión); f) Perfiles de radar, cada color corresponde a un perfil de muestreo diferente en la misma prueba.

Seleccionando los puntos asociados a la máxima amplitud en las gráficas del valor absoluto de los A-scan, es posible ajustar el decaimiento exponencial de las amplitudes correspondientes a la reflexión sobre las armaduras. Esto queda expresado en la Figura 5.11 en la que se aprecia el ajuste de estos máximos a la función recogida en la expresión [5.2] para cada uno de los ensayos del Test B. De este modo se obtienen cuatro ajustes de la ley de atenuación, un ajuste para cada grado de corrosión en las probetas.

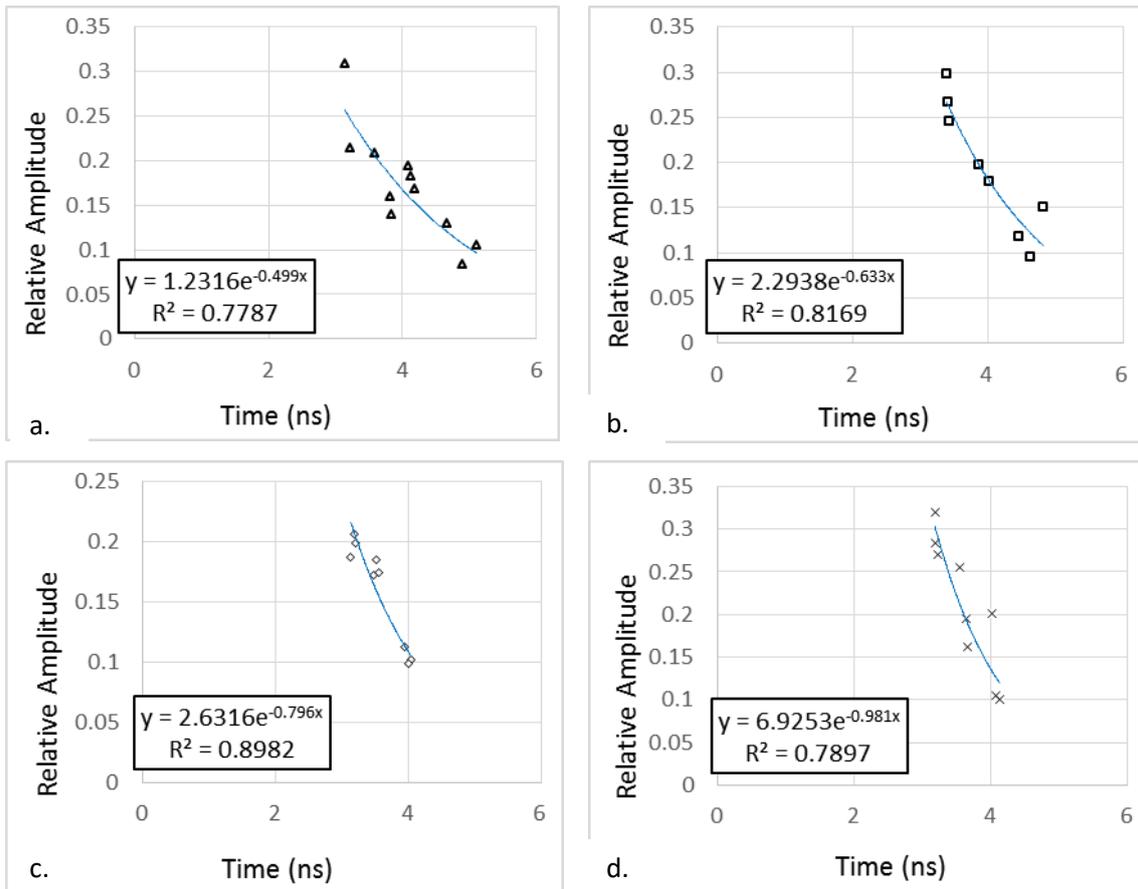


Figura 5.11 Decaimiento de la amplitud de la onda reflejada en la barra metálica. a) Probeta R1-B (barra de refuerzo no corroída); b) Probeta R2-B (3 meses de corrosión); c) Probeta R3-B (6 meses de corrosión); d) Probeta R4-B (12 meses de corrosión).

El coeficiente de atenuación, α' , determina el decaimiento de la amplitud para cada probeta. Las diferencias obtenidas para este coeficiente en cada uno de los ensayos, esto es, para los distintos grados de corrosión de las probetas, se atribuyen a una diferencia en la absorción y dispersión de la energía en cada caso. La Tabla 4 resume los resultados de los ajustes obtenidos para el coeficiente de atenuación.

Tabla 5.4. Coeficientes de atenuación para el Test B

Specimen	S-1B	S-2B	S-3B	S-4B
Tiempo de corrosión (meses)	0	3	6	12
α' (s^{-1})	0.49	0.63	0.79	0.98
R^2	0.778	0.816	0.849	0.789

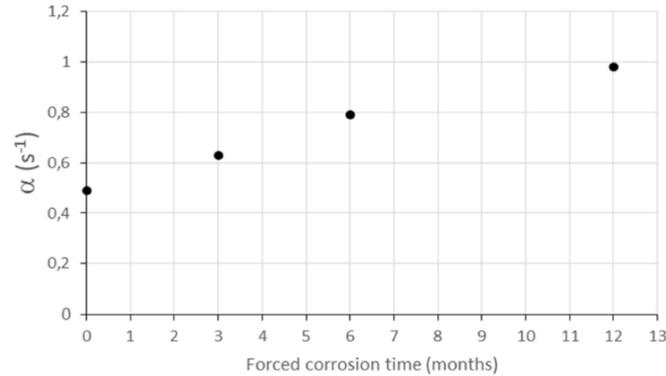


Figura 5.12. Coeficiente de atenuación en función del tiempo de corrosión para los ensayos del Test B.

El Test B, comparó los resultados del coeficiente de atenuación para las probetas con barras de refuerzo afectadas con diferentes tiempos de corrosión (figura 5.12). Los resultados indican que, durante el proceso de corrosión, la atenuación aumenta cuando se incrementan los tiempos de exposición a la corrosión. Las posibles causas de este efecto podrían ser:

- El scattering de la señal de GPR, podría producirse en la zona de hormigón situada en contacto y proximidad de la barra corroída, esto es, en el volumen que rodea a la barra. En este volumen, cuya sección se detalla en la Figura 5.13, el hormigón está afectado directamente por el óxido de hierro de baja densidad que se origina en la barra metálica y migra hacia el hormigón que la envuelve. El incremento de volumen que este efecto genera en el hormigón situado en la proximidad y contacto de la armadura, produce un estado de fisuración del mismo, afectando la porosidad y la densidad del hormigón (Krishnarajapete *et al.*, 2015 y Hasan *et al.*, 2016).

Este aumento de heterogeneidades en el hormigón situado alrededor y en la inmediata proximidad de la barra de refuerzo (Figura 5.13), dispersa la señal GPR, disminuyendo, de este modo, la amplitud de la onda reflejada.

Las consecuencias de este efecto sobre las imágenes de GPR, podrían ser un aumento del ruido de fondo y una disminución de la amplitud de la señal recibida por el efecto de la atenuación. Además, es importante tomar en cuenta que el aumento del ruido de fondo podría ocultar la anomalía, dificultando la detección de la barra de refuerzo.

- La corrosión de la propia barra de refuerzo produce un cambio en la atenuación, probablemente debida a la dispersión de la energía que se genera en la superficie irregular de la barra corroída, tal y como se mencionó en la campaña experimental anterior (Test A).

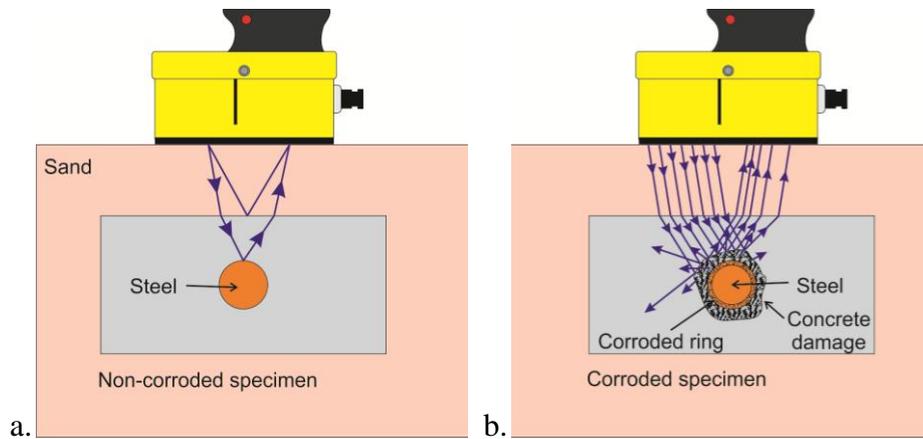


Figura 5.13. Esquema del efecto de la corrosión de las armaduras en el hormigón de las probetas. a) Hormigón no afectado con armadura exenta de corrosión; b) Hormigón afectado en el volumen en contacto con la armadura afectada por corrosión.

5.4. Discusión

El efecto de la corrosión en las señales de GPR se analizó en base a dos ensayos diferentes. El primer ensayo se centró en el efecto sobre la señal GPR cuando se utilizan probetas con armaduras sanas y probetas con armaduras afectadas por corrosión. Por otro lado, el objetivo del segundo ensayo fue detectar los efectos del grado de corrosión en las armaduras y hormigón que las envuelve, sobre la señal GPR registrada en cada caso.

El análisis se basó en la evaluación de B-scan y A-scan, detectando cambios en la amplitud de la señal reflejada y cambios en las imágenes.

Trabajos previos han demostrado que la corrosión podría identificarse tanto en B-scans (debido a imágenes borrosas), como en A-scan (debido a cambios en la amplitud de la señal). En estos casos, el cambio de intensidad de la señal parece estar relacionado con la acción química de los cloruros en el hormigón como consecuencia de la corrosión de las varillas (Zaki *et al.*, 2018; Hong *et al.*, 2017; Grimm *et al.*, 2006 Hubbard 2003).

El análisis de los resultados indica un cambio en la amplitud de la señal que se corresponde con un decaimiento de la onda reflejada en la barra corroída. En ambos ensayos, Test A y Test B, cuando se analizan los resultados con las armaduras corroídas, se obtiene una disminución en la amplitud de la onda reflejada registrada por la antena GPR.

El análisis de las imágenes del Test A, evidencia una imagen más borrosa en el caso de las armaduras previamente corroídas (S-2A) y embebidas en hormigón no afectado por la corrosión, cuando se comparan con los resultados del espécimen S-1A (barras de refuerzo no corroídas y hormigón no afectado). Este resultado indicó que la borrosidad en los B-scans, aparece cuando la corrosión afecta exclusivamente a las barras de refuerzo y no existe afectación en el volumen de hormigón que envuelve las armaduras. Esto significa que la atenuación y la borrosidad en los B-scans deben explicarse atendiendo, únicamente, a la corrosión del metal de las armaduras

Una posible explicación a este fenómeno podría estar relacionada con cambios en la sección metálica transversal reflectante. La corrosión alteró la superficie de la armadura, haciéndola más irregular y permitiendo una dispersión de la energía incidente mayor de la que se produciría sobre la superficie de una barra sana. Este efecto se ha observado en diferentes aplicaciones de tecnología GPR. (Beckmann *et al.*, 1987, Perez-Gracia *et al.*, 2008, Salinas Naval 2018). Este resultado apunta a la posibilidad de una detección de la corrosión de armaduras en etapas tempranas.

Los resultados del Test B, mostraron que los efectos sobre la amplitud de la señal reflejada y la nitidez de la imagen GPR descritos para los ensayos del Test A, aumentaban cuando el grado de corrosión sobre las armaduras se incrementaba. De este modo, aparece una correlación entre el grado de corrosión de las armaduras y la atenuación de la amplitud en los A-scans y la falta de nitidez en los B-scans. No obstante, en el caso de los ensayos del Test B, debe recordarse que las armaduras sufrieron un proceso de corrosión una vez embebidas en el hormigón. Por tanto, en el Test B, la corrosión afectó al metal del armado y al hormigón que lo rodea. En el Test A, se utilizaron barras corroídas antes de ser embebidas en el hormigón, por tanto, la corrosión y sus efectos en la señal GPR sólo fueron debidos a la corrosión en las armaduras y no a efectos en el hormigón.

En consecuencia, en los ensayos del Test B se identifican dos fuentes que afectan a la señal GPR. La primera es la corrosión del armado y la segunda es la degradación del hormigón en contacto con la armadura corroída. En este caso, el efecto sobre las señales GPR podría explicarse atendiendo a las siguientes causas: i) Cambios en la propia sección transversal de la armadura (superficie irregular en fases tempranas y deslaminación en fases avanzadas); ii) Alteración química del hormigón en la zona de contacto próximo a la barra corroída ; iii) Alteración física del hormigón en la zona de contacto próximo con las armaduras (fisuración).

En relación al coeficiente de atenuación, que recoge los efectos de absorción y dispersión de la señal GP, se ha podido correlacionar este coeficiente con el grado de corrosión de las armaduras en los ensayos del Test B.

5.5. Conclusiones

El trabajo de investigación presentado, introduce un método no destructivo y no invasivo basado en la tecnología GPR, orientado a la evaluación cualitativa y cuantitativa del proceso de corrosión, en estructuras y construcciones de hormigón armado.

Los resultados obtenidos apuntan a la posibilidad de la detección del fenómeno de corrosión en fases tempranas. Los ensayos planteados se centraron en una primera aproximación al problema utilizando probetas controladas y simples, con el objetivo de obtener una interpretación clara de la prospección con GPR. Por lo tanto, este trabajo se basó en el análisis de probetas simples con el objetivo de obtener registros GPR exentos de confusión e información clara orientados al análisis del comportamiento específico de las ondas interaccionando con elementos afectados por la corrosión.

Las configuraciones más complejas requieren la consideración de más variables que podrían afectar los resultados finales. Por lo tanto, en estructuras y zonas más complejas, podría ser necesario un análisis adicional para determinar posibles correlaciones entre los efectos observados y potenciales y nuevas variables.

Futuras investigaciones deben incluir más barras de refuerzo para permitir un acercamiento más realista al problema y obtener un mejor enfoque para la evaluación de estructuras reales de hormigón armado. El uso de metodologías no invasivas y no destructivas, como el GPR, pueden prevenir la evolución del daño en estructuras reales.

Esta metodología, aplicada a la detección y evaluación del daño en fases tempranas, puede contribuir a disminuir la vulnerabilidad de las construcciones existentes, ampliando, de este modo, su vida útil y, en consecuencia, convirtiéndolas en construcciones más sostenibles.

**CAPITULO 6- CASO DE
ESTUDIO: BASÍLICA DE
SANTA MARIA DEL PI (BARCELONA)**

d

6. CASO DE ESTUDIO: LA BASÍLICA DE SANTA MARIA DEL PI (BARCELONA)

6.1 Introducción

La Iglesia gótica de Santa María del Pi, ubicada en el centro histórico de Barcelona, fue declarada basílica menor en 1925, y protegida como Bien Cultural de Interés Nacional (BCIN) por el Decreto 03/06/1931 (Bassa, 2014). La Iglesia del Pi está documentada desde el año 1987 (Vergés, 1992). Desde sus inicios, en su entorno se fue formando uno de los primeros ravales de la ciudad de Barcelona, fuera de sus murallas, denominado Vilanova del Pi. La precede una capilla del siglo V (año 415) de la que, pese a las referencias documentales, no se han localizado restos del edificio románico primitivo. No constan excavaciones para localizar restos de esta primitiva construcción románica.

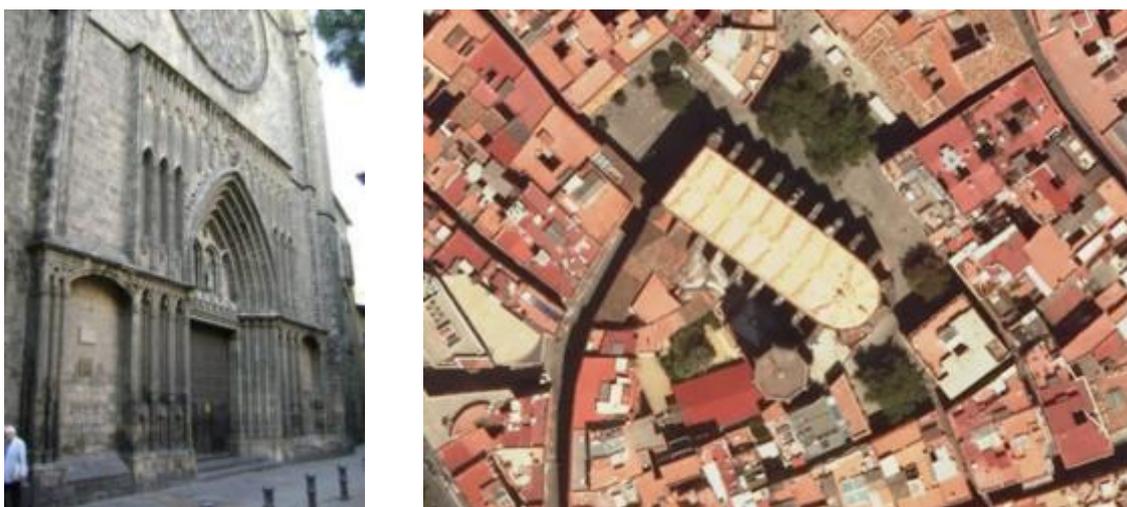


Figura 6. 1: Fachada frontal y vista aérea de la planta de la basílica de Santa María del Pi y de su campanario octogonal situados en el distrito Ciutat Vella de Barcelona.

La construcción del actual templo gótico (ver Figura 6.1) se inició en el siglo XIV. La nave fue cubierta a finales del siglo XIV y el campanario se finalizó a finales del siglo XV. Como sucede en muchas construcciones históricas, la basílica tiene un notable historial de daños de diferente naturaleza y de posteriores reparaciones y restauraciones para subsanar a aquellos. La Iglesia sufrió daños relevantes durante el terremoto de Cataluña (MW=6,7) del 2 de febrero de 1428. Más recientemente, también causaron daños en la basílica, la explosión de un polvorín cercano y los bombardeos sobre la ciudad sitiada, en 1714, durante la guerra de sucesión española. En 1717 constan unas

primeras reparaciones de partes de la Iglesia, pero no se realizó un primer proyecto de restauración hasta el período 1863-1884. Quedan documentadas la restauración de los tejados de las capillas, la portada y la fachada posterior. En este período, se eliminó la decoración barroca del templo que no volvió a ser restaurada hasta 1915. En 1936, durante la guerra civil española, un gran incendio afectó la cubierta y, parcialmente, fachada de la basílica. En 1950 se emprendieron las obras para reparar los daños causados por aquel incendio.

Recientemente, un reconocimiento del estado de la basílica, basado en la inspección visual realizada por expertos, ha permitido señalar daños no negligibles que podrían afectar la estructura del templo. Esta situación ha obligado a proponer una evaluación y estudio que permitan profundizar sobre la extensión y las causas del daño observado. Parte del daño, principalmente localizado en la cubierta, ha sido causado por infiltraciones de agua. Además, la presencia de un esquema de fisuración en el piso, causado, aparentemente, por asentamientos diferenciales, es otra contribución al daño observado en la basílica.

Para evaluar el problema de filtraciones en la cubierta se ha propuesto utilizar la tecnología no invasiva y no destructiva de GPR (Ground Penetrating Radar). Esta técnica, y la metodología que la acompaña, se han aplicado en numerosos estudios de reconocimiento y evaluación previos a la propuesta y ejecución de proyectos de rehabilitación de edificios históricos. Principalmente, la tecnología GPR se ha aplicado en la evaluación de construcciones de mampostería de piedra (Perez-Gracia et al., 2000; Gosálbez et al., 2011; Perez Gracia et al., 2013) En el contexto de este trabajo de investigación, también son destacables publicaciones relativas a la aplicación de la tecnología GPR al estudio y evaluación de daños por filtración de agua y humedad (Maierhofer et al., 2001; Perez-Gracia et al., 2011; Solla et al., 2011, Stampolidis et al., 2003).

El estudio del subsuelo se ha llevado a cabo utilizando el método del cociente espectral H/V. Este método permite estimar el periodo fundamental y el factor de amplificación a partir de mediciones de vibraciones asociadas a ruido ambiental en superficie (Nakamura, 1998). Los estudios con H/V demuestran la eficacia del método para la detección de rellenos, debido a su capacidad para detectar el contacto entre los sedimentos y los estratos más consolidados (Guéguen et al., 2007). Actualmente, esta

técnica es extensamente utilizada para la elaboración de mapas de zonificación sísmica en entornos urbanos (Lachet et al., 1996; Dikmen 2005).

6.2 La basílica de Santa María del Pi

La Iglesia de Santa María del Pi, que alcanzó el rango de Basílica menor en 1925 y fue declarada Bien de Interés Cultural en 1931, está ubicada en la plaza del Pino del barrio gótico de la ciudad de Barcelona. Se sitúa en el centro del distrito administrativo de Ciutat Vella de la ciudad (ver Figura 6.1).

Actualmente, en el lateral de la basílica, el portal del Avemaría permite apreciar algunos elementos románicos datados de finales del siglo X y que corresponden a la iglesia construida anteriormente en el mismo lugar. Es muy probable que la basílica actual fuera edificada, entre 1319 y 1391, sobre restos de la anterior iglesia. No constan hoy, excavaciones ni otros estudios de prospección que puedan esclarecer la extensión y ubicación exacta de anteriores construcciones o edificaciones.

Desde el siglo XIV hasta hoy, la iglesia ha sido expuesta a eventos de distinta naturaleza que le han causado daños, en algunos casos severos. Destacan el terremoto de Cataluña ($M_w=6,7$) del 2 de febrero de 1428, que causó daños importantes en el rosetón y fachada principal, los bombardeos de 1714 que sufrió la ciudad y la propia basílica durante la guerra de sucesión española y el incendio de 1936 causado por grupos anticlericales durante la guerra civil española y que causó fuertes daños estructurales especialmente en la cubierta y partes de la fachada.

En correspondencia con los episodios de daños sufridos por la basílica se tienen proyectos de reparación y rehabilitación de las partes dañadas del edificio realizados en distintas épocas. De estas actuaciones han quedado documentadas unas primeras reparaciones de partes de la Iglesia realizadas en 1717. Más tarde, en el período 1863-1884, se acomete el primer proyecto de envergadura de restauración del edificio. En 1950 se aborda el último gran proyecto de reconstrucción para reparar los daños causados en la basílica por el incendio de 1936.

6.2.1 Edificación y estructura

Arquitectónicamente, el edificio consta de una única nave central de 54m de longitud, 15,5m de anchura y 27m de altura. La nave está presidida por un ábside poligonal y flanqueada por capillas laterales situadas entre los contrafuertes. La gran nave central

está compuesta por siete tramos rectangulares cubiertos con bóveda de crucería gótica y nervios de piedra (ver Figura 6.1). Los muros perimetrales de la nave están reforzados con contrafuertes góticos, que se integran en el interior del templo y en cuyas separaciones se abren las capillas laterales. El ábside está cubierto por una cúpula radial que incluye el primer tramo de las capillas (Vergés, 1992).

La fachada principal, en la parte superior de la portada, incluye un gran rosetón de doce brazos y 10 m de diámetro que data, originariamente, del siglo XIV. Esta fachada y su rosetón fueron parcialmente destruidos durante el incendio de 1936 y reconstruidos entre 1939 y 1943. La fachada está flanqueada por dos torres octogonales. El campanario ubicado en el lado meridional de la cabecera, también de planta octogonal y de cuerpo exento, tiene una altura de 54m y sus muros, en la base, tienen un espesor de 3,55m. En el lado opuesto, se sitúan la fachada lateral y el ábside que incluyen un muro continuo con ventanales entre los contrafuertes. Sobre los contrafuertes se observa una torre ochavada que permite el acceso a la cubierta a través de una escalera de caracol. Actualmente, es posible contemplar sobre los contrafuertes de la fachada lateral, los restos de las espadañas donde debían estar las campanas antes de la construcción del campanario actual.

A lo largo de la historia los trabajos de reparación y remodelación de la iglesia, realizados en distintas épocas, han supuesto una serie de modificaciones, ampliaciones y mejoras sobre la construcción original finalizada en 1391. En la Figura 6.2 se detallan sobre el plano de la actual basílica, las modificaciones y ampliaciones realizadas, en diferentes períodos, sobre la construcción original de la iglesia.

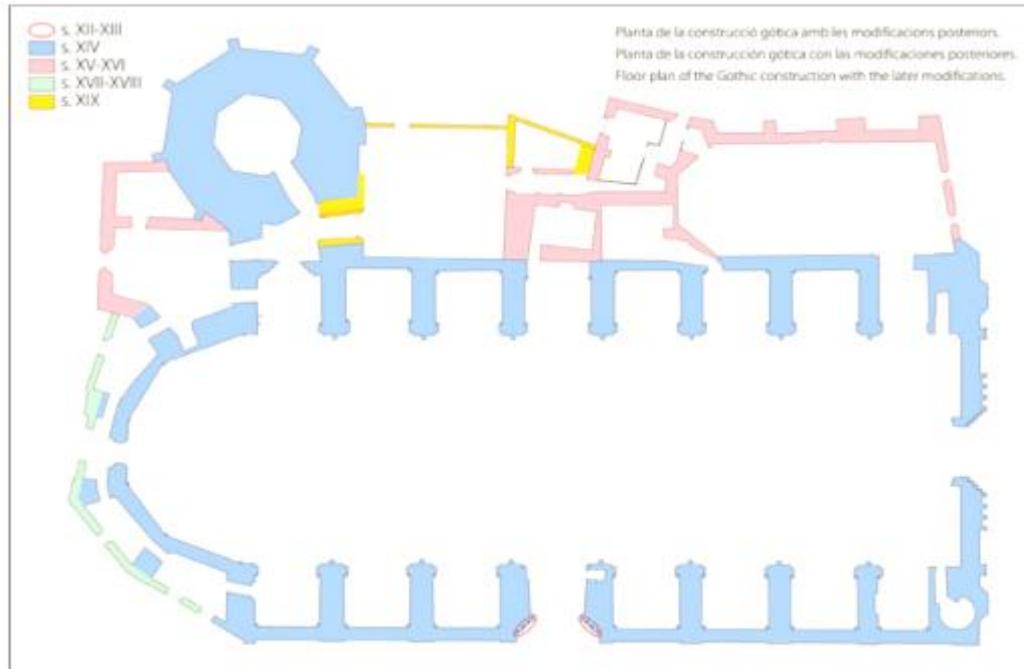


Figura 6. 2: Planta actual de la basílica de Santa María del Pi (Barcelona) con el detalle de las ampliaciones y modificaciones de la construcción original y el período en el que fueron realizadas.

La basílica, como corresponde a una edificación del siglo XIV, pertenece a la tipología de edificaciones de mampostería de piedra y mortero de cal hidráulica. Los principales materiales empleados en la construcción de la basílica son la piedra cortada y unida con mortero de cal. Con este tipo de mampostería han sido realizados los muros y contrafuertes, las cimentaciones, las bóvedas y los arcos de la nave y de la torre del campanario.

6.3 Metodología

La metodología utilizada en este caso de estudio queda definida por los problemas identificados y las necesidades y objetivos planteados. Los objetivos propuestos en este caso de estudio son: i) Identificar el problema de filtraciones de la cubierta para proponer políticas de mantenimiento o rehabilitación de los componentes que presentan daños y ii) Identificar las causas de los agrietamientos en diferentes partes de la edificación y del suelo de la basílica. Las dos tecnologías propuestas para afrontar los problemas de la basílica son la técnica GPR y el método del cociente espectral basado en sismica pasiva. A continuación, se detalla la metodología seguida utilizando ambas técnicas.

6.3.1 Ensayo no destructivo mediante GPR

La primera tecnología utilizada en este caso de estudio es el radar de subsuelo, Ground Penetrating Radar (GPR). Se trata de una técnica de prospección no invasiva que utiliza impulsos electromagnéticos de muy corta duración, entre 1-60 nanosegundos. Para este trabajo fue utilizada una antena de registro continuo modelo SIR-3000, de la firma Geophysical Survey System, Inc (GSSI). El modelo específico utilizado es el GSSI-5103 cuya frecuencia central es de 400 MHz.

La adquisición de datos fue realizada sobre la cubierta principal de la basílica, a lo largo de 5 perfiles (GPR line o perfiles GPR); uno lateral P1, dos perfiles más cortos sobre las capillas P2 y P3, un perfil perimetral P4 y un perfil transversal P5, tal como quedan detallados en la Figura 6.3. La posición de la antena en cada punto de cada perfil específico se determinó utilizando un odómetro y posicionando cada línea de radar sobre el plano.

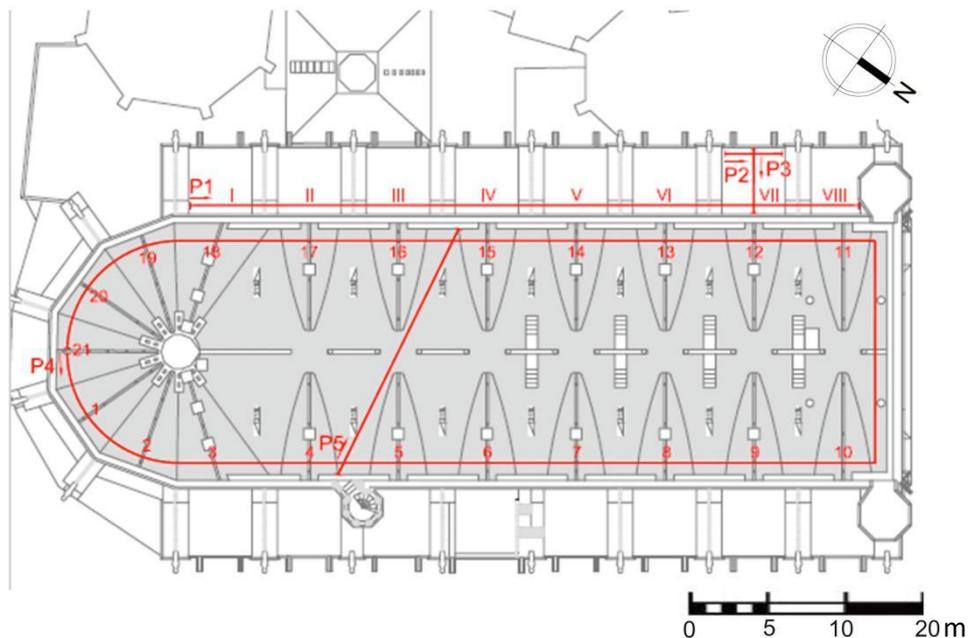


Figura 6. 3: Perfiles GPR (GPR lines) adquiridos sobre la cubierta de la basílica de Santa María del Pi (Barcelona): P1 perfil lateral; P2-P3 perfiles cortos sobre las capillas; P4 perfil perimetral; P5 perfil transversal.



Figura 6. 4: Adquisición de datos con equipo GPR sobre la cubierta de la basílica de Santa María del Pi (Barcelona).

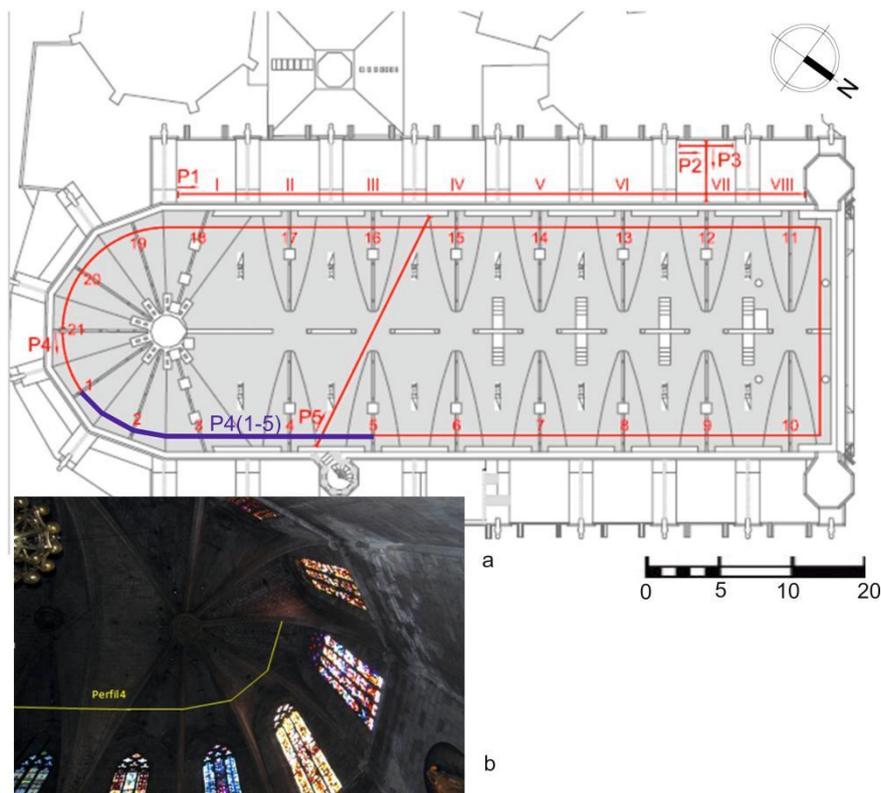


Figura 6. 5: Trazas de radargramas en la cubierta de la basílica de Santa María del Pi (Barcelona). a) Plano en planta y posición del perfil P4 utilizado para ilustrar el procesado de radargramas; b) Fotografía interior de la cubierta con el perfil P4 proyectado.

El procesado de los registros obtenidos fue realizado con el programa ReflexW ® y consistió, básicamente, en la aplicación de una secuencia de filtros. Los filtros utilizados en este caso de estudio fueron: filtro paso banda con frecuencias de corte entre 5MHz y 20MHz; filtro Substrating Average con un promediado de 10 trazas; filtro Background Removal y filtro de Ganancia manual ajustado a 4 puntos.

Adicionalmente, y debido a la irregularidad de la superficie de la cubierta, se aplicó una corrección topográfica a los registros correspondientes a los perfiles de cubierta. Para ilustrar el tratamiento aplicado a los radargramas, se ha escogido, a modo de ejemplo, un tramo del perfil perimetral P4 cuya posición se detalla en la Figura 6.5.

En la Figura 6.6 se sintetiza, sobre el tramo del perfil P4 seleccionado, el procesado aplicado a los radargramas y la posterior corrección topográfica.

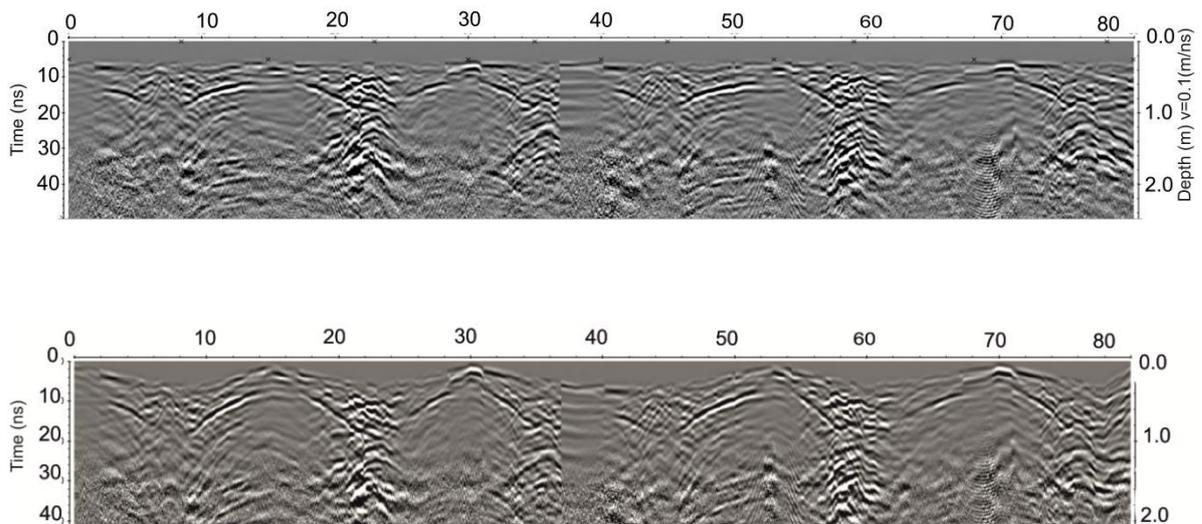


Figura 6. 6: Sección del perfil P4 seleccionado para ilustrar el procesado de radargramas a) Radargrama procesado; b) Corrección topográfica aplicada al radargrama,

6.3.2 Sísmica Pasiva (método del cociente espectral H/V)

Se propone este ensayo por ser uno de los métodos más rápidos y económicos para determinar las propiedades dinámicas de un suelo, consiste en determinar el factor de amplificación y la frecuencia dominante (o periodo del terreno), a partir de la detección de micro temblores producto de acciones naturales y humanas que inducen vibraciones al suelo. Sus resultados son expresados a través de un parámetro llamado H/V, que expresa la relación de amplificación que sufren las ondas sísmicas entre sus componentes vertical y horizontal al ascender a la superficie producto de la reducción de la velocidad de propagación de las ondas y la densidad del suelo,

Este fenómeno de amplificación dependiente de las propiedades geotécnicas del subsuelo y la profundidad del basamento rocoso, denominado efecto de sitio o respuesta del suelo, define las características que tendrá el movimiento sísmico en la superficie del terreno, que es precisamente donde están emplazadas las edificaciones.

El equipo empleado consiste en un Sismógrafo modelo LE-3D 20s de la firma Lennartz Electronic, asistido por un software de análisis de respuesta H/V según el método de Nakamura (1998).

Se han registrado medidas de ruido ambiente en 16 puntos, 10 de ellos situados en el perímetro exterior de la basílica y 6 de ellos en el interior de la misma. La Figura 6.7 muestra la posición, relativa a la planta de la basílica, de los puntos de registro.

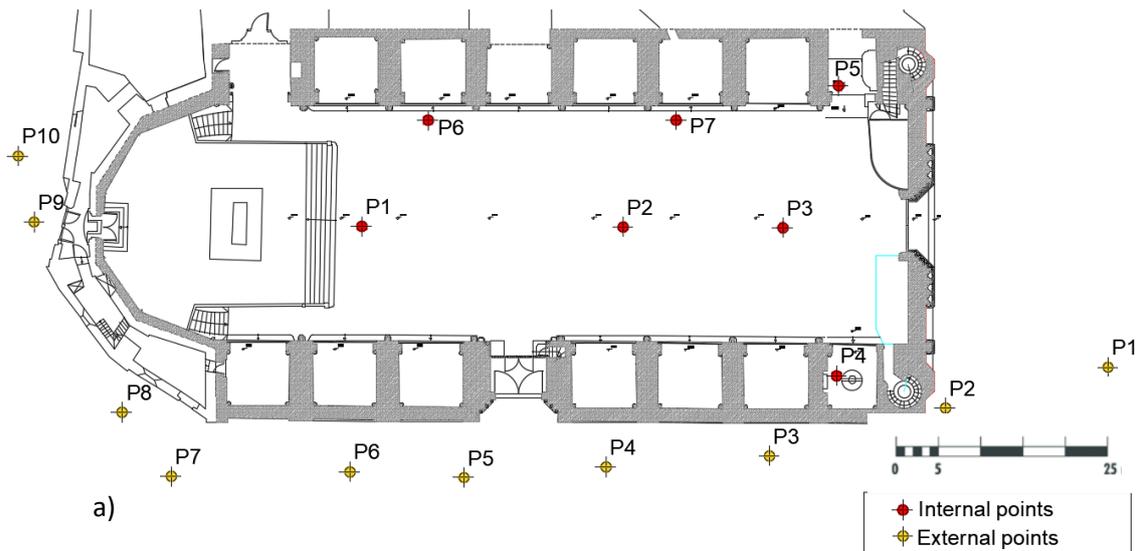


Figura 6. 7: Sísmica pasiva en la basílica de Santa María del Pi (Barcelona). a) Posición, relativa a la planta de la basílica, de los puntos de registro; b) Imagen de los sensores situados en el perímetro exterior (b.1) y en el interior de la basílica (b.2).

El procesado de los registros obtenidos por el método de coeficiente espectral se puede sintetizar en dos etapas independientes:

- Selección de ventanas con ruido estacionario: Se procede a seleccionar, en los registros obtenidos, las partes de la señal (ventanas temporales) que contienen la mayor cantidad de ruido estacionario. En consecuencia, se procede a descartar aquellas secciones de los registros que contienen vibraciones producidas por fuentes

singulares. Se trata de eliminar del análisis las partes de las señales generadas por fuentes antropogénicas tales como tráfico de vehículos en el entorno del lugar de medición y tránsito de peatones entre otros. Estas fuentes pueden alterar el contenido frecuencial de los registros y distorsionar el valor del periodo fundamental medido.

- Evaluación del cociente espectral: Con los registros procesados tal y como se describe en la etapa anterior, se procede a la evaluación del cociente espectral a partir de las ventanas de las señales seleccionadas en la etapa anterior.

Con la selección de registros conteniendo, básicamente, ventanas temporales con vibraciones estacionarias, se calcula la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical por separado. Adicionalmente, con la misma selección de registros, se evalúa la razón entre las componentes horizontales combinadas y la vertical. Posteriormente, las razones espectrales se suavizan mediante un filtro triangular de 0.2 Hz.

Una vez finalizado el análisis de las ventanas temporales por separado, se evalúa, para cada una de las frecuencias consideradas en el cálculo de los espectros, el valor medio y la desviación estándar de la razón espectral calculada entre las componentes horizontales combinadas y la vertical. Estos estadísticos se evalúan sobre la muestra formada por los registros de todas las ventanas temporales seleccionadas.

6.4 Discusión y análisis de resultados

6.4.1 Análisis de la cubierta

Los registros GPR obtenidos en la cubierta son capaces de detectar anomalías producidas en el vértice de cada tramo de bóveda. Estas reflexiones se asocian al remate del cierre de las bóvedas en los nervios secundarios. En la Figura 6.8 se muestran los registros en los que ha sido posible identificar los elementos arquitectónicos principales para una bóveda específica.

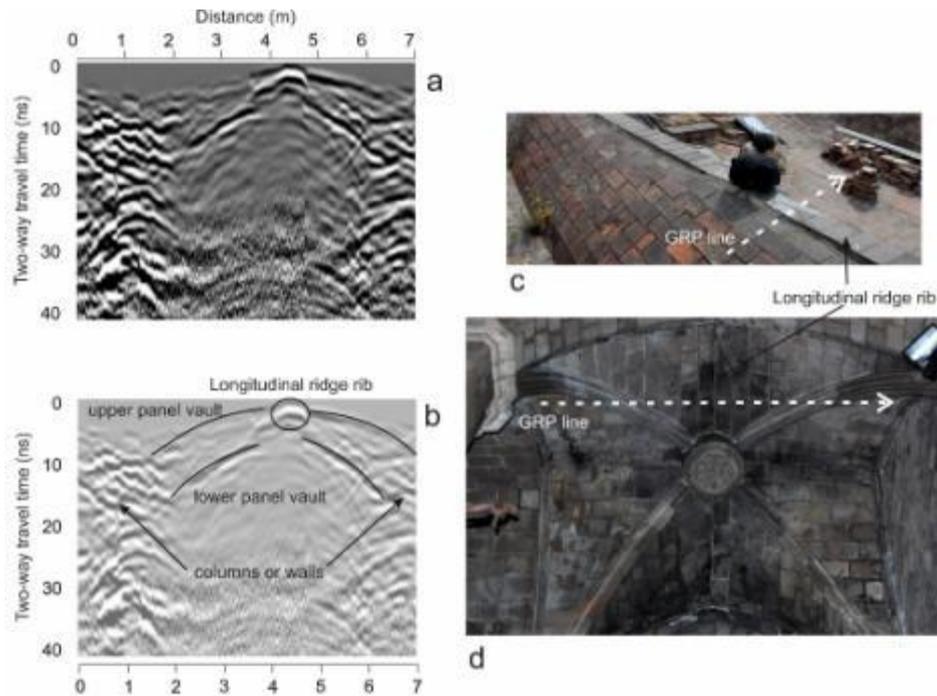


Figura 6. 8: Reconocimiento de elementos arquitectónicos detectados en los registros. a) Registro de radar procesado mostrando un tramo del perfil P4; b) Interpretación del registro mostrando las principales anomalías asociadas a elementos arquitectónicos; c) Situación del perfil sobre la cubierta; d) Bóveda vista desde el interior de la basílica.

La reconstrucción de la cubierta a partir de datos de los perfiles de radar permite corroborar la geometría de las bóvedas (ver Figura. 6.9).

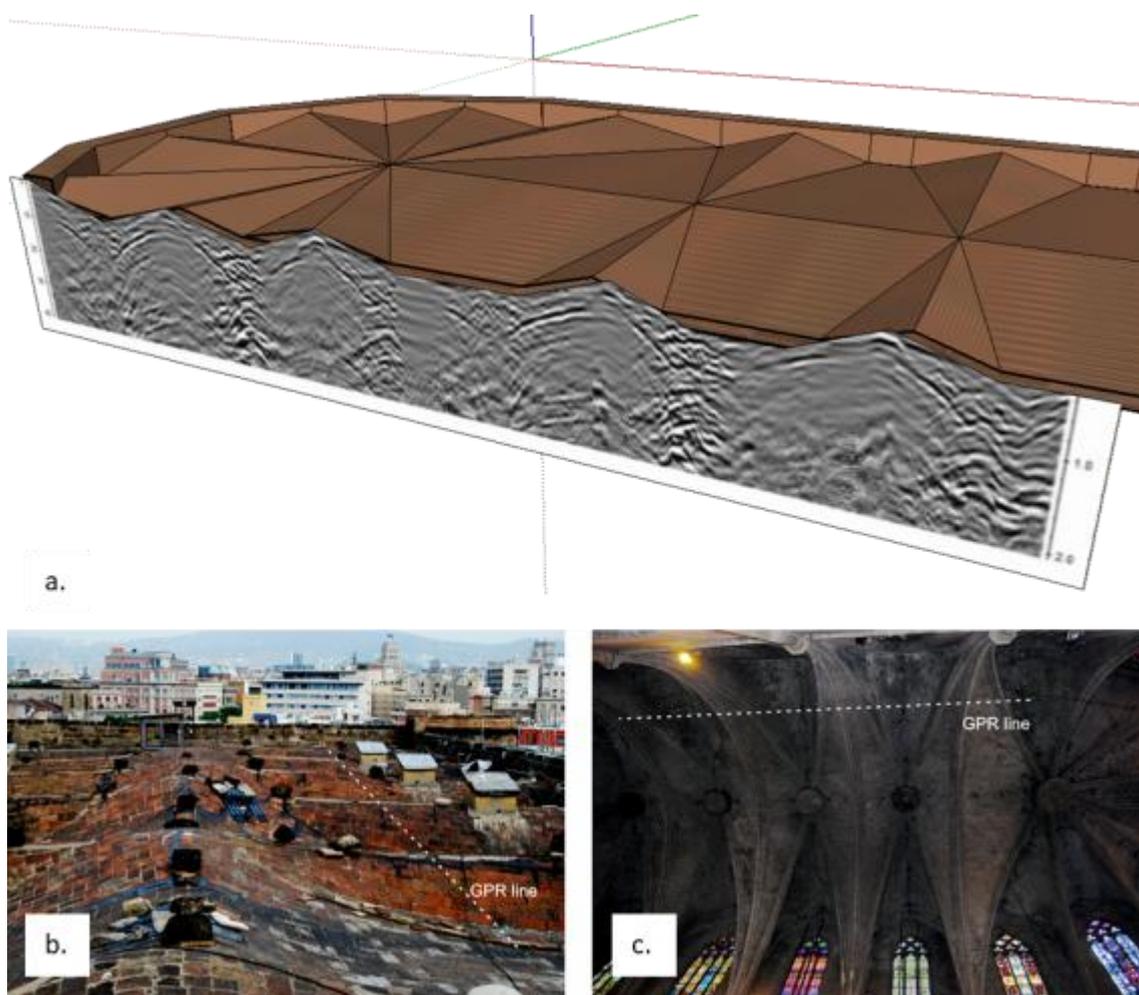


Figura 6. 9: Prospección GPR de la cubierta de la basílica de Santa María del Pi (Barcelona): a) Geometría de la cubierta modelada a partir del procesado de radargramas; b) Fotografía de la superficie de la cubierta. c) Fotografía de la cubierta vista desde el interior de la basílica. La línea blanca muestra la posición aproximada del perfil de radar efectuado sobre la superficie de la cubierta.

6.4.2 Identificación de patologías en la cubierta

En la cubierta, se pueden identificar dos tipos de patologías cuyo patrón se repite en cada cruce de bóvedas. Constructivamente, el volumen situado en estos cruces de bóveda se rellenaba con restos de obra con material fragmentado aprovechado para rellenar el volumen y levantar la cubierta para conformar una superficie relativamente plana y transitable. Las anomalías que se corresponden con estos rellenos pueden observarse sobre el perfil 4 mostrado en la Figura. 6.10. en la que se han identificado como: A1, A2, A3 y A4.

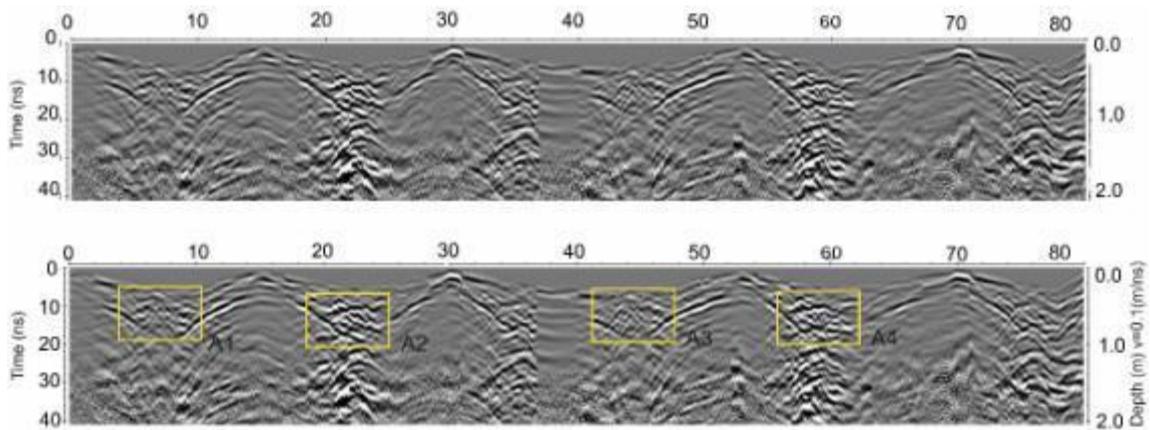


Figura 6. 10: Sección del perfil P4 registrado en la cubierta de la basílica. Identificación del material de relleno en la intersección de las bóvedas (Anomalías A1, A2, A3 y A4).

Comparando las imágenes, las anomalías A1 y A3 presentan características similares. Las imágenes son ligeramente difusas si se comparan con las anomalías A2 y A4, en las que la señal parece intensificarse y mostrar un contraste mayor. Esta diferencia podría ser un indicador de una patología particular. Estas cuatro anomalías se pueden reducir a dos diferentes imágenes tal y como se muestra en la (ver Figura 6.11).

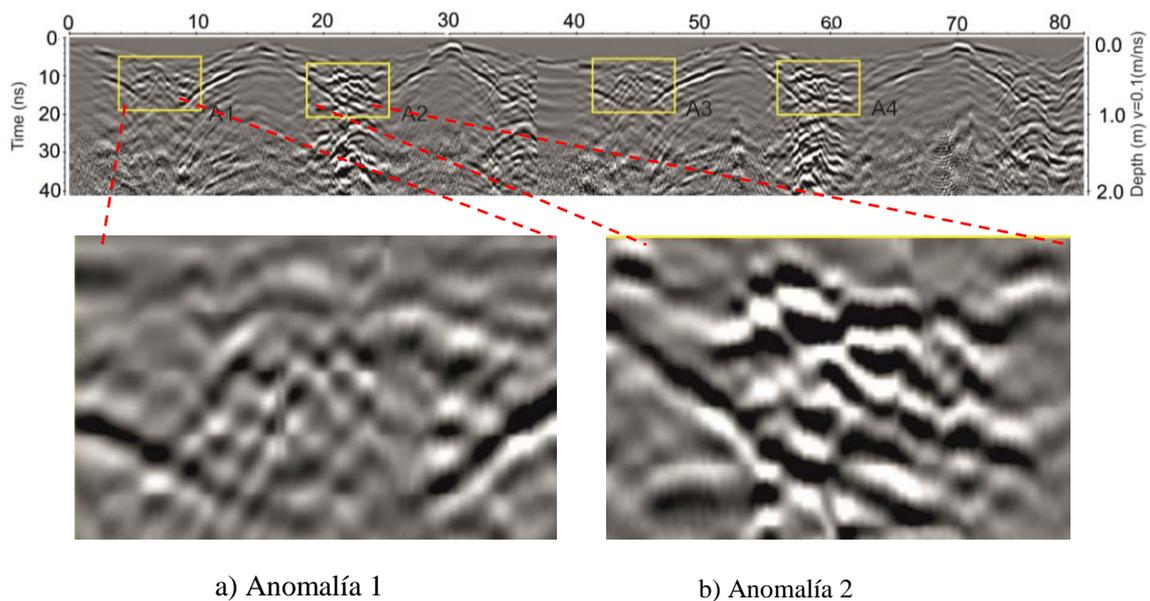


Figura 6. 11: Sección del perfil P4 registrado en la cubierta de la basílica. Detalle de las diferencias entre las imágenes ampliadas correspondientes a las anomalías A1 y A2 detectadas en el perfil P4.

El comportamiento de la señal es diferente en los dos casos, la anomalía A1 parece indicar la presencia de material fragmentado, donde las hipérbolas visibles indican una fragmentación o un relleno granular. La anomalía A2, muestra el mismo efecto, pero con un notable incremento de contraste. Se observa, en la anomalía A2, un claro aumento en la amplitud y cambios de fase, lo que indica un cambio en las propiedades del material.

Para una mejor interpretación de estas diferencias, se expone un análisis comparativo de las amplitudes correspondientes a las trazas de las dos anomalías A1 y A2 (ver Figura 6.12).

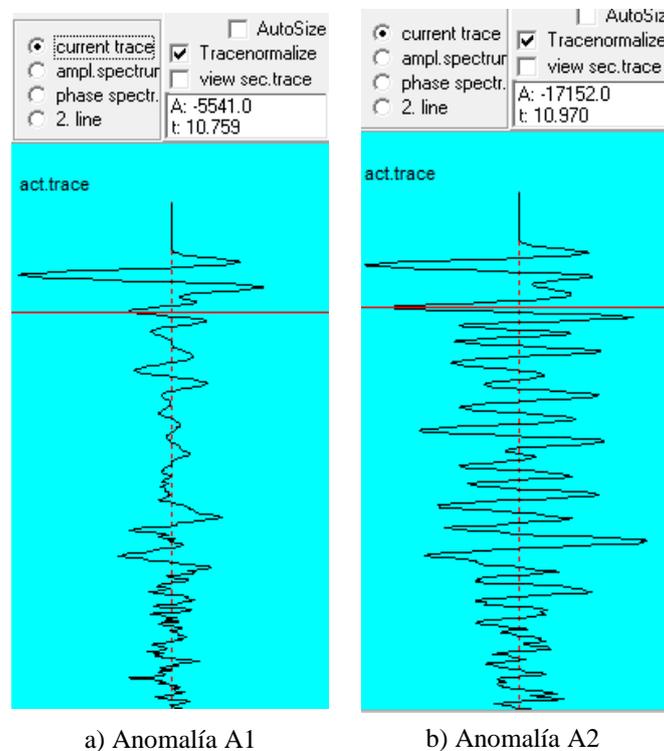


Figura 6. 12: Comparación de amplitudes correspondientes a las trazas de las anomalías A1(a) y A2 (b).

Analizando las dos trazas (A-scan), en la anomalía A2 se observa una amplificación significativa de la amplitud. Para explicar esta diferencia se plantean dos hipótesis:

Hipótesis 1, Presencia de humedad. Si todos los espacios situados entre bóveda y cubierta fueron rellenos irregularmente con fragmentos del mismo material con el que han sido construidas dichas bóvedas, el efecto de amplificación de la

amplitud se podría deber a un cambio en las propiedades dieléctricas causado por la humedad.

Hipótesis 2, Diferencias en los materiales de relleno. El relleno entre bóveda y cubierta fue realizado con un material distinto al de la bóveda. Un aumento de amplitud puede deberse a una disposición de capas sucesivas de diferentes materiales. (Maierhofer et al., 2001; Solla, et al., 2011).

Un análisis más detallado permite apreciar que las anomalías de tipo A2 se sitúan en la parte baja de las bóvedas. Efectivamente, si se representa en planta la ubicación de estas anomalías (ver Figura. 6.13), se observa una correspondencia con algunos de los puntos bajos de las bóvedas.

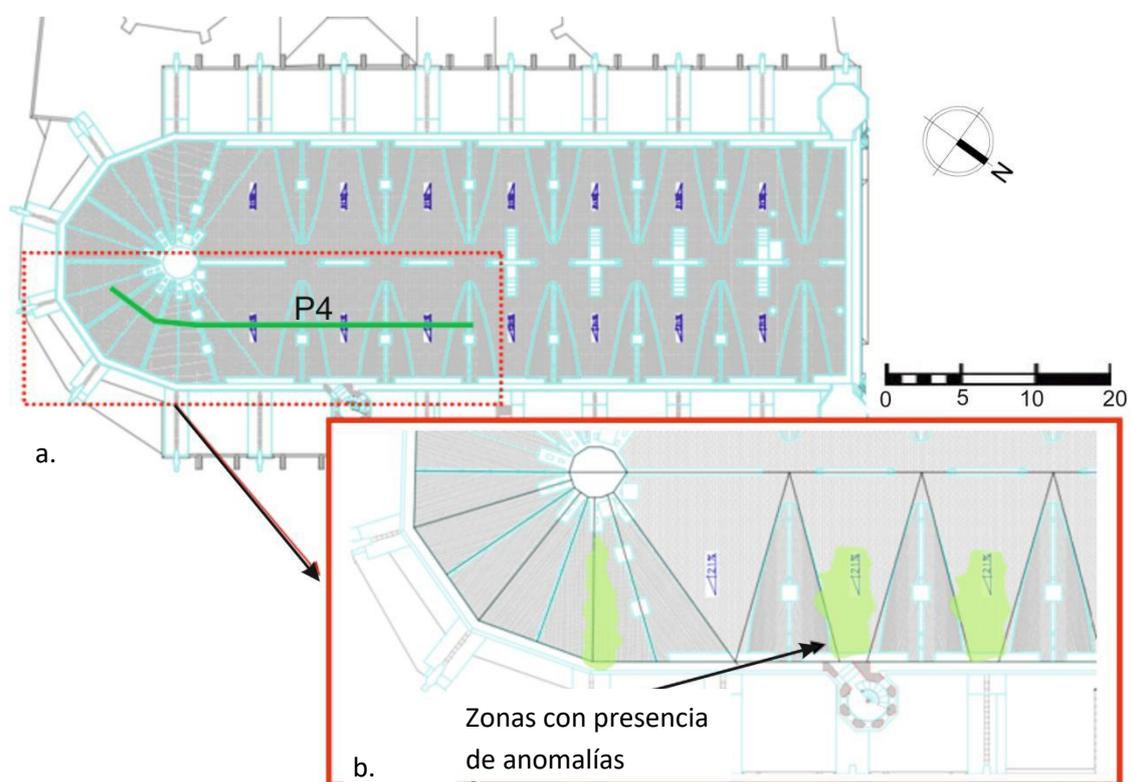


Figura 6. 13: a) Ubicación del radargrama P4 sobre la planta de la cubierta de la basílica de Santa María del Pi; b) Ampliación de la zona de anomalías de tipo A2.

Las anomalías están cercanas a algunas bajantes de agua (ver Figura 6.13 b), este hecho corrobora la validez de la hipótesis 1, debido a que es común la saturación de agua en zonas donde existen taponamientos de los conductos verticales de drenaje y el alto

contenido de agua puede generar la alteración de las propiedades electro magnéticas del material, tal y como muestra el A-scan de la anomalía A2 (ver Figura 6.12).

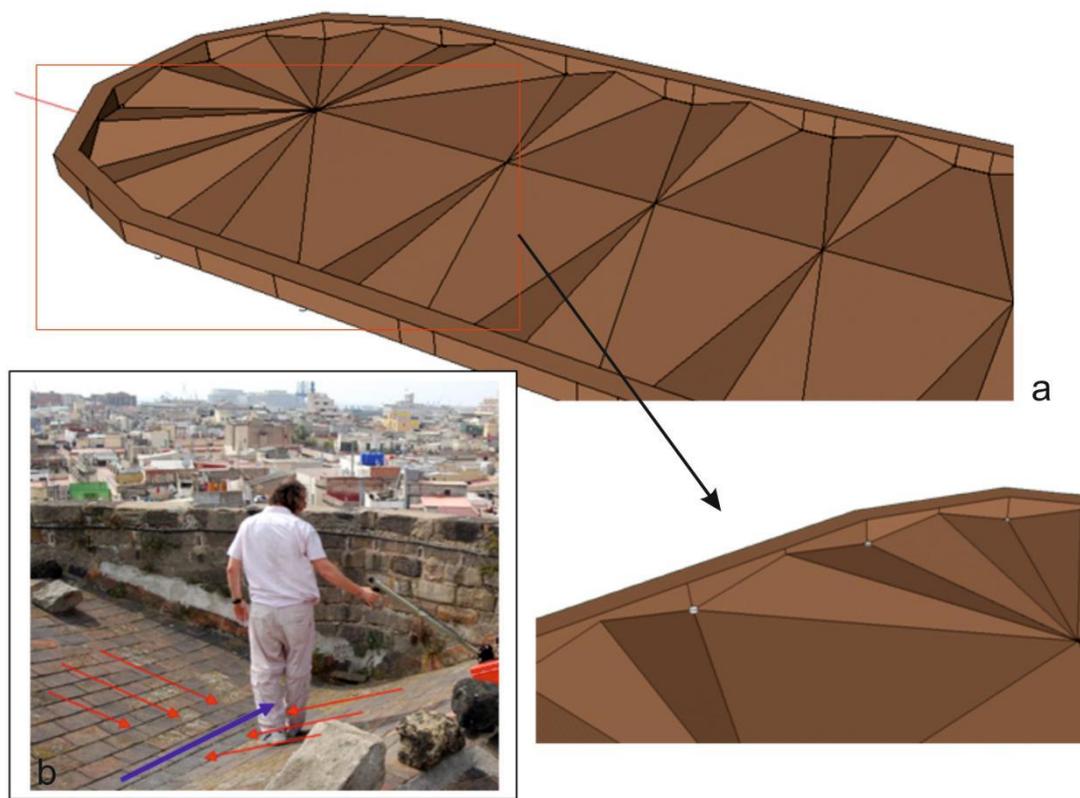


Figura 6. 14: Cubierta de la basílica de Santa María del Pi (Barcelona). a) Representación 3d de la cubierta con los puntos de drenaje, b) Sistema de drenaje de la cubierta.

6.4.3 Caracterización del suelo a partir del análisis de cocientes espectrales

La metodología basada en los cocientes espectrales (Nakamura, 1998), aplicada sobre un conjunto de registros de ruido ambiente obtenidos en 16 puntos situados en la base de la basílica (10 puntos situados en el perímetro exterior de la basílica y 6 puntos en el interior), permite caracterizar el suelo sobre el que se apoya la basílica. Los resultados muestran una variabilidad lateral en los máximos de resonancia. Este cambio podría ser un indicador de la presencia de diferentes estratos en el suelo de estudio.

Los gráficos muestran predominantemente puntos de terreno con periodos próximos a 0.1 s, con valores de relación H/V comprendidos entre 1 y 2. Así mismo existen otros puntos del terreno con periodos próximos a 1.0 s, con valores de relación H/V comprendidos entre 2 y 4, cuya interpretación está en función a la información que proporcionan los gráficos de la figura 6.15.

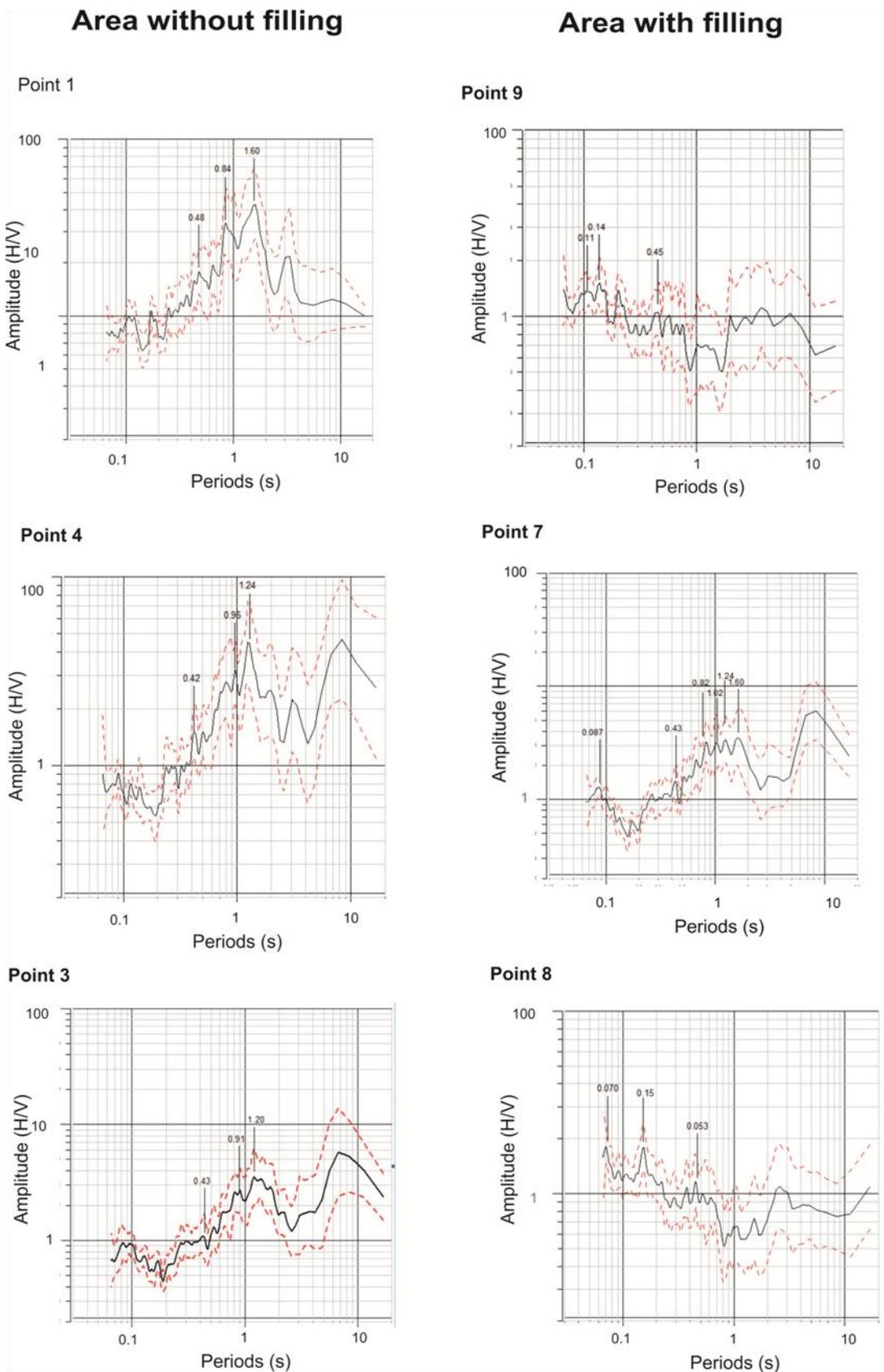


Fig. 6.15. Resultados del ensayo de Nakamura de los puntos más representativos

Son gráficos en amplitud de la relación H/V y dominio temporal, producto de procesado matemático de datos en dominio temporal mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) en un conjunto de ventanas temporales. La línea H/V=1 representa un límite inferior bajo. Las líneas superior e inferior de color rojo punteado limitan el rango de amplitudes máximas y mínimas, para desestimar fallas en la toma de datos por el instrumento, eventos sísmicos intrascendentes o ruidos (Peterson 1993).

Se toman en cuenta tres o cuatro picos de los cuales se calcula un valor medio que determina dos valores. Un valor de periodo T, que representa en periodo fundamental del terreno en el punto de estudio, una amplitud de la relación H/V que determina el valor de amplificación que la onda sufre en su tránsito a la superficie, valor que puede servir para determinar; La velocidad de onda, el espesor del estrado o estratos que existen en el subsuelo, el número de superficies de impedancia que se generan por cambios de propiedades mecánicas de los diferentes estratos, que atraviesa la onda en su recorrido.

Existen dos tipos de suelos con diferentes propiedades mecánicas en calidad, coincidentes con la geología del terreno. Ambos generan diferentes grados de amplificación superiores a la unidad, que significa que no se encuentran sobre un basamento rocoso. Sus periodos fundamentales varían en un rango de 10s, que representa una gran diferencia en calidad de ambos suelos.

Cada punto de registro fue restituído sobre el plano en planta de la basílica, junto a los valores de los períodos predominantes estimados a partir de las mediciones de ruido ambiental. Esto ha permitido identificar las áreas que contienen material de relleno y separarlas de las zonas de terreno más firme y exento de rellenos (ver Figura 6.16).

El mapa muestra que la mayor parte de la basílica está construida sobre terreno firme, a excepción de un sector, que corresponde a la esquina norte, y otras dos áreas muy reducidas, situadas en el interior de la basílica, y en las que se estima que el material de relleno es predominante.

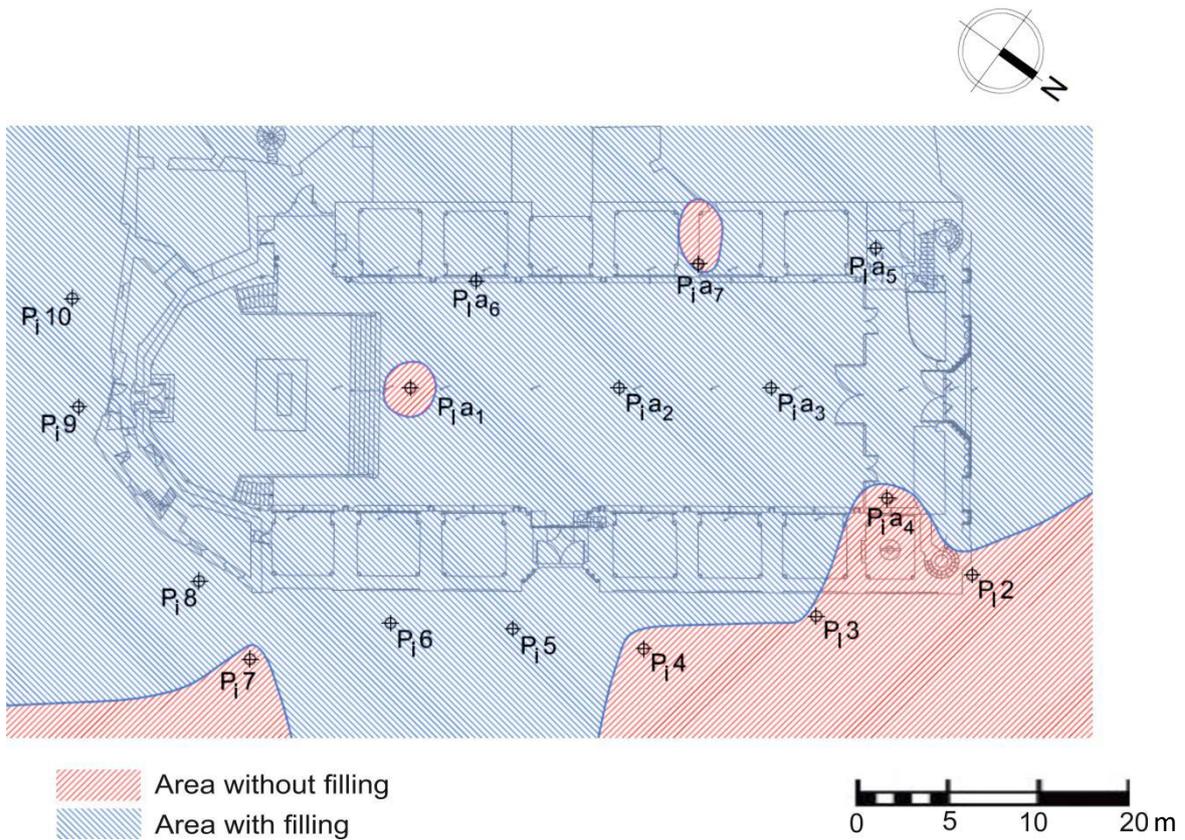


Figura 6. 15: Resultados del método del cociente espectral H/V aplicados al suelo bajo la basílica de Santa María del Pi (Barcelona). Plano en el que se distinguen las áreas de terreno firme respecto de áreas con terreno de relleno.

6.5 Conclusiones

En el caso de estudio presentado, se han utilizado dos tecnologías no invasivas y no destructivas diferentes, el radar de subsuelo y la sísmica pasiva, aplicados a la cubierta (GPR) y al subsuelo (cociente espectral H/V) sobre el que se asienta la basílica de Santa María del Pi (Barcelona). El objeto de este estudio es señalar daños y problemas e identificar patologías y causas compatibles con aquellos.

El análisis con radar llevado a cabo sobre la cubierta ha detectado anomalías en las zonas que coinciden con cambios de pendiente. Estas zonas son áreas de transición entre bóvedas consecutivas. El análisis del radargrama 2-D correspondiente al perfil P4, que es uno de los más representativos de las bóvedas de la nave central, permite observar la presencia de dos tipos de anomalías, que denominamos anomalías A1 y anomalías A2, asociadas a rellenos entre bóvedas. Comparada con la anomalía A1, la traza de la anomalía A2 presenta un incremento de amplitud significativo. Esta medida, que traduce la existencia de un incremento de energía en la onda electromagnética que se propaga, es compatible con cambios en las propiedades del medio causados por la presencia de huecos y un incremento en el contenido de agua infiltrada en el medio. Constructivamente, las cubiertas eran estructuras aligeradas con rellenos cerámicos que, simultáneamente, eran empleados para nivelar el suelo de las azoteas. Los drenajes de aguas pluviales se situaban en las partes bajas de la azotea en coincidencia con las transiciones entre bóvedas. Los radargramas obtenidos en la cubierta indican que existe humedad en el material de relleno. Esto significa que existen filtraciones de aguas de origen pluvial que alcanzaron el material de relleno. Probablemente, la obturación de bajantes de pluviales es la causa de esta acumulación de agua. Los resultados de la prospección radar permitieron identificar la humedad en los rellenos y localizar sobre un plano las áreas afectadas. Este resultado ha facilitado la reparación de estas zonas y el saneamiento de los bajantes colmatados.

El método del cociente espectral H/V, ha ayudado a identificar la causa del problema de los agrietamientos en el terreno y partes del suelo de la basílica y fisuras que aparecen en la parte inferior de algunos muros. La variabilidad lateral de los máximos de resonancia y su proximidad a los periodos de $T=0.1s$, son indicadores de la presencia de rellenos superficiales. Las diferencias entre períodos predominantes revelan que la geología del sustrato es irregular, indicando que existen zonas en las que se realizaron

rellenos con otros materiales para, de este modo, nivelar la superficie sobre la que se construyó la basílica. Dichos rellenos, no tienen la misma compactación que el estrato natural original, lo que genera pequeños asentamientos diferenciales traducidos en grietas en el terreno, así como en fisuras a baja altura en algunos muros de la basílica.

El mapa de distribución de presencia de rellenos superficiales muestra que la mayor parte del edificio se encuentra en terreno firme. La excepción es la esquina norte de la basílica en la que leves asentamientos del terreno pueden ser la causa de la aparición de fisuras en la parte baja de algunos muros. Otras pequeñas áreas, muy puntuales y situadas en el interior de la basílica, también se asocian a zonas de relleno. No obstante, dada su escasa superficie, estas áreas no representan un problema estructural para la basílica.

La prospección radar y el método del cociente espectral, son técnicas no invasivas y no destructivas que permiten la identificación y localización de patologías de diferente origen en construcciones de nuestro patrimonio cultural. En combinación con otras tecnologías y con el asesoramiento de expertos, estas técnicas facilitan las labores de mantenimiento y reparación. Con una adecuada planificación, estas técnicas permiten detectar el daño en etapas tempranas de modo que los costes de mantenimiento y reparación pueden ser reducidos significativamente.

**CAPITULO 7. CASO DE ESTUDIO:
BASÍLICA DE SANTA MARIA DEL MAR**

7. CASO DE ESTUDIO: LA BASÍLICA DE SANTA MARIA DEL MAR (BARCELONA)

7.1 Introducción

La preservación y el mantenimiento de edificios históricos requieren un conocimiento exhaustivo del proceso constructivo y de las reparaciones previas efectuadas a lo largo su vida útil (Cataldo et al., 2005), datos que en muchas ocasiones no son disponibles debido a la escasa información documental existente de dichos procesos (Roca, 2009).

En esos casos en los que la información disponible sobre el monumento es nula o escasa, se recomienda una combinación multidisciplinar de técnicas de inspección (Martino, 2010, Masini et al., 2011) para mejorar la comprensión general sobre procesos constructivos y de reparación que ha sufrido la estructura. Las características especiales del patrimonio histórico suelen requerir una evaluación no destructiva, limitando las pruebas destructivas a pequeñas áreas (Pérez-Gracia et al., 2013, Van Hemelrijck et al., 2015, Himi et al., 2016, Binda et al., 2000).

En esta parte de la tesis se presenta la evaluación multidisciplinar de la basílica de Santa María del Mar como se realizó en otras edificaciones similares (Pérez-Gracia et al., 2009, Pérez-Gracia et al., 2011), combinando la técnica de GPR (Pérez-Gracia et al., 2015) con tomografía sísmica y con sísmica pasiva (Murcia, 2008, Elyamani et al., 2016) . Las tres técnicas se han aplicado para determinar detalles constructivos estructurales de las columnas y de la cubierta, para analizar su estado de conservación y para estudiar el subsuelo y el suelo de la iglesia. Esta iglesia fue declarada Patrimonio Cultural en 1931, por ser una de las Iglesias góticas más relevantes de la ciudad de Barcelona.

7.2 Basílica Santa María del Mar

La actual basílica de Santa María del Mar, edificada en el barrio La Ribera con apoyo de los feligreses del distrito, fue construida entre 1329 y 1383, bajo la dirección de Berenguer de Montagut y la colaboración de Ramon Despuig (Palet-Martinez, 2011). Tiene la catalogación de Bien de Interés Cultural desde 1931. Durante los siglos XII al XV, el distrito era un área comercial importante, porque muchos comerciantes,

artesanos importantes y nobles menores construyeron sus residencias en zonas aledañas a la Iglesia.

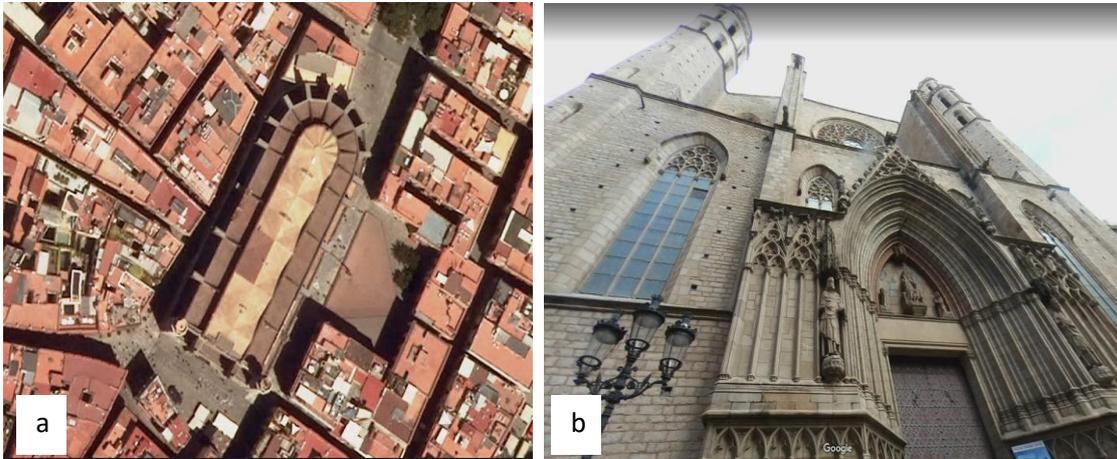


Figura 7.1. (a) Fotografía aérea de la iglesia, en el barrio de la Ribera. (b) Fotografía de la fachada principal.

Algunos autores afirman que el templo actual se construyó sobre una antigua capilla prerrománica conocida como Santa María de les Arenes hasta 1005, año en el que aparece el nombre de Santa María del Mar. En las proximidades de la basílica también se han hallado restos del anfiteatro romano de Barcelona (Sales-Carbonell, 2011).

La basílica ha sido construida en su mayor parte sobre un material de relleno de características heterogéneas y, presumiblemente, también sobre las cimentaciones ya consolidadas de la antigua capilla. Esta diferencia en la cimentación ha podido contribuir al asentamiento diferencial, lo que explicaría algunos de los daños estructurales que se han observado mediante inspección visual.

La iglesia, durante su historia, sufrió, además, daños importantes. En 1397 un incendio destruyó las primeras cuatro bóvedas y varios años después, en 1428, un terremoto con epicentro a unos 100 km de distancia desmoronó el rosetón de la fachada principal, que cayó al suelo matando a varias personas. Más recientemente, en 1936, otro incendio ocasionó daños de relativa magnitud en bóvedas y en algunas columnas.

A pesar de los daños sufridos, tras las reconstrucciones, la basílica es actualmente un claro ejemplo del gótico mediterráneo, con su imponente altura, sus amplias luces de hasta 15 metros y sus esbeltas columnas octogonales (Basegoda, 1989). El interior de la iglesia es un espacio diáfano único, característico de la mayor parte de las estructuras

góticas. La longitud total de la basílica es de 80 m y su ancho de 33 m. Estas dimensiones incluyen la nave central, las naves laterales y las naves de las capillas (Figura 7.2). Sus naves laterales tienen una altura de alrededor de 33 metros, con coberteras planas y contrafuertes lo bastante anchos para sostener el peso de la cubierta, tiene tres naves separadas por las hileras de columnas: una nave central y dos laterales, quedando perfectamente dividida en tres espacios. Las dos naves laterales tienen una anchura algo menor que la central y alcanzan su misma altura. El peso de la cubierta y de las bóvedas se reparte entre unas columnas octogonales muy esbeltas, separadas 15 m entre sí y los muros apoyados en contrafuertes.

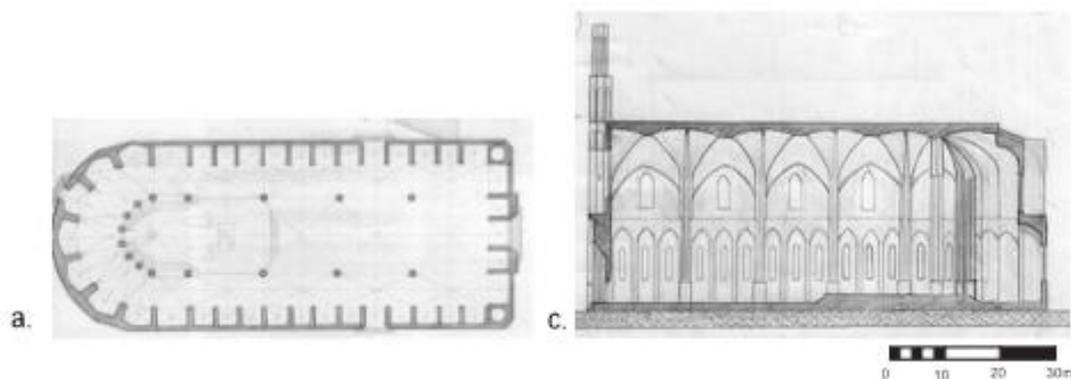


Figura 7.2. (a) *Planta* y (b) *alzado* de la basílica Santa María del Mar. (Herrera, 2012)

Los materiales empleados para su construcción de los cimientos, muros, columnas y bóvedas, son principalmente la piedra de Montjuic, y mortero de cal hidráulica y arena; tiene una cubierta de cerámica y materiales de relleno desconocidos en zonas intermedias no visibles entre la cubierta y la bóveda.

7.3 Métodos de inspección empleados

La inspección del edificio se inició con un reconocimiento visual. A partir de este primer análisis se decidió realizar un estudio de columnas, cubiertas y suelos. También se consideró interesante el determinar las frecuencias fundamentales de los edificios (Murcia et al., 2009).

El estudio de la dinámica de edificios se suele realizar mediante sísmica pasiva, efectuando medidas de vibración ambiental, aunque en ocasiones también se realiza mediante vibración forzada. La gran ventaja de la sísmica pasiva es el bajo coste y la

rapidez en la obtención de datos. Los estudios de vibraciones ambientales se utilizan, entre otras aplicaciones, para el control de la estructura ya construida durante su vida útil. El deterioro de la estructura (debido a daños ocasionados por asentamientos, envejecimiento de los materiales, cambios o reparaciones o bien vibraciones o pequeños sismos) modifica las frecuencias de vibración, por lo que un monitoreo continuado a lo largo del tiempo proporciona información acerca de la evolución de posibles daños en la estructura del edificio (Pérez-Gracia et al., 2013, Espinoza, 1999).

El análisis interno de las estructuras requiere la determinación de posibles daños de sus elementos estructurales. Estos datos pueden obtenerse con diferentes ensayos no destructivos, entre los que se encuentran el radar de subsuelo y la tomografía sísmica. En el estudio de Santa María del Mar se utilizó el radar de subsuelo para analizar la cubierta, el suelo y las columnas. Estas últimas se analizaron también mediante tomografía sísmica. La elección de estos métodos no invasivos se debe a la, una rápida y eficaz adquisición de datos.

7.3.1 Inspección mediante georradar

Para el estudio se utilizaron tres antenas apantalladas diferentes, con frecuencias centrales nominales de 200 MHz, 400 MHz y 900 MHz. La posición de las dos antenas de más baja frecuencia central se determinó a lo largo de cada perfil mediante un odómetro. La posición de la antena de más alta frecuencia se obtuvo mediante marcas cada 5 cm a lo largo de todo el perfil. La adquisición de datos se realizó con una configuración *common offset*, lo que permite obtener registros bidimensionales (*B-scans*) que muestran las anomalías en la señal recibida en un gráfico de tiempos de propagación frente a distancia (equivalente a la posición de la antena sobre el perfil).

Con este método de prospección se realizó el estudio de la cubierta de la iglesia, de las columnas y del suelo.

El objetivo del análisis de la cubierta era determinar las estructuras internas, analizando las dimensiones de cada una y localizando zonas en las que se observaran anomalías compatibles con huecos y daños. Los resultados de este análisis permiten conocer la carga que soportan las columnas con mayor exactitud. Para este estudio se definieron perfiles sobre la cubierta (Figura 7.3).

En esta zona el estudio se realizó utilizando las antenas de 400 MHz y de 900 MHz de frecuencia central. Todos los perfiles de radar para la adquisición de datos se plantearon teniendo en cuenta la geometría de los elementos y la pendiente de la cubierta. Por este motivo se trazaron las siguientes secciones de análisis: siguiendo el perímetro de la cubierta, circundando la estructura cilíndrica sobre el altar, y atravesando la zona que corresponde con la bóveda de las naves laterales y con las capillas. Los perfiles se muestran en la Figura 5.3. La antena de 400 MHz se utilizó en los perfiles del 4 al 10, y la antena de 900 MHz para el análisis de la estructura cilíndrica situada en la intersección de los arcos del deambulatorio (Perfil 3).

El objetivo del estudio de las columnas era determinar su estructura interior y detectar posibles daños internos, sobre todo grietas internas importantes y despegues entre elementos estructurales.

Por este motivo se estudiaron cinco columnas en la nave principal y cuatro columnas en el deambulatorio (Figura 7.3), seleccionadas tras la inspección visual, en la que se observaron elementos externos que podrían estar relacionados con daños estructurales, sobre todo en las bases de las columnas seleccionadas. Para el análisis de las columnas se utilizó la antena de 900 MHz, con una ventana temporal que permitía obtener una penetración media de unos 1,7 m.

En el estudio del subsuelo de la iglesia el objetivo era doble. Por un lado se quería analizar la geología superficial, que habría podido dar lugar a asentamientos diferenciales. Por otro lado, se pretendía analizar la posible existencia de elementos arqueológicos o arquitectónicos bajo el suelo del templo.

Para este estudio se trazaron dos perfiles en la zona del muro frontal, uno dentro y otro fuera de la iglesia (Figura 7.3). Para este último análisis se utilizó la antena de 400 MHz.

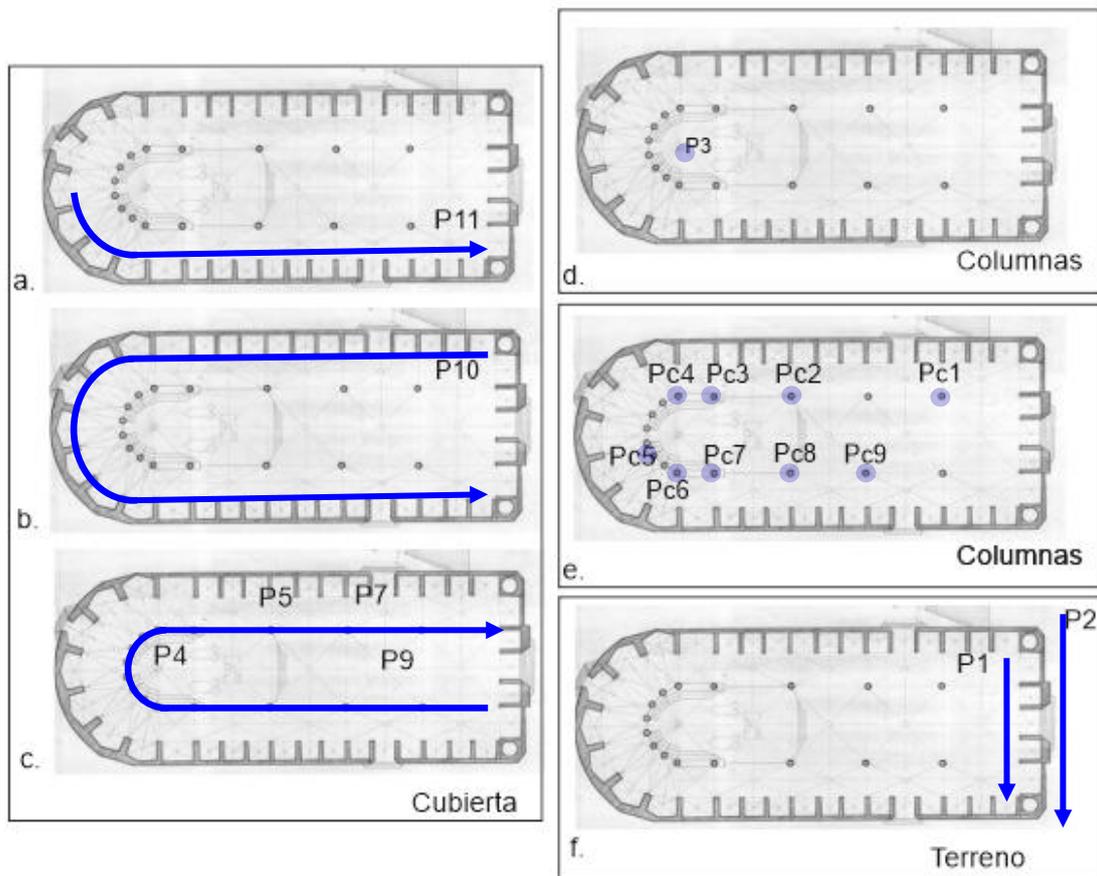


Figura 7.3. Perfiles de GPR: Perfiles y tomografía de columna. a) Perfiles GPR en las capillas de las naves. b) Perfil en cubierta sobre nave lateral. c) Perfiles sobre la nave principal. Perfil alrededor de la estructura cilíndrica resultado de la unión de los arcos del deambulatorio en el techo de la iglesia. e) Columnas evaluadas con perfiles GPR , la columna Pc9 también ha sido estudiada con tomografía, f) Perfiles en el suelo

Los datos adquiridos se procesaron mediante una secuencia de filtros para homogeneizar el origen de tiempos, eliminar ruido debido a clutter y ruido con frecuencias no deseadas, y amplificar la señal. La secuencia de procesado, por lo tanto, incluía los siguientes filtros:

1. Corrección automática del origen de tiempos, situándolo en el origen de la primera llegada en todas las trazas.

El equipo de radar utilizado permite definir automáticamente el origen de tiempos sobre la primera llegada, en un punto que corresponde con el 5% de su máxima amplitud. Tras realizar este proceso se han analizado manualmente cada uno de los *B-scans* para detectar posibles errores puntuales en la posición, que a veces se pueden dar debido a fallos en la adquisición de datos o a cambios

bruscos en la permitividad dieléctrica o en la conductividad de la superficie del medio analizado.

2. Eliminación de ruido de fondo de baja frecuencia debido a la electrónica de la antena mediante un filtro *dewow*.

Este tipo de filtro permite reducir el ruido de frecuencias bajas que se introduce debido a los componentes electrónicos del equipo o a campos de inducción próximos a la zona de estudio. Estas frecuencias suelen afectar a la señal produciendo un desplazamiento de la línea base. Para ello se selecciona una ventana temporal del orden del periodo de la señal, y se aplica a lo largo cada *A-scan*, substrayendo el valor medio obtenido en dicha ventana a la traza.

3. Ganancia basada en la atenuación de la amplitud para amplificar la señal recibida.

Este proceso se utiliza para compensar la atenuación de la señal por dispersión del frente de ondas (considerando la propagación isótropa y, por lo tanto, el frente de ondas esférico) y por absorción del medio. Para aplicar esta ganancia se considera que la amplitud de una onda, a una distancia h de foco emisor depende de la amplitud inicial de la onda emitida, A_0 , de la distancia a la cual se observa, h , y de un factor de absorción debido que depende de las propiedades electromagnéticas del medio, α :

$$A(h) = A_0 \frac{1}{h} e^{-\alpha h} \quad (7.1)$$

Si se considera que la distancia h puede obtenerse a partir de la velocidad promedio determinada para la onda en el medio analizado y del tiempo medido en los radargramas:

$$h = vt \quad (7.2)$$

Se puede compensar el decaimiento de la amplitud multiplicando por una función del tiempo que dependerá de la velocidad estimada y de un coeficiente de absorción de la energía que, en este caso, se ha considerado con un valor medio de 0.2.

4. Filtro pasobanda con frecuencias de corte de 400 MHz y 2.550 MHz y con una banda de paso entre 450 MHz y 2.500 MHz para los registros obtenidos con la antena de 900 MHz.

Mediante este filtro se han atenuado las componentes frecuenciales que quedan fuera de la banda de estudio, que contiene la frecuencia central de la antena. La ventana del filtro pasobanda se suele definir tras realizar la transformada de Fourier de las trazas. Este proceso permite definir el espectro de frecuencias, observando las distintas componentes frecuenciales, de manera que se puede seleccionar la banda de interés y las frecuencias que se deben atenuar porque por su amplitud, pueden afectar a la claridad de la señal registrada.

5. Filtro pasobanda con frecuencias de corte de 10 MHz y 850 MHz y con una banda de paso entre 20 MHz y 800 MHz para los registros obtenidos con la antena de 400 MHz.

7.3.2 Método de Tomografía Sísmica

Para la tomografía sísmica se utilizaron dos acelerómetros B&K 4393 y dos 4384, un martillo instrumentado y un sistema de registro PULSE 3560B - 020. Se aplicó tomografía sísmica a la segunda columna desde la línea izquierda de columnas de la iglesia (marcada con la palabra “Tomo” en la Figura 7.4, por sospecharse que esta columna era la más dañada de la basílica).

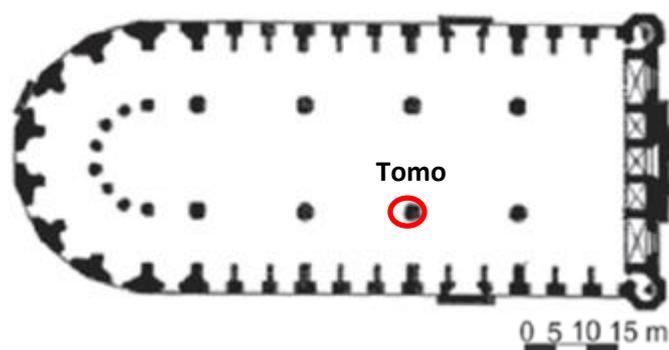


Figura 7.4. Columna evaluada con Tomografía sísmica

Los cuatro acelerómetros se fijaron en la superficie y el martillo golpeó en 32 posiciones, tal como se muestra en la Figura 7.5, para obtener suficiente cobertura y asegurar suficiente resolución para encontrar todas las zonas dañadas.

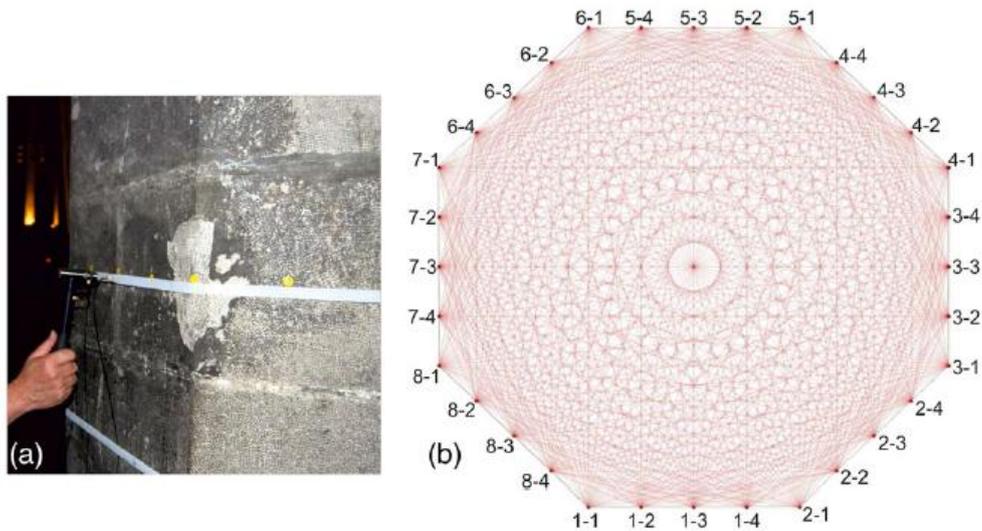


Figura 75 (a) Fotografía de la tomografía sísmica de la columna, (b) Simulación de la cobertura de la columna, suponiendo que es una columna homogénea ideal.

Los datos fueron procesados por un software de análisis de pulsos y la tomografía fue computada con ReflexW one (técnica de reconstrucción iterativa simultánea). La tomografía sísmica se ha aplicado como técnica principal para determinar la configuración estructural y detectar zonas dañadas de la columna.

7.3.3. Método de Sísmica Pasiva

El monitoreo sísmico se llevó a cabo mediante un sismómetro Lennartz LE- 3D / 20s registrado por un sistema de pulsos 3560-B B&K. El sismómetro se ubicó en cada arco, en dos posiciones de la torre y en el piso (Figura 7.6). Los registros duraron 30 minutos para promediar más de 30 espectros individuales por un programa propietario.

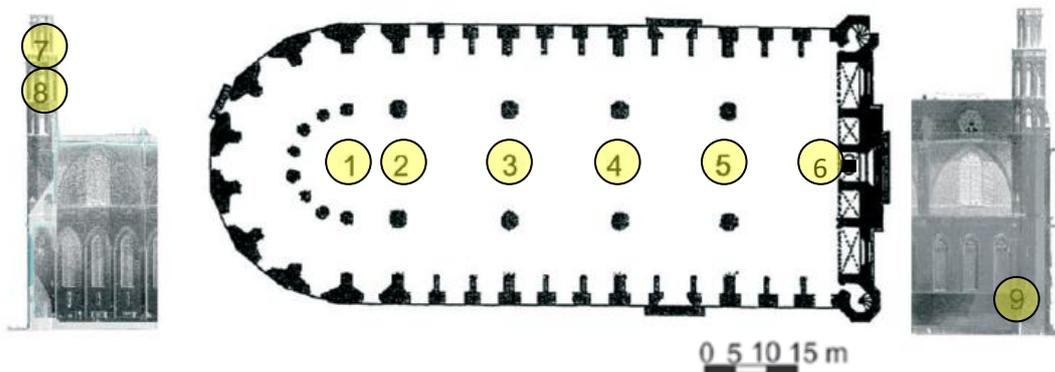


Figura 7.6. Ubicación del monitoreo sísmico (los números indican la posición de los sensores).

La cobertura teórica para los rayos no refractados que viajan desde la fuente (martillo) hasta los receptores (acelerómetros) se muestra en la Figura 7.5.b. Estas trayectorias rectas se pueden determinar resolviendo la Ecuación (7.3):

$$t_i = \sum_j c_{ij} v_i v_j \quad (7.3)$$

Siendo t_i el tiempo de viaje entre la fuente y el receptor medido en el levantamiento, v_i la velocidad de la onda sísmica y x_{ij} la trayectoria de la onda.

Para lograr una cobertura completa de la sección de la columna, se dividió en celdas. Las ondas sísmicas se transmiten y refractan en cada contacto entre células, dependiendo de las propiedades definidas en cada uno de estos elementos. Los resultados se obtienen como la suma de los valores en cada una de las celdas. En el caso de medios no homogéneos, las propiedades de las celdas cambian y la onda sísmica se refracta en las interfaces debido a cambios en la velocidad de onda asociada a celdas adyacentes. Las ecuaciones se resuelven en un proceso computacional iterativo que incluye la curvatura del rayo como consecuencia de las refracciones internas, hasta la convergencia de la solución.

7.4 Análisis de los resultados

Los resultados se presentan y comentan separados por áreas de estudio, comprende: cubierta, columnas y suelo.

7.4.1 Estudio de la cubierta del edificio

El grosor de la la estructura de la cubierta depende de los elementos de soporte: arcos, columnas y bóvedas.

Las bóvedas y los arcos están contruidos con sillares de 20 cm de altura. El menor espesor de materiales en la cubierta se localiza sobre la piedra angular de cada una de las bóvedas. Este espesor se sitúa entre unos 40 cm y 50 cm. Este valor es variable, dependiendo de la situación sobre las bóvedas, pudiendo alcanzar hasta los 70 cm e incluso 100 cm (Roca, 2009). Las dimensiones de esta estructura de mampostería de piedra generan importantes cargas que se transmiten a la cimentación a través de las columnas y de los muros y contrafuertes.

Las esbeltas columnas, que transmiten gran parte de las cargas a los cimientos, soportan cada una de ellas unas 500 toneladas. El esfuerzo de compresión se produce en la base de estas estructuras y puede alcanzar los 3.3 MPa (Murcia-Delso, 2009). Estas importantes solicitaciones pueden ser parte de la causa de los daños observados en las columnas mediante la inspección visual. Para poder determinar si las cargas son del orden estimado, el estudio de la cubierta mediante radar tuvo como uno de los objetivos el análisis de los elementos estructurales internos y su distribución. Los resultados revelaron la ingeniosa solución utilizada para reducir cargas, consistente en el empleo de elementos de cierto volumen huecos.

En general, todas las imágenes de radar obtenidas en la cubierta mostraban cuatro características principales importantes. Un ejemplo de los registros obtenidos es el mostrado en la Figura 7.7. En esta figura es posible diferenciar cuatro zonas o elementos básicos.

El primero de ellos se corresponde con la estructura de los arcos (Zona “A” en la Figura 7.7). Los radargramas muestran varias reflexiones en esas zonas correspondientes con las bóvedas. Cada una de ellas podría corresponder con una capa de mampostería de piedra, de manera que se tendrían tres posibles capas. Se observa en la imágenes de radar que cada una de estas capas presenta un radio de curvatura diferente. La anomalía más profunda puede ser la producida debido a la reflexión de la señal en la clave de la bóveda. Las otras dos anomalías podrían estar asociadas con el intradós curva interior del arco y el extradós (la curva exterior del arco) de los arcos. Los tiempos registrados en los radargramas podrían determinar, de este modo, el espesor de los materiales del arco en cada punto. En general, en esta zona denominada A, se observa una gran uniformidad, lo que indicaría que los materiales en esta zona son probablemente muy homogéneos. Se trataría, seguramente, de la distribución por capas de los sillares, en contacto entre ellos y sin huecos ni material de relleno irregular.

En la zona B se observa, sin embargo, una gran irregularidad en los radargramas. Esta zona es la situada entre los arcos de las bóvedas, y presenta el mayor espesor de materiales. En esta zona se pueden observar unas anomalías pequeñas con forma de hipérbola, distribuidas como formando capas. Estas anomalías sólo son visibles en la parte inferior de la zona B y se presentan situadas en dos o incluso tres niveles diferentes. Se trata de reflexiones producidas en elementos cilíndricos huecos, que se

han utilizado para relleno de estos sectores, reduciendo las cargas que se producirían de haberse utilizado en la construcción elementos macizos como los existentes en la zona A. Elementos similares se han encontrado en las estructuras de otras iglesias medievales, como elemento aligerante, destinado a reducir el peso de las bóvedas

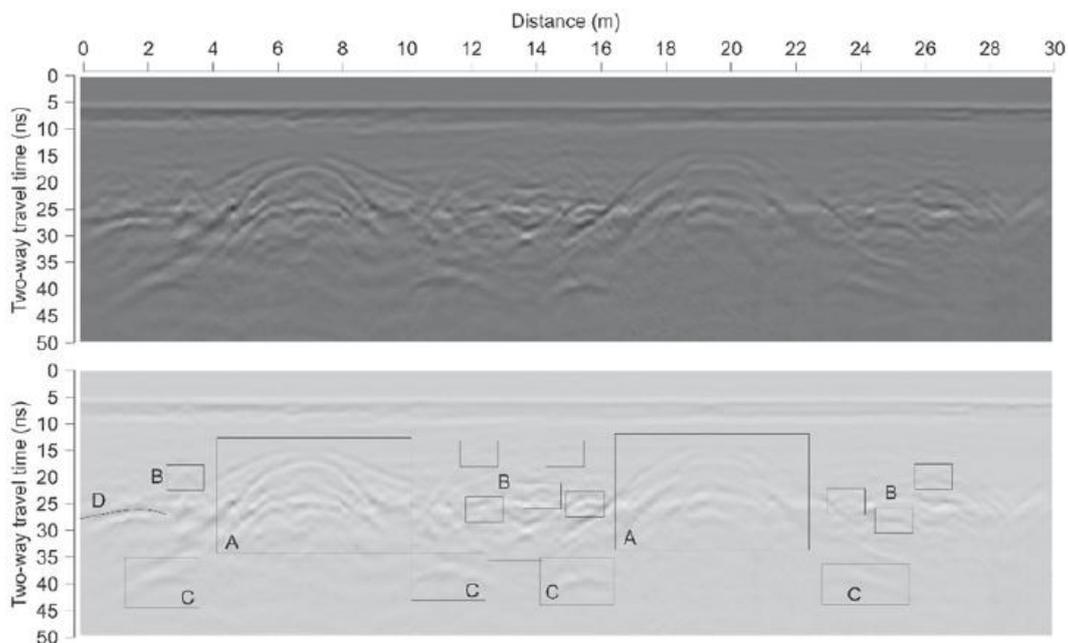


Figura 7.6. Ejemplo de uno de los radargramas obtenidos en la cubierta de la iglesia. Pueden distinguirse cuatro zonas diferentes: A) Zona sobre los arcos en las que se observan las reflexiones producidas en el contacto entre las capas de mampostería de piedra caliza que conforman la parte superior del arco o de la bóveda; B) Zona situada entre cada bóveda y parte inferior de los arcos, en la que pueden verse anomalías diversas de pequeño tamaño, asociadas con materiales irregulares de relleno, y también se observan unas anomalías con forma de hipérbola que se corresponden con elementos cilíndricos huecos utilizados para aligerar las cargas de la cubierta; C) Zona que se corresponde con la unión de las columnas y los arcos, en la que se observa la reflexión producida en los capiteles de las columnas que soportan las bóvedas; D) Zona correspondiente con el contacto entre las bóvedas y los muros de carga, en la que pueden verse anomalías producidas en la reflexión en los materiales homogéneos de los muros.

Sobre estos elementos huecos se encuentra una capa de espesor variable de mortero mezclado con cascotes, que tiene un espesor variable de entre 0,7 m y 1 m, dependiendo del sector estudiado.

La utilización de elementos cerámicos huecos es un recurso conocido para disminuir el peso de las cubiertas en edificios medievales de cierta envergadura, Este recurso está documentado en algunos edificios, y principalmente se utiliza en las bóvedas para disminuir el peso de la cubierta del edificio (Bassegoda, 1989). Esta característica

constructiva es consistente con las imágenes radar registradas, caracterizadas por diversas pequeñas hipérbolas organizadas en capas. La distribución de las anomalías hiperbólicas en los radargramas parece indicar que esos objetos huecos podrían estar colocados a diferentes profundidades, formando dos o más capas, dependiendo del grosor de la estructura en cada punto. Además, los radargramas muestran características similares en distintas zonas de la cubierta, por lo que podrían indicar que esta técnica empleada para reducir cargas se ha utilizado en varias zonas de la estructura de la cubierta y no únicamente en la zona sobre la bóveda central.

Otra zona que se observa en todos los radargramas obtenidos en la cubierta, es la que se denomina C en la Figura 7.7b. Se corresponde con la unión entre arcos y columnas. En esta zona se han registrado hipérbolas debidas a la reflexión de la señal en los capiteles de las columnas que sostienen las bóvedas. Se observa una reflexión central y dos hipérbolas laterales que se habrían generado en las esquinas de los capiteles.

La cuarta zona observada en algunos de los registros es la que se corresponde con la unión entre los muros de carga y los arcos (zona D en la Figura 7.6). Se caracteriza por una reflexión plana y un registro muy homogéneo, que se interpreta como una zona sin elementos heterogéneos de relleno, construida mediante sillares de piedra.

Para poder determinar los espesores de materiales en cada punto, como la superficie del techo no es plana, además de la secuencia de procesado, fue necesario hacer una corrección topográfica. De este modo era posible el obtener con mayor exactitud los tiempos dobles de propagación de cada anomalía en el radargrama, lo que permite determinar con precisión el volumen de material existente en cada zona. La Figura 7.7 muestra una fotografía en la que se puede apreciar la forma de la cubierta y una de las líneas correspondientes a un perfil de georadar. La forma ondulada del techo se corresponde con las diferentes bóvedas del interior de la basílica.

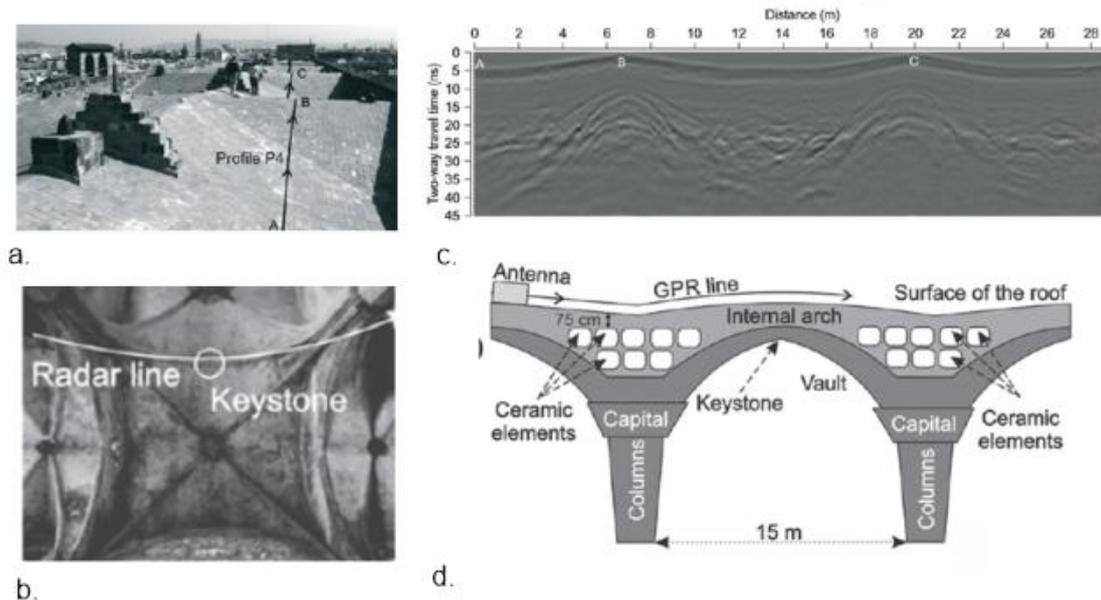


Figura 7.7. (a) Perfil P4 sobre la cubierta. Se puede observar la superficie ondulada debida a las bóvedas interiores. (b) Corrección topográfica de parte del radargrama obtenido a lo largo del perfil P4. Este tramo cruza dos arcos y tres columnas de la basílica.

Los datos estructurales indican que el espesor de la edificación cerca de los muros de carga es de 150 cm (Figura 7.7). En este sector, el tiempo doble de propagación que corresponde con la anomalía asociada a la reflexión en la base es de 20 cm. Con estos datos se obtiene una velocidad media de propagación de unos 15 cm/ns. $(v=d/t=150\text{cm}/10\text{ns}=15 \text{ cm/ns})$. Esta velocidad es superior al valor utilizado o calculado por otros autores en estudios de mampostería de piedra: Van Hemelrijck *et al.* (2015) consideran una velocidad de 10 cm/ns, Hamrouche *et al.* (2009) entre 12 y 13 cm/ns, Pérez-Gracia *et al.* (2000) cerca de 12 cm/ns, (y Leucci *et al.* (2009) entre 9,2 y 11,4 cm/ns. La existencia de elementos de gran tamaño huecos puede ser la explicación del valor tan elevado de la velocidad de propagación. También puede ser debida a que, además de sillares de piedra, hay un relleno importante de mortero. Utilizando esta velocidad, se puede considerar que la profundidad del material sobre la parte superior de las vasijas es de unos 75 cm.

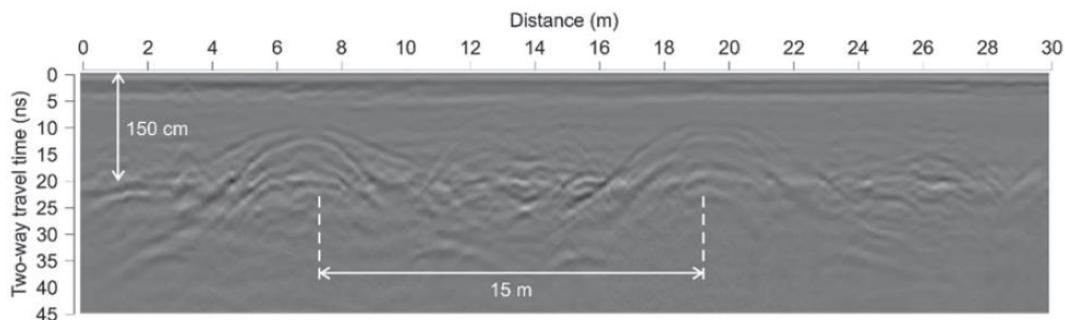


Figura 7.8. El espesor de la estructura de la cubierta en la zona cerca a los muros de carga indica una velocidad de onda de unos 15 cm/ns (asumiendo sillares de piedra y relleno de mortero homogéneo). La distancia entre bóvedas es de 15 m. El espesor del material sobre las vasijas huecas utilizadas para aligerar cargas es de 75 cm.

En la Figura 7.8 se puede apreciar que las zonas con gran cantidad de anomalías se distinguen claramente y corresponden a zonas sobre y alrededor de columnas. Las anomalías irregulares en los datos del radar pueden asociarse a menudo con la dispersión de la onda en elementos heterogéneos o en objetos embebidos en el medio, como es el caso de los recipientes cerámicos.

Hay que remarcar la importancia del uso de estos elementos que disminuyen las cargas sobre las columnas, ya que éstas están separadas unas de otras 15 m y, al mismo tiempo, son muy esbeltas para poder crear el efecto visual de un único espacio diáfano, a pesar de que el interior esté formado por tres naves, como otras iglesias góticas.

En el estudio de la cubierta, cuatro de los perfiles (del P5 a P8 en la Figura 7.3) atraviesan el techo de la nave principal, cada uno de ellos cruzando sobre una columna un arco. La Figura 7.9 muestra los registros obtenidos, en los que se puede observar que aparecen anomalías irregulares en la zona de unión entre la cubierta y las columnas. Se observa también una discontinuidad intermedia que podría indicar que en el sector analizado hay dos capas de sillares

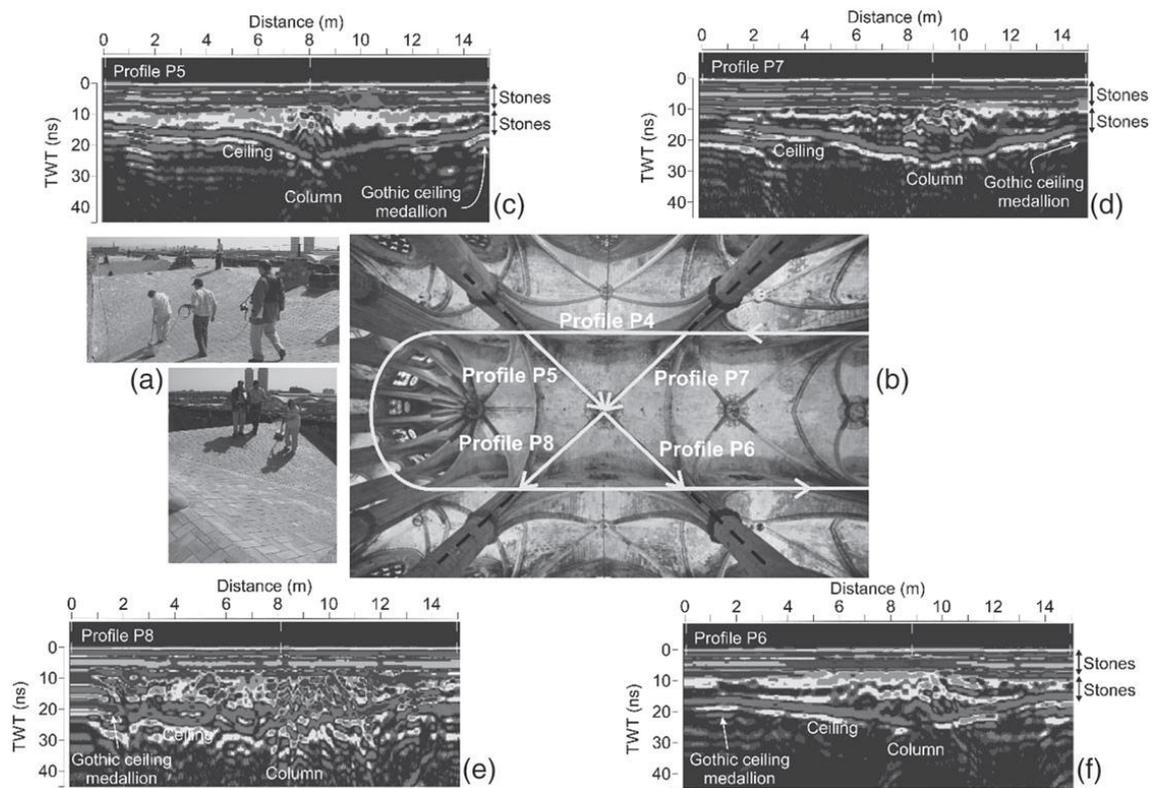


Figura 7.9. a) Adquisición de datos radar en la cubierta situada sobre la nave principal con una antena de 900 MHz., b) Situación de los perfiles sobre el techo. (de c a f) Radargramas obtenidos en los perfiles P5, P6, P7 y P8 respectivamente.

No obstante, el elemento más representativo en este grupo de imágenes de radar es el radargrama obtenido en Perfil.8, la imagen se ve irregular, y que pese a que presenta patrones similares a los otros tres radargramas; la heterogeneidad que aparece en toda la imagen, apunta a una zona aún más deteriorada, o quizás a una zona restaurada que posiblemente utilizo elementos más irregulares de relleno.

7.4.2. Estudio de las columnas

Las columnas estudiadas fueron aquellas que se observaron más dañadas en la inspección visual. Para el análisis se utilizaron dos métodos de estudio: georadar y tomografía sísmica. La Figura 7.10, muestra los elementos analizados con cada uno de estos métodos.

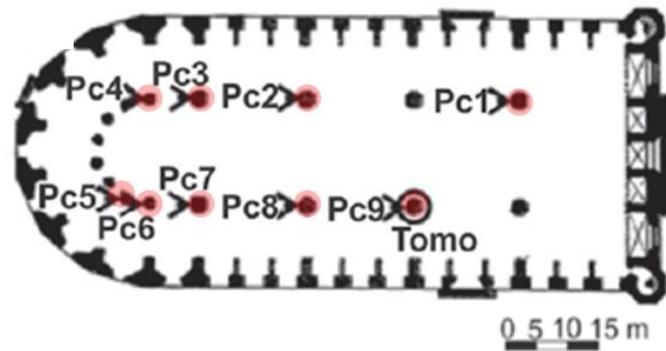


Figura 7.10. La denominación *Pc* corresponde a los ensayos con georadar, y la denominación *Tomo* corresponde a la tomografía sísmica

a) Análisis mediante georadar

Las columnas de la basílica son de planta octogonal, con sillares alternos. Esta técnica constructiva se repite en muchas de las iglesias góticas de Europa, y los registros de radar presentan elementos característicos muy parecidos a los que se observan en / columnas similares de otras iglesias, donde las columnas están compuestas por hileras de sillares regulares (Pérez-Gracia et al., 2008).

En la Figura 7.11 se presenta la adquisición de datos con una antena de 900 MHz mediante el método de *common offset*, los registros obtenidos y la interpretación de los mismos.

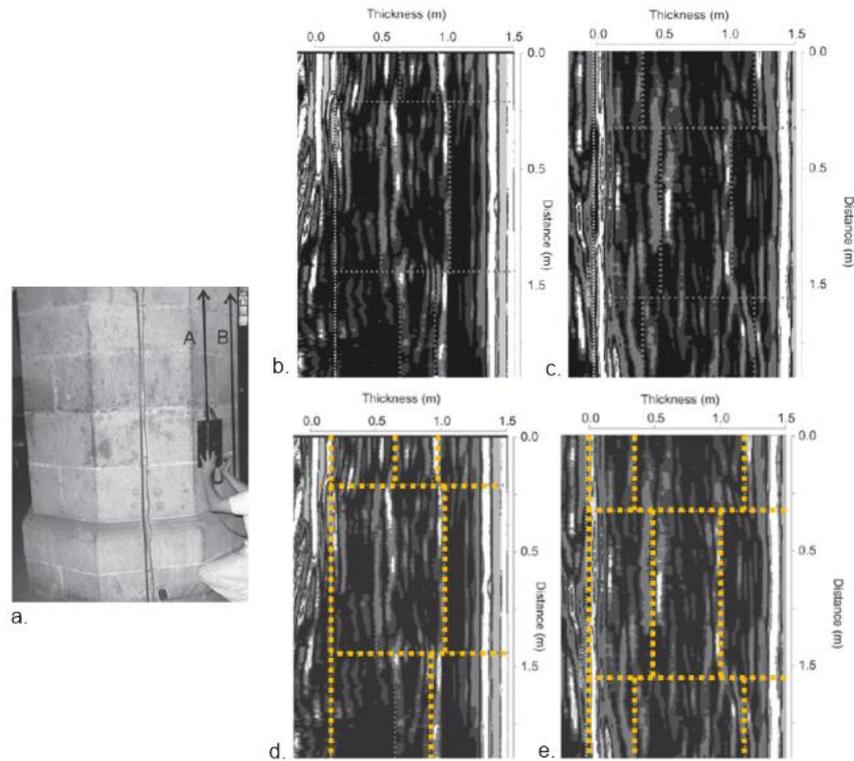


Figura 7.11. a) Adquisición de datos con una antena de 900 MHz y situación de dos de los perfiles sobre una de las columnas. b) Radargrama obtenidos en el perfil A. c) Radargrama obtenido en el perfil B. d) Interpretación de radargrama obtenidos en el perfil A, b) Interpretación de a obtenidos en el perfil A.

En los radargramas obtenidos en las columnas las anomalías debidas a la reflexión de la señal en el contacto entre las piedras son evidentes. La Figura 7.11, muestra la ausencia de otras reflexiones importantes indica que la estructura interior está en buen estado de conservación, sin que se aprecien grietas en la sillería. La geometría de las anomalías indica que las columnas están construidas con grandes piedras talladas, separadas por finas juntas rellenas con mortero (Figura 7.11).

Por otro lado, la Figura 7.12 muestra las diferencias existentes entre los dos registros obtenidos en perfiles paralelos sobre una misma columna. En el perfil A aparece una reflexión menos profunda, mientras que en el perfil B la reflexión es más profunda debido a que el sillar se gira 45° con respecto a la superficie de adquisición del perfil A.

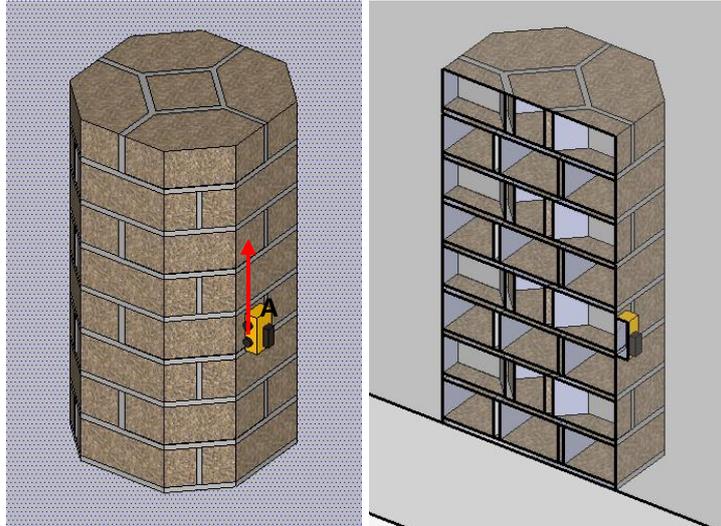


Figura 7.12. Modelo BIM (*Building Information Modeling*) de la columna. a) Ubicación del perfil de georadar, b) Sección de la columna en la línea del perfil, mostrando la posición de la sillería de piedra.

b) Estudio mediante tomografía sísmica

El estudio no destructivo combinando más de una técnica reduce la incertidumbre y permite trabajar con datos complementarios. En este caso tanto la tomografía sísmica como el georadar se utilizaron para determinar la disposición interna de los sillares y sus uniones de mortero, así como para observar la posible existencia de grietas.

La tomografía sísmica permite reconocer la disposición de los sillares debido a que la velocidad de propagación de la onda sísmica en materiales más densos es mayor, de manera que se tiene un contraste entre la velocidad en los sillares de piedra, la velocidad en el mortero y la velocidad en las grietas. De este modo se ha podido obtener una imagen más detallada de la estructura interna de las columnas (Figura 7.13). La velocidad de propagación media en los sillares queda situada entre los 2.500 m/s y los 3.000 m/s. Estas velocidades corresponden a una alta calidad caliza. En las zonas de mortero la velocidad estimada ha sido de unos 500 m/s. Velocidades bajas también se han observado en zonas que pueden estar dañadas.

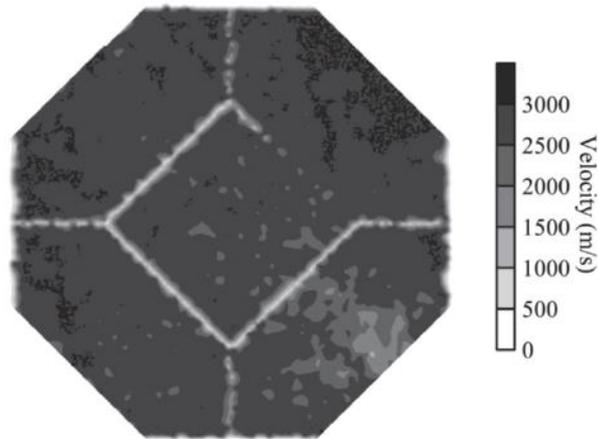


Figura 7.13. Tomografía sísmica de la columna en la iglesia de Santa María del Mar.

La tomografía también revela una zona más profunda, dentro los cuatro sillares, en la que se obtienen velocidades de propagación de la onda intermedias (entre 1.000 m/s y 2.000 m/s). Esta zona más profunda se corresponde con el núcleo de la piedra cuadrada interior (Figura 7.13), que presenta la superficie paralela a la superficie de la columna, mientras que las reflexiones más superficiales corresponden a la piedra girada 45°.

Con esta información se deduce que las columnas han construido a partir de un núcleo central cuadrado que se va rotando 45° de una capa a otra, proporcionando a la columna una gran estabilidad y asegurando la unión de las piezas (Figura 7.14).

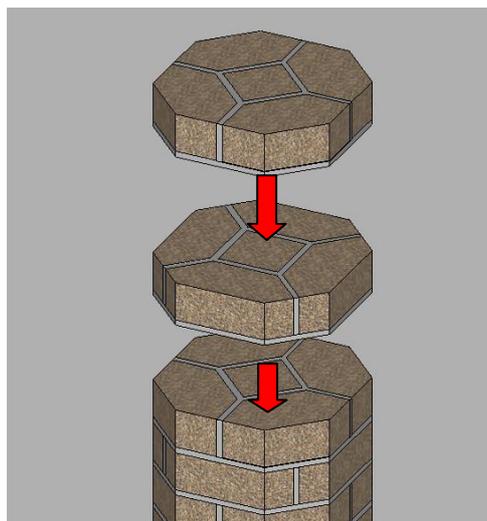


Figura 7.14. Modelo BIM del proceso constructivo de las columnas.

7.4.3. Comportamiento dinámico de la estructura

El comportamiento dinámico se ha analizado mediante medidas de sismica pasiva. El sistema, consistente en medir las vibraciones debidas al ruido ambiente, ha permitido

analizar las frecuencias de vibración, obteniendo una estimación del comportamiento dinámico del edificio. La figura 7.15, muestra la situación de los puntos de medida.

Los resultados de este estudio muestran que la componente transversal presenta una frecuencia con un pico importante a 1.45 Hz. Se observan también otros dos picos de mucha menor amplitud y, por lo tanto, correspondientes a una menor energía, con frecuencias de 3.23 Hz y de 2.70 Hz en el Punto 4 (Figuras 5.6).

Se puede ver (Figura 7.15^a) que la fachada presenta un comportamiento similar al de la nave, comparando los resultados de las medidas en los puntos 4 y 6. En los dos casos se tiene un pico importante a 1.45 s.

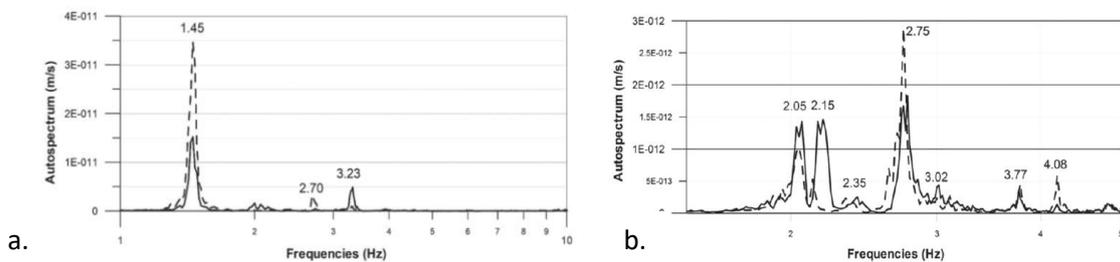


Figura 7.15. (a) Espectro transversal en el punto 4 (línea discontinua) y en el punto 6 (línea continua), (b) Espectros longitudinales en el Punto 1 (línea discontinua) y el Punto 6 en la fachada (línea continua).

El comportamiento longitudinal es más complejo, presentando frecuencias globales de aproximadamente 2.05 Hz, 2.15 Hz, 2.35 Hz, 2.75 Hz y 3,77 Hz. Se ha registrado también una frecuencia local de 4,10 Hz en la zona del deambulatorio; y un valor de frecuencia de 3.02 Hz en la zona de fachada (ver Figura 7.15b).

Los resultados de la fachada y de la torre muestran un patrón similar comparados con la nave principal (Figura 7.16). Sin embargo, el espectro muestra un doble pico característico (Elyamani, 2016). Asimismo, los modos 2.05, 2.35 y 2.75 Hz, en el Punto 7 (Figura 7.16) se transforman de componentes longitudinales a bidireccionales, probablemente debido a alguna asimetría de las torres. Los dibujos de movimiento de partículas para cada modo muestran diferentes comportamientos.

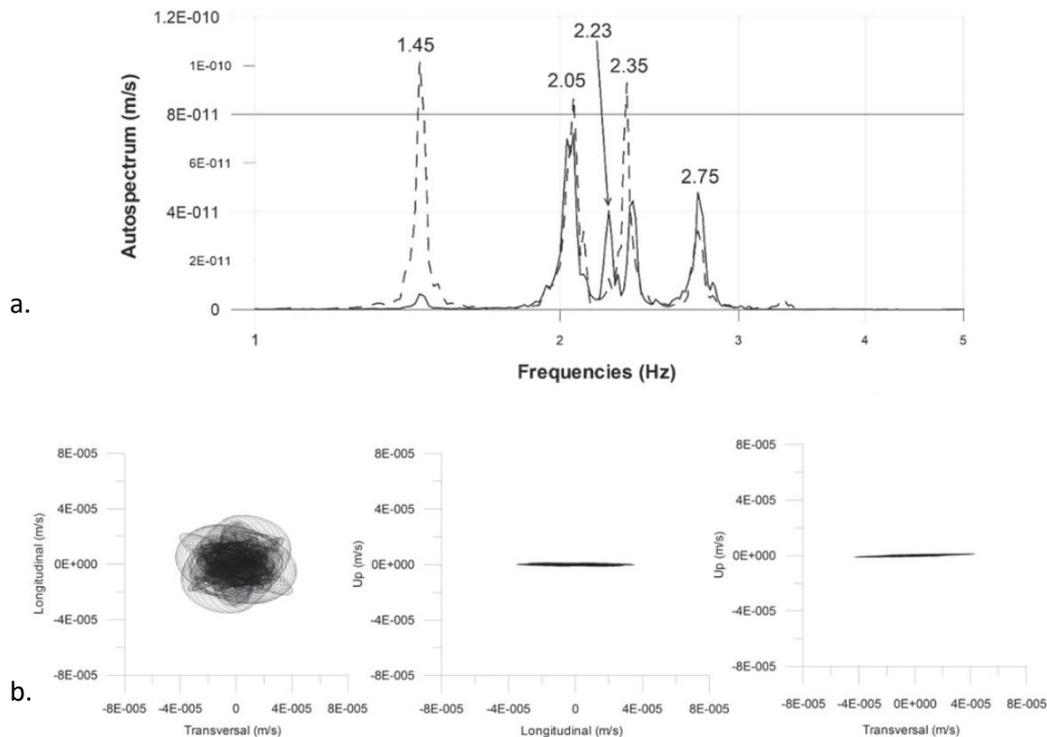


Figura 7.16. (a) Longitudinal (línea continua) y transversal (línea discontinua) en Punto 7 en la torre, (b) Movimiento de partículas del modo de 2,35 Hz en el punto 7 de la torre.

El modo de 2.05 Hz cambia de longitudinal a 70° (en el sentido de las agujas del reloj); los 2.70 Hz cambian a 45° (en sentido opuesto a las agujas del reloj), y los 2.13 y 2.75 Hz cambian al modo de torsión.

El sensor de suelo detecta un suelo muy suave con frecuencias entre 0,38 y 0,72 Hz, estos valores son muy comunes en suelos de relleno; las frecuencias de la estructura no se detectan en el piso (dentro de la iglesia), a pocos metros de las columnas y muros.

7.4.3. Estudio de subsuelo de la basílica

El subsuelo superficial bajo la basílica se analizó utilizando un georradar con una antena de 200 MHz de frecuencia central. Los perfiles se trazaron junto a la fachada principal, tanto en el interior como en el exterior de la iglesia. Las imágenes de radar obtenidas frente a la fachada principal revelan la posible existencia de una losa enterrada (Figura 7.17).

Por el exterior de la edificación, los datos de radar adquiridos frente a la basílica también contienen algunas anomalías posiblemente asociadas a restos de antiguos muros (Figura 7.18).

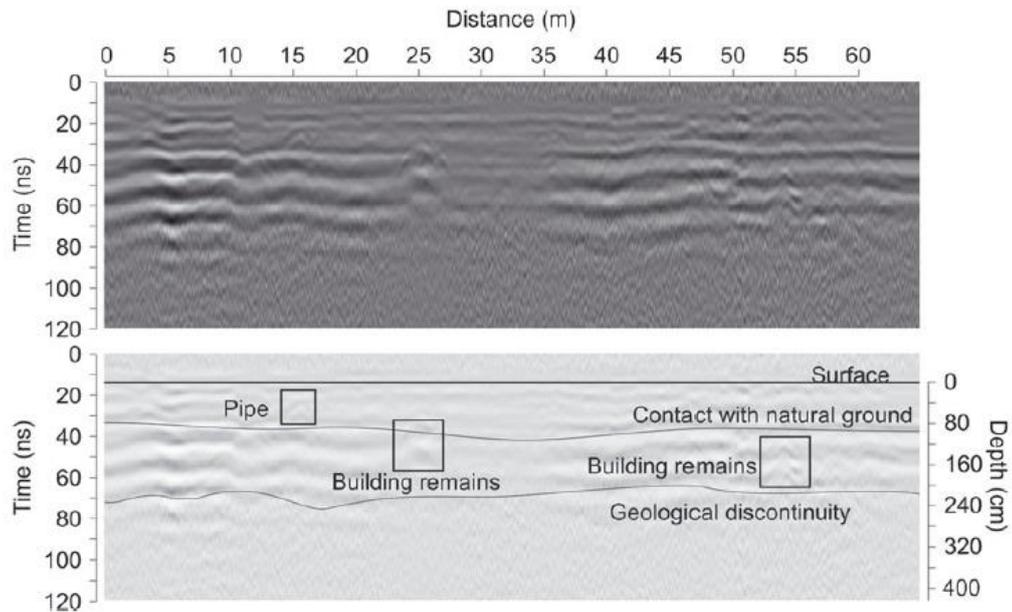


Figura 7.17. Radargrama obtenido con la antena de frecuencia central de 200 MH frente a la fachada principal, fuera de la basílica.

De la observación de los registros puede deducirse que debajo de la posible losa el terreno parece ser homogéneo, aunque podría haber con un cambio geológico a aproximadamente 2,5 m de profundidad. Sin embargo, a ambos lados de la puerta principal, justo al lado de las dos columnas, se presentan anomalías importantes. Hay dos posibles causas de estas anomalías. Por un lado, puede que se hayan producido en reflexiones de la señal en los cimientos del muro o de las columnas. Por otro, podrían estar asociadas con tumbas y otras estructuras enterradas (Figura 7.18).

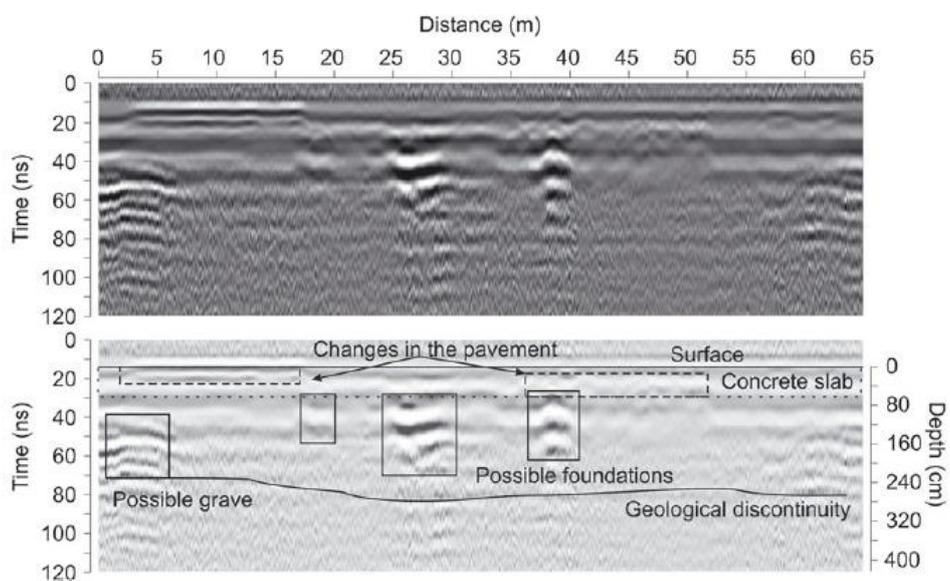


Figura 7.18. Radargrama dentro de la Iglesia, adquirida con una antena de frecuencia 200 MHz.

Por las anomalías puntuales, los resultados en el sub suelo sugieren que la iglesia se construyó sobre una capa relativamente homogénea, con algunos objetos irregulares ubicados fuera y dentro de la basílica, cuyas anomalías podría estar asociadas a tumbas y cimentaciones.

7.5 Discusión y conclusiones

El estudio de la basílica ha revelado información importante sobre la técnica constructiva que no estaba documentada. Esta información ha servido para planificar las estrategias de rehabilitación y mantenimiento.

Para la evaluación se utilizaron tres técnicas de inspección no destructiva. Los resultados fueron, en algunos casos, complementarios, aunque alguno de los elementos se analizó mediante una única técnica. En general, el estudio ha permitido determinar elementos estructurales, situar posibles daños y analizar el comportamiento dinámico de la basílica. Estos resultados importantes para la evaluación de la seguridad estructural de la edificación.

El estudio de la cubierta demostró la existencia de sectores en los que los materiales constructivos podían ser elementos huecos. Los radargramas en esta zona muestran áreas heterogéneas, en las que un alto número de hipérbolas organizadas en capas es un indicador de la presencia de este tipo de elementos. Estos objetos quedan situados principalmente alrededor de la unión de las columnas y la cubierta, en las zonas donde la estructura tiene un mayor espesor, y han permitido demostrar la hipótesis de los arqueólogos e ingenieros sobre la existencia de piezas de cerámica hueca utilizados para alivianar el peso de la cubierta.

Se han observado también diferencias en los radargramas que se corresponden con cambios de los materiales constructivos. Las zonas más homogéneas se observan en los sectores construidos con sillares regulares, y las zonas más heterogéneas de los registros se han obtenido en sectores construidos con mezcla de materiales: sillares, mortero y escombros de relleno y elementos huecos aligerantes.

El estudio de columnas con dos técnicas (georradar y tomografía sísmica), ha proporcionado información complementaria sobre la estructura, que no estaba documentada. La tomografía sísmica demuestra la existencia de una piedra cuadrada en

el centro de la columna octagonal, rodeada de cuatro piedras. Las imágenes GPR muestran imágenes compatibles con los resultados sísmicos e indican que la piedra cuadrada gira 45° en cada fila de sillaría.

La técnica de tomografía sísmica fue utilizada sólo en una columna, y se utilizó principalmente para disminuir la incertidumbre en el estudio de georadar, y para poder realizar una mejor interpretación.

Otro de los objetivos en el estudio de columnas era el detectar posibles daños en columnas. En el análisis no se detectaron grietas evidentes dentro de las estructuras. Sin embargo, la tomografía sísmica muestra la existencia de velocidades entre 500 m/s y 1500 m/s en algunos sillares, que sugieren algún daño en la piedra. Las imágenes registradas muestran algunas anomalías dispersas de poca amplitud que pueden haberse producido en la dispersión de la señal en daños de pequeño tamaño y zonas con fisuras de poca envergadura.

La velocidad de las ondas sísmicas en la mayor parte de la columna es entre 2.500 m/s y 3.000 m/s, lo que corresponde a calizas duras. Esto indica que la mayor parte de los sillares no tiene daños. La disminución de la velocidad superficial en cuatro lados de la columna puede asociarse a una superficie irregular del sillar o al daño externo que sufrió la piedra como consecuencia del incendio.

Los resultados finales obtenidos en el estudio de las columnas con ambos métodos muestran que la tomografía sísmica permite obtener una imágenes más detalladas y realistas, comparadas con las que proporcionan los B-scan del radar. Un estudio mediante una red de perfiles, obteniendo imágenes tridimensionales y cortes transversales podría proporcionar una resolución similar. Sin embargo, las velocidades obtenidas mediante tomografía sísmica tienen una relación directa con la densidad del material y, por lo tanto, con la calidad de la roca. La velocidad de la onda electromagnética, sin embargo, puede depender de más factores, por ejemplo, del contenido de agua o del cambio de materiales, además de cambios en la heterogeneidad de los materiales.

El estudio del subsuelo con georadar ha revelado la existencia de posibles tumbas y edificaciones antiguas dentro y fuera de la fachada principal, a una profundidad de unos 4 m.

La sismica pasiva ha permitido determinar la frecuencia propia, de la fachada, de la torre y de cada una de las naves. Su comportamiento dinámico indica que las diferentes partes del edificio están correctamente integradas. En el caso de la fachada se observa un doble pico en la frecuencia principal, probablemente indicando la existencia de una grieta importante que afecta a su estructura. No se han observado otros cambios importantes en el comportamiento dinámico de la fachada.

El comportamiento dinámico de la torre demuestra una correcta unión con el resto de la estructura. Sin embargo, la asimetría de la torre provoca que dos modos longitudinales alteren la dirección de flexión y dos más cambien los modos torsionales. La medición dinámica del suelo demuestra la existencia de un suelo muy blando debajo de la fachada principal de la basílica Santa María del Mar, compatible con las propiedades geológicas esperadas y con los registros de georadar.

La cimentación de la iglesia transmite se ha detectado junto a las columnas y a los muros.

**CAPITULO 8- CASO DE
ESTUDIO: CUBIERTA DE LA SALA
HIPÓSTILA DEL PARQUE GÜELL**

8 CASO DE ESTUDIO: PARQUE GUELL

8.1. El Parque Güell, un ejemplo de arquitectura civil modernista

El Park Güell es un complejo de parques públicos construido entre 1900 y 1914, diseñado por el arquitecto Antoni Gaudí (1852-1926) y ubicado en el distrito de Gracia en Barcelona (España). El complejo tiene una superficie de 17,18 hectáreas y está formado por diversos jardines, un sistema de carreteras internas, elementos arquitectónicos y edificios singulares y notables. El parque se abrió oficialmente al público en 1926. En 1984, la UNESCO declaró el parque como Patrimonio de la Humanidad como parte del conjunto de "Obras de Antoni Gaudí" (Cirlot, 1955; Benítez, 2016).

La sala hipóstila del parque está situada bajo la plaza principal del conjunto arquitectónico. La cubierta se sustenta por unas imponentes columnas. En el diseño original el número de columnas era mayor, y Gaudí decidió eliminar algunas de ellas. La figura 8 muestra fotografías de la plaza principal, de la sala hipóstila y de su cubierta. La plaza tiene una superficie de unos 2000 m², sin desniveles. Está rodeada por un banco alargado con forma de serpiente marina o dragón, recubierto de cerámica fragmentada, y por un corredor semicircular en la parte norte. Las creaciones del arquitecto, entre las que se encuentran la artesanía de cerámica, las rosetas de las techumbres y los recubrimientos mediante mosaico de fragmentos de cerámica y de vidrio, como el existente en el techo de la sala hipóstila, se integran en la arquitectura del conjunto.

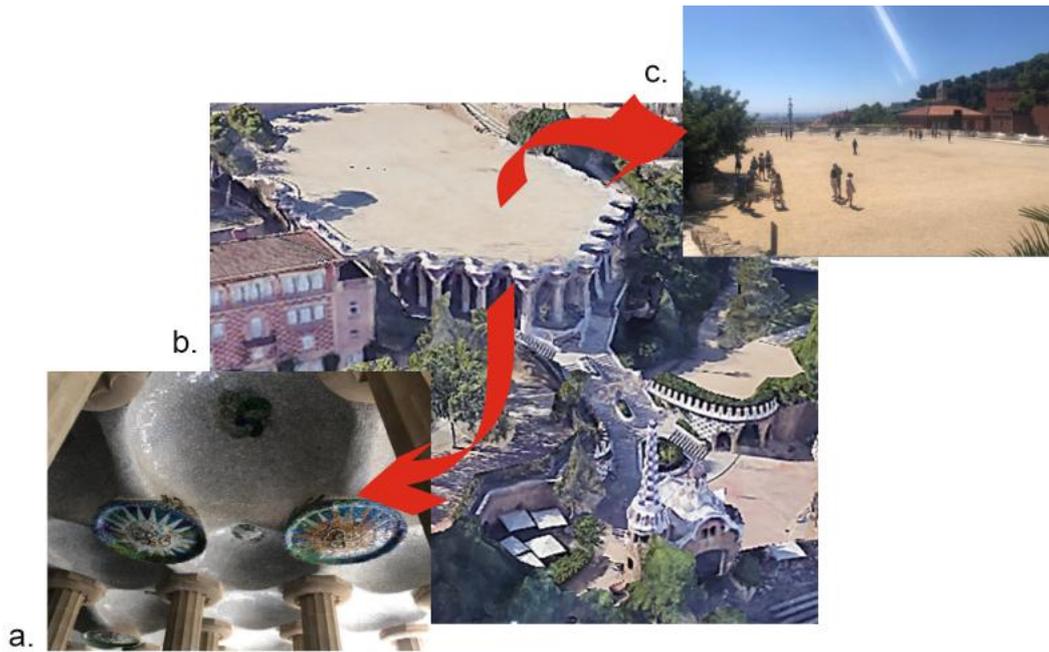


Figura 8.1. Sala Hipóstila Parque Güell. a) Vista isométrica de la sala hipóstila, b) Fotografía de la plaza central situada sobre la cubierta de la sala hipóstila. El suelo no está revestido. Destacan los bancos perimetrales. c) Fotografía de la cubierta desde el interior de la sala mostrando las rosetas, la ornamentación de cerámica y las bóvedas.

En la sala hipóstila se distribuyen ochenta y seis columnas, cada una de 6.16 m de altura y 1,2 m de diámetro, con la finalidad de soportar la losa que soporta la plaza principal del parque (Figura 8.2). La estructura de esas columnas consiste en un molde de ladrillo, que sirve de encofrado, relleno de un hormigón compuesto por una mezcla de mortero de cal con piedra de mampostería. El conjunto está revestido con fragmentos de cerámica y vidrio (Figura 8.1c). Los detalles de construcción de esos elementos arquitectónicos y estructurales y los materiales de relleno son parcialmente desconocidos.

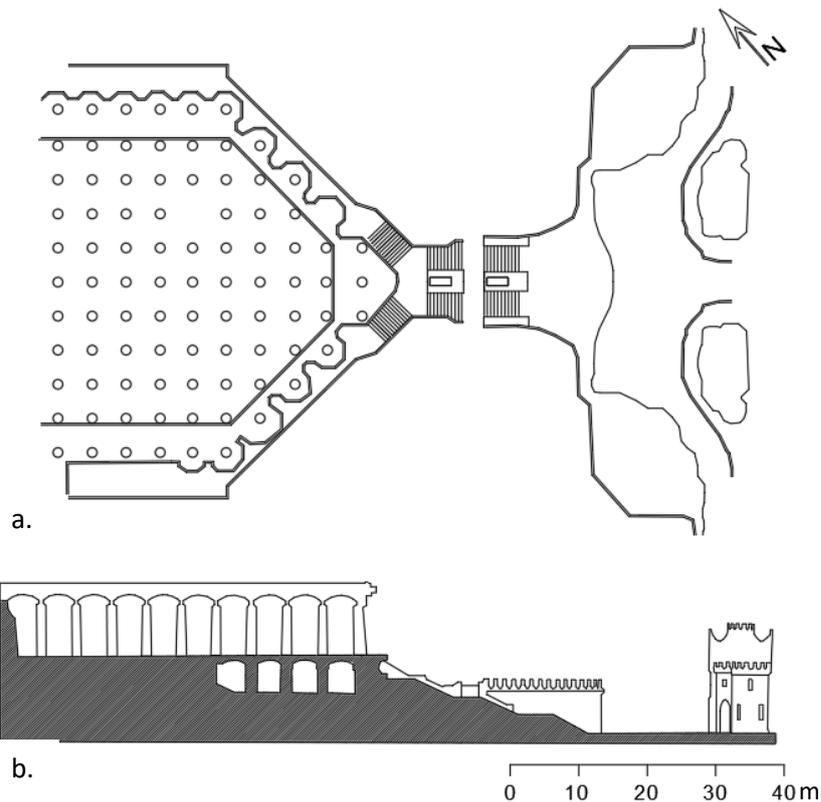


Figura 8.2. a) Planta de la sala hipóstila en la que puede verse la posición de las columnas. b) Sección de la sala hipóstila. La forma de la sección se adapta a la topografía del terreno y deja un espacio para la sala de almacenamiento de agua.

Aprovechando el desnivel del terreno, bajo la Sala Hipóstila se construyó un sistema de almacenamiento de agua (Figura 8.2). El agua de lluvia se recoge en la plaza central y llega al depósito mediante unos bajantes colocados en el interior de las columnas centrales.

El inicio del uso de hormigón armado en Europa coincide con la época de construcción del Parque Güell, resultando una de las primeras construcciones en Barcelona en la que se utiliza este material, con el que Gaudí estaba familiarizado gracias a la disponibilidad de la fábrica ASLAND del conde Güell.

En la construcción se utilizan elementos metálicos para reforzar la estructura de hormigón. En la época de construcción del parque no había normativa ni regulaciones específicas para el uso de refuerzos de acero. Por ello, durante este período, se combinaron elementos metálicos con técnicas tradicionales basadas en mampostería y mortero de cal, empleando ideas creativas para solucionar problemas que surgían

durante la construcción. Algunas de las soluciones todavía se emplean en la actualidad. (López *et al.*, 2013; Giordano *et al.*, 2007).

El parque fue restaurado varias veces durante el siglo XX. Muchas de estas restauraciones permitieron conocer partes de la estructura oculta bajo los mosaicos. Se observó que predominaba el uso del hormigón fabricado con cemento portland y que se habían utilizado refuerzos de acero, situando estratégicamente las barras en el interior de los elementos estructurales, como losas y columnas. Los materiales de recubrimiento de la estructura tienen un fin netamente estético. Para el recubrimiento se utilizó mampostería de piedra y materiales cerámicos (Moreno-Fernández, 2008).

A pesar del uso correcto de la tecnología de la época, durante la vida útil de la estructura han aparecido problemas a medio y a largo plazo, principalmente relacionados con la durabilidad de los materiales que se han ido deteriorando. Actualmente, el daño que sufre la Sala Hipóstila es importante. Se aprecian pérdidas del recubrimiento de cerámica y grietas en el techo, y son habituales las filtraciones de agua a pesar de la restauración de 1987 en la que las labores de mantenimiento se centraron en la reparación del mosaico y en la impermeabilización del suelo de la plaza. Sin embargo, estas medidas se han revelado insuficientes, y se han vuelto a producir inundaciones y filtraciones en la Sala Hipóstila. La principal causa de daño es el agua y, más específicamente, los problemas relacionados con el sistema de drenaje.

8.2. El georradar en el estudio de daños en patrimonio

Las tareas de mantenimiento y rehabilitación son fundamentales para la preservación del patrimonio histórico. Por el tiempo que llevan construidas estas edificaciones es común que aparezcan daños visibles como grietas, desprendimientos, incluso colapso local de elementos ornamentales, arquitectónicos o estructurales (Pickard, 2002; Prieto *et al.*, 2019).

En estructuras de hormigón armado es habitual el daño ocasionado por deficiencias internas y por patologías relacionadas con la corrosión de las barras de refuerzo embebidas en el hormigón. El problema de la corrosión se agrava en Barcelona por la proximidad de la ciudad al mar.

La corrosión cuando está muy avanzada puede llegar a tener consecuencias en la estructura, ya que reduce la sección efectiva y disminuye la adherencia entre acero y hormigón, lo que puede afectar a la integridad estructural del elemento (Bertolini *et al.*, 2008; Dillman *et al.*, 2013). Es por eso que la detección de elementos corroídos y áreas afectadas es una tarea crucial en la valoración de estructuras ya sean estas de Patrimonio Cultural o de otra índole, siendo importante detectar el daño durante las primeras etapas.

Cuando se trata de patrimonio los reconocimientos tienden a ser mínimamente invasivos para evitar dañar las estructuras preservadas. En consecuencia, normalmente las primeras evaluaciones son inspecciones visuales seguidas de ensayos no destructivos (NDT), para evitar al máximo intervenciones invasivas en las edificaciones. Sin embargo, la detección de la corrosión con NDT es complicada, los métodos más son muy puntuales y conllevan mucho tiempo. Entre los más comunes se pueden mencionar los Potencial de Corrosión (Gece, 2008; Andrade *et al.*, 2001), el análisis petrográfico (Arndt *et al.*, 2009) y las medidas mediante resistivímetro (Assis, 2006).

El georradar se ha aplicado recientemente en estudios de corrosión con resultados cualitativos satisfactorios. En algunos estudios se ha realizado el análisis de la corrosión de las armaduras en elementos de hormigón armado (Boryssenko *et al.*, 2006; Hubbard *et al.*, 2003; Miller *et al.*, 2002). Por otro lado, el georradar proporciona información precisa sobre la posición de las armaduras (Alani *et al.*, 2013; Perez-Gracia *et al.*, 2008; Soldovieri *et al.*, 2006) y permite conocer con una cierta aproximación su diámetro (Szymczyk y Szymczyk, 2015; Zanzi y Arosio, 2013; Leucci, 2012). El georradar también permite evaluar las estructuras de hormigón, definiendo claramente las áreas afectadas por corrosión o por humedades, obteniendo mapas de corrosión y de presencia de agua (Hong *et al.*, 2014; Perez-Gracia *et al.*, 2008). La evaluación con corrosión a nivel cuantitativo que ha sido investigada recientemente demostrando resultados satisfactorios (Sossa *et al.*, 2019).

El trabajo que se presenta en este capítulo se centra en el estudio mediante georradar de la sala hipóstila del parque Güell. Se realiza una inspección de la cubierta desde la sala y también desde la plaza del parque. El objetivo del estudio es obtener información para determinar el daño interior, ya que se han observado grietas, además de problemas de filtraciones. La complejidad de esta estructura y la falta de información documentada

sobre los elementos y materiales constructivos hacen que sea necesario un análisis cuidadoso.

Una ventaja del uso del georradar es la rápida adquisición de datos y la capacidad de estudiar grandes superficies en poco tiempo. Para este análisis se han planteado dos sectores de estudio: la zona A, (la plaza situada sobre la cubierta, que se estudia con la antena de 400MHz), y la zona B (el techo de la sala hipóstila, que se estudia con una antena de 2 GHz).

8.3. Problema estudiado, adquisición de datos y procesado

Las estructuras y elementos arquitectónicos de la plaza de la Sala Hipóstila fueron restauradas varias veces durante el siglo pasado, pese a ello siguieron surgiendo problemas, por lo que se requirió una nueva restauración para la que previamente se realizó un estudio completo de la estructura. El trabajo incluido en este capítulo forma parte de este estudio más completo.

La degradación de algunos materiales y el agua fueron los principales causantes del daño que presentaba la estructura. Una inspección visual certificó la aparición de aparecieron grietas y de desprendimientos en algunas áreas. Presumiblemente podrían ser la manifestación externa de un daño interior debido a la corrosión generada en los elementos metálicos embebidos.

El estudio previo a la restauración se inició con una inspección visual previa en la que detectaron daños evidentes (Figura 8.3): grietas en el suelo de la plaza principal y desprendimiento de la cerámica ornamental en la cubierta de la Sala Hipóstila. También se observaron los efectos de la humedad, por lo que se planteó investigar la posible existencia de corrosión en los elementos metálicos utilizados como refuerzo.

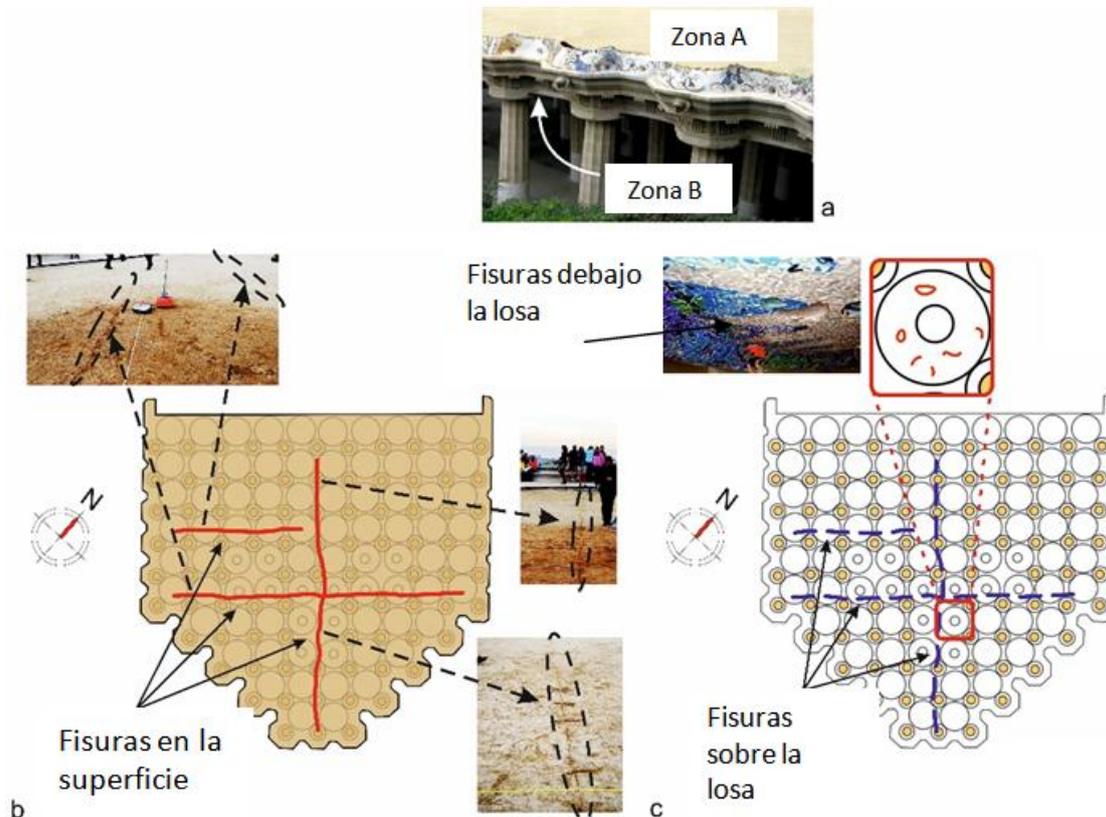


Figura 8.3. a) Fotografía que muestra la situación de las dos zonas estudiadas, A y B. La zona A está en la plaza, en la parte superior de la losa, cubierta de suelo arenoso; la zona B está en el techo de la sala hipóstila, en el fondo de la losa cubierta con revestimiento de fragmentos de cerámica. b) Fracturas observadas en la zona A en la inspección visual. c) Daño observado en la zona B, en uno de los casquetes esféricos de las bóvedas del techo inferior de la sala hipóstila.

La adquisición de datos con georradar se realizó mediante *common offset*, utilizando el equipo comercial SIR-3000, de la casa *Geophysical Survey System, Inc* (GSSI). Se utilizó una antena de frecuencia central 400 MHz para el estudio de la zona A, y una antena de 2 GHz de frecuencia central para el estudio de la zona B.

8.3.1. Adquisición de datos

La evaluación con GPR se centró en dos zonas principales A y B (Figura 8.4) después de la inspección visual. Eran las zonas con mayor número de daños y grietas.

El arquitecto Antonio Gaudí decidió retirar una de las columnas que sustentan la losa de la plaza. Este sector, en el que falta esta columna, queda dentro de la zona de estudio denominada A. Pese a que el sector afectado puede haberse reforzado, es de suponer que parte de la losa pueda ser más susceptible a deformaciones por la falta de una

columna central que distribuya mejor los esfuerzos, lo que podría ser la causa de la aparición de grietas y fisuras.

Para el estudio de la zona A se ha utilizado una antena de frecuencia central de 400 MHz (Figura 8.4), con la que se han adquirido 7 perfiles longitudinales que cruzaban las columnas exteriores (Figura 8.4b), los radargmas resultado de este análisis se denominan R2, R3, R4, R5, R6, R7 y R8 (Figura 8.4c).

El estudio de la zona B se ha realizado por debajo de la losa. Por la altura que tiene la sala hipóstila fueron necesarios andamios para la toma de datos. La adquisición se realizó con una antena de 2 GHz, enfocada hacia el techo (Figura 8.4e). Con este estudio se pretendía analizar el estado del recubrimiento de cerámica fragmentada que, en algunos sectores, presenta grietas y desprendimientos. Los perfiles adquiridos en esta zona son R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15 y R16 (Figura 8.4g).

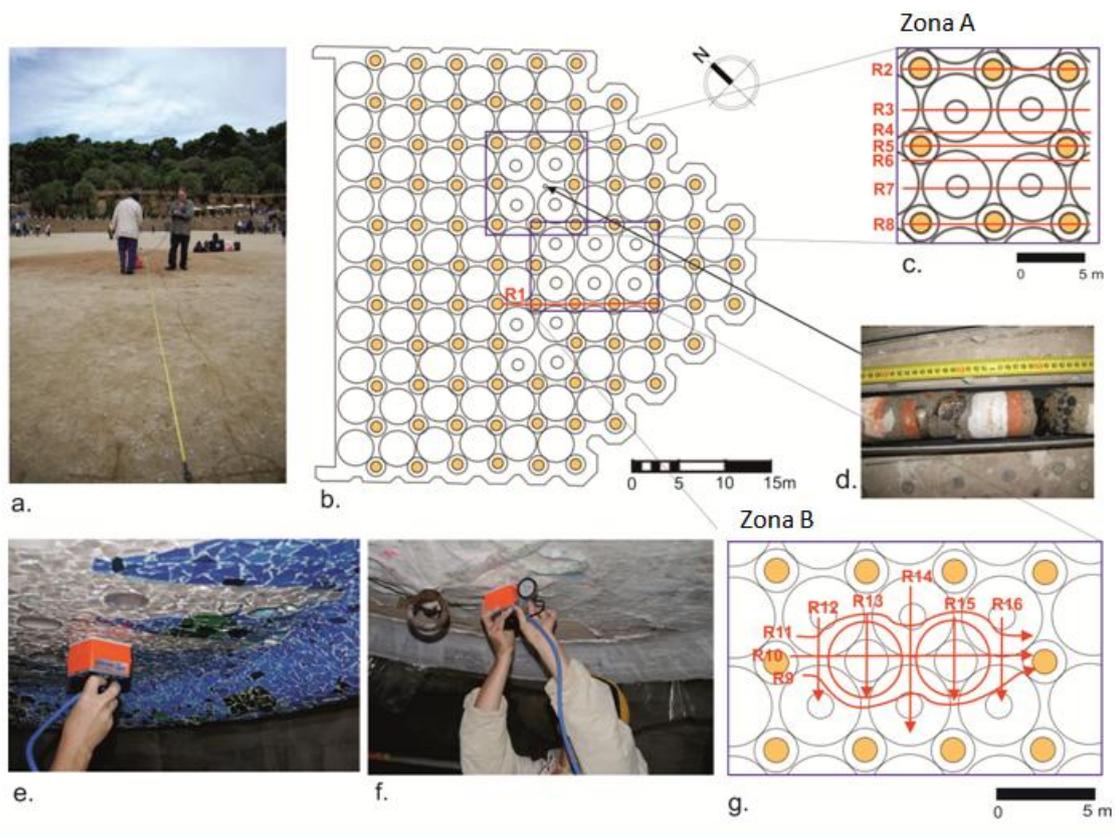


Figura 8.4. Adquisición de datos con GPR. a) Fotografía de la adquisición de datos en Zona A con antena de frecuencia central de 400 MHz. b) Planta de la plaza indicando la posición de las zonas A y B. c) Perfiles de radar en la Zona A. d) ubicación de la extracción de testigo Zona A y detalle de un testigo de perforación. (e y f) Adquisición con antena de frecuencia central de 2GHz sobre la cerámica Zona B (cubierta de la sala hipóstila) y g) Ubicación de los perfiles Zona B.

Los parámetros de adquisición que se usaron son Ventana temporal de 10 ns para la antena de 400 MHz, Ventana temporal de 8 ns para la antena de 1.5 GHz, Muestreo de 512 puntos por traza, 160 trazas por m y los filtros durante la adquisición fueron *Low Pass* 800 y *High Pass* 100 para la antena de 400 MHz, y *Low Pass* de 1930 para la antena de 1.5GHz.

8.3.2. Procesado

Los registros obtenidos con la antena de 400 MHz se procesaron utilizando la siguiente secuencia de filtros:

- 1) Se aplicó una corrección de origen de tiempos. La amplitud y la posición de la primera anomalía en los radargramas depende de los efectos de acoplamiento entre la onda directa y la reflexión en la superficie del medio. En esta señal influyen las características de los materiales y también la distancia entre la antena y la superficie, por lo que se observan variaciones en las primeras llegadas a medida que cambian las propiedades de los materiales superficiales. La corrección selecciona un mismo punto común referido a la primera llegada, para que el origen de tiempo de todas las trazas sea el mismo.
- 2) Se aplicó una ganancia de tres puntos (-16 dB, 29 dB y 42 dB) a cada A-scan.
- 3) Se aplicó un filtro paso banda, con frecuencias de corte de 100 MHz y 800MHz. Con este filtro se atenuaron las componentes frecuenciales fuera de la banda seleccionada, de manera que se eliminó gran parte del ruido de alta frecuencia y del ruido de baja frecuencia. El objetivo era obtener una mayor claridad de imagen para poder determinar con mayor precisión la posición de los refuerzos metálicos y de otros elementos estructurales.

La secuencia de filtrado aplicada a los registros obtenidos con la antena de 2 GHz fue:

- 1) Se hizo una corrección topográfica debido a que la superficie era irregular. Esta corrección permitió además una mejor interpretación dado que la adquisición se realizó de abajo hacia arriba. Para una mejor interpretación, se invirtió también el radargrama.
- 2) Se aplicó una ganancia manual leve a cada A-scan.
- 3) Se aplicó una ganancia para compensar la dispersión geométrica del frente de ondas, utilizando un coeficiente de 0,8.

Una vez realizado el procesado de datos y antes de analizar los resultados, se procedió a determinar la velocidad promedio de la onda en cada uno de los materiales evaluados.

Partiendo de la medición de cinco velocidades en el radargrama, con la ecuación de velocidad (ecuación 1) se calcula una constante dieléctrica promedio y con esta se vuelve a calcular una velocidad promedio (Tabla 1).

$$v = \frac{c_o}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

Donde:

c_o = Velocidad de la luz = 0.30 m/ns

ϵ_r = permitividad dieléctrica relativa

La tabla 1, muestra el resumen de velocidades y el cálculo de la permitividad dieléctrica relativa promedio en cada sector.

Tabla 8.1. Calculo de la constante dieléctrica

Velocidad (n/ns)	Permitividad dieléctrica relativa
0.09	11.11
0.12	6.25
0.1	9.00
0.12	6.25

Valor promedio de la permitividad dieléctrica para el hormigón: 8.32

Con la permitividad dieléctrica relativa se calcula la velocidad promedio:

$$v = \frac{c_o}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{30 \text{ cm/ns}}{\sqrt{8,32}} = 10.4 \text{ c m/ns}$$

OJO, QUE CON LA FÓRMULA QUE HAS PUESTO NO DA 10 CM/NS

El resultado del análisis proporcionó una velocidad de propagación de la onda de unos 10.4 cm/ns, que, para simplificar los cálculos e interpretaciones se consideró de 10 cm/ns.

8.4. Discusión y análisis de resultados

8.4.1. Zona A - Plaza del parque

La estructura de la cubierta de la Sala Hipóstila consta de una losa de hormigón con un sistema de bóvedas internas y un relleno para uniformizar la superficie de la plaza central que queda situada sobre la losa. Las bóvedas están reforzadas con barras metálicas que atraviesan la estructura. La losa que sustenta la zona A se apoya en las columnas de la sala hipóstila. En esta sala se eliminaron varias columnas centrales, y uno de los perfiles de radar cruza la sección en la que faltarían las columnas, por lo que se supone que esta zona puede haber un refuerzo adicional.

El radargrama (Figura 8.5) obtenido en el perfil R1 (Figura 8.4b) presenta imágenes que se asocian fácilmente con los diferentes elementos de la estructura:

- a. Se ven varias hipérbolas provocadas por la reflexión de la señal en las barras transversales al perfil.
- b. El contacto de la losa con tres columnas también es visible.
- c. Pueden apreciarse también en diversos puntos unas reflexiones que se asocian con las varillas longitudinales.
- d. Se observan algunas hipérbolas pequeñas y borrosas que podrían estar asociadas con daños o con piezas irregulares embebidas en el interior de la estructura, aunque no se descarta que puedan haberse generado en los ganchos metálicos que sujetan las piezas de cerámica ornamental.
- e. Otras dos anomalías más grandes, situadas aproximadamente a un tiempo doble de propagación de 14 ns están ocasionadas en las bóvedas.

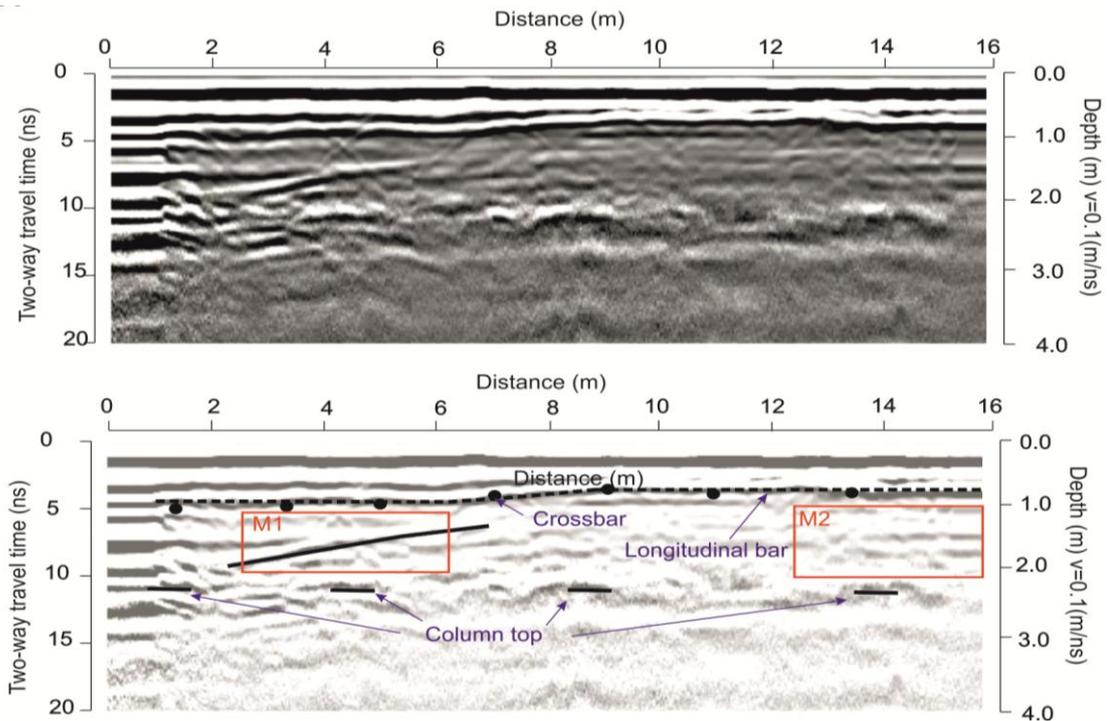


Figura 8.5. Radargrama obtenido en el perfil R1, situado sobre el eje central de la plaza. En la interpretación se indican los diferentes elementos en los que se han podido generar las anomalías.

La Figura 8.6 muestra el radargrama obtenido en el perfil R7 (ver la posición de este perfil en la Figura 8.4c). El perfil atraviesa la plaza sobre el sector de la losa en el que se ha eliminado un pilar. Este sector se corresponde con la parte central de la plaza. La imagen de radar muestra las claras diferencias entre las diferentes zonas:

- a) Hay dos fuertes reflexiones que se corresponden con las bóvedas.
- b) Entre las dos reflexiones anteriores debería haber una columna. No se observan reflexiones en ese tramo, ya que se trata de una de las columnas eliminadas. Sin embargo, en los dos extremos del radargrama pueden verse claramente las reflexiones producidas en dos de las columnas existentes.
- c) Destacan las anomalías producidas en los apoyos metálicos, en las que se ha producido una fuerte reflexión. Estos elementos metálicos son los que sostienen las rosetas decorativas. Se pueden ver con claridad las anomalías que se corresponden con las barras de refuerzo transversales al perfil, en el centro del radargrama.

d) En las reflexiones en el refuerzo transversal, la señal es difusa en algunos tramos, y resulta más nítida y definida en la parte final del radargrama. Este efecto borroso se produce probablemente debido a la corrosión de las barras de refuerzo. También es un efecto que puede verse en los perfiles R6 y R8., y también es visible en los radargranas obtenidos en los perfiles siguientes, como por ejemplo en el R6 (Figura 8.9) y en el R8 (Figura 8.6).

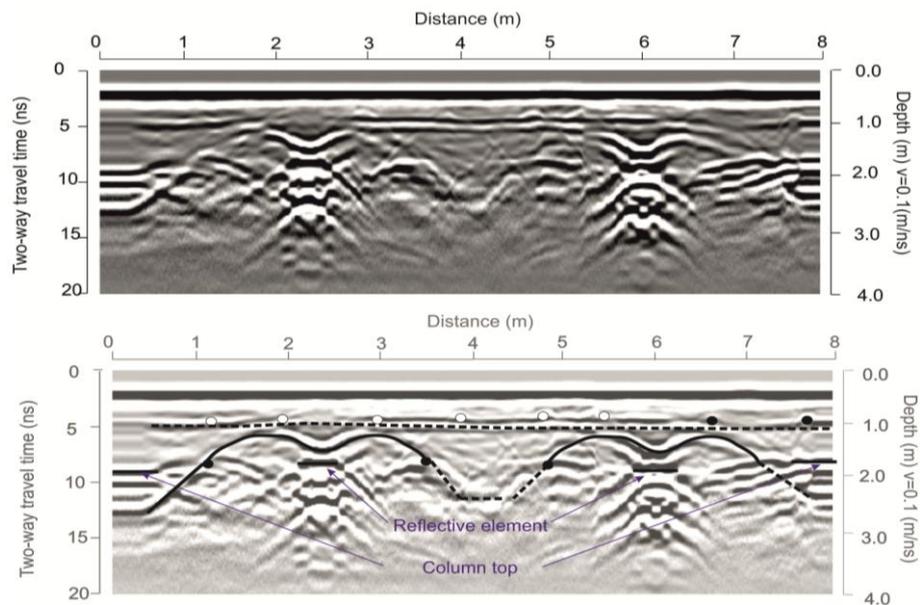


Figura 8.6. Radargrama R7, sección que atraviesa dos bóvedas sin columna intermedia con su interpretación.

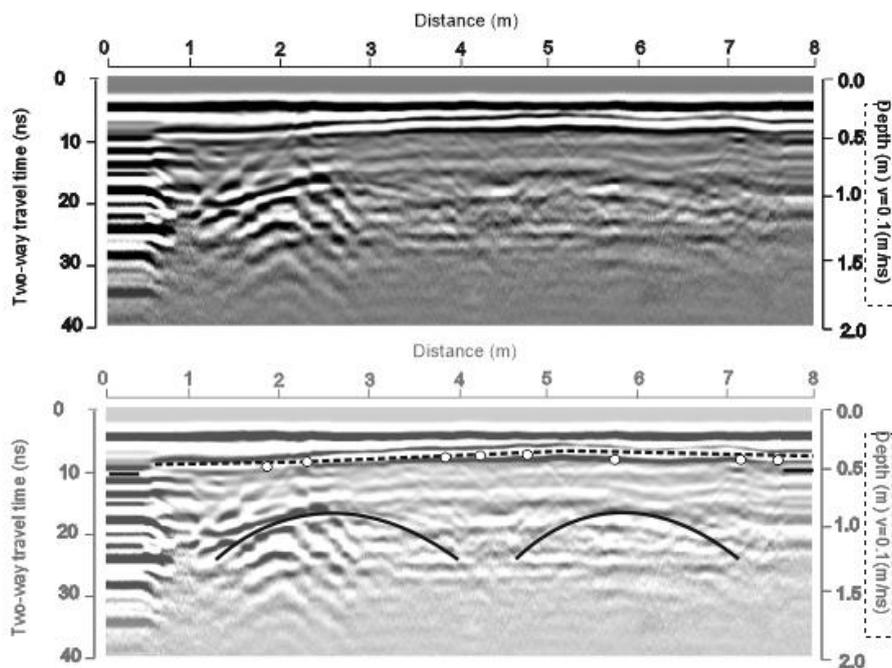


Figura 8.7. Radargrama R8, sección que atraviesa dos bóvedas sin columna intermedia con su interpretación.

Todos los radargramas obtenidos en la Zona A presentaban un efecto similar en las anomalías hiperbólicas producidas en las barras metálicas de refuerzo: en algunos sectores la definición de las anomalías sufría una evidente disminución y se producía un efecto de difusión, resultando complicado el situar exactamente la posición de la barra. Comparando los registros con las probetas extraídas en distintos puntos parece que este efecto estaba posiblemente asociado con corrosión. Otros estudios indican que se ha observado este mismo efecto en casos de corrosión de elementos metálicos internos en distintos tipos de estructuras, produciéndose la desaparición parcial de las anomalías debidas a la reflexión en elementos metálicos afectados por corrosión (Solla *et al.*, 2019; Hong *et al.*, 2017; Hong *et al.*, 2014; Kabir *et al.*, 2011).

Uno de los radargramas en el que se observa el efecto mencionado es el obtenido en el perfil R5. Este registro se ha adquirido desde el centro de la plaza, en dirección hacia el exterior. En el radargrama se puede observar la desaparición parcial de las hipérbolas y un efecto borroso en la zona correspondiente a la situación de las barras transversales (Figura 8.8, 8.9). Este efecto es muy marcado en el lado izquierdo del radargrama, que corresponde zona central de la losa.

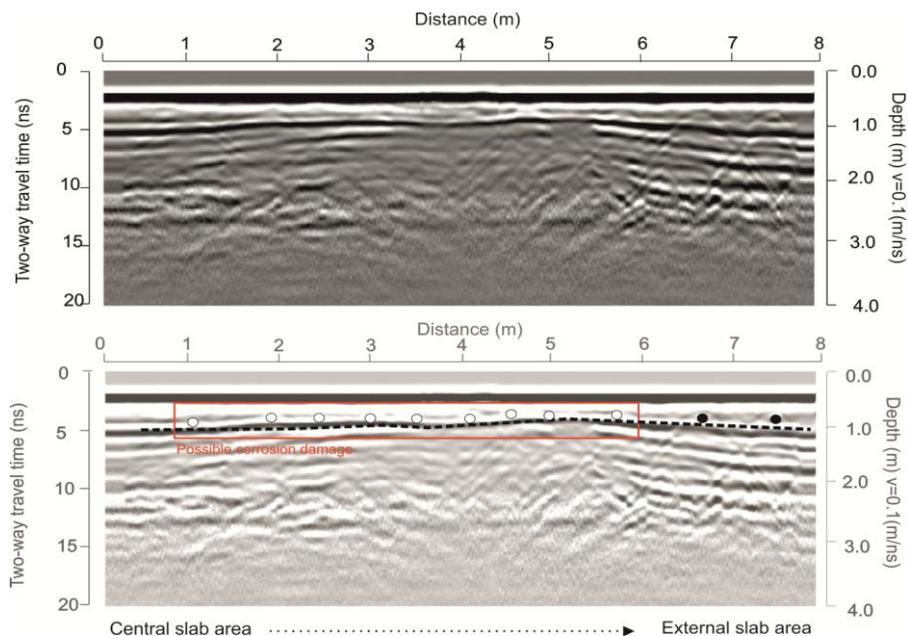


Figura 8.8. Radargrama obtenido en el perfil R5. Los círculos blancos indican la posición de las barras que podrían estar afectadas por corrosión. Los círculos negros serían las barras sanas, la línea punteada que atraviesa casi todo el perfil es una posible barra longitudinal.

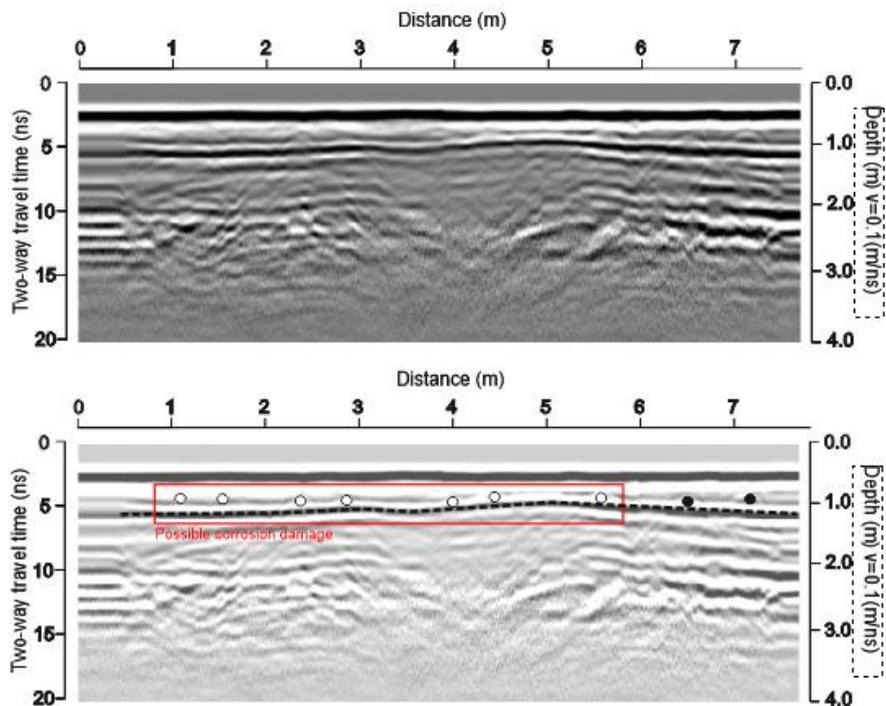


Figura 8.9. Radargrama obtenido en el perfil R4. Los círculos blancos indican la posición de las barras que podrían estar afectadas por corrosión. Los círculos negros serían las barras sanas, la línea punteada que atraviesa casi todo el perfil es una posible barra longitudinal.

En los ensayos controlados en laboratorio que se presentan en el capítulo 5, la atenuación de la señal reflejada en las barras se relacionaba con la presencia de corrosión. Esta atenuación se observaba en los radargramas como una disminución de la amplitud de la señal registrada. Estos mismos ensayos demostraron que se producía *scattering* cuando las barras estaban corroídas, siendo un fenómeno más evidente cuando el hormigón que rodeaba la barra estaba parcialmente deteriorado por los procesos químicos debidos a la corrosión de los metales embebidos.

Estos resultados empíricos se pueden comparar con los que se observan en los registros de campo obtenidos en la sala hipóstila del parque Güell. También se aprecia una disminución de la amplitud de la señal reflejada en las barras, en determinados sectores, y un efecto “borroso” en el registro que se puede asociar con la dispersión de la señal.

En el perfil R6, los brazos de las hipérbolas presentan en la zona más borrosa un ligero cambio de pendiente si se las compara con las hipérbolas registradas en otras zonas. Esto indica un cambio de velocidad relacionado con la zona de barras con corrosión (Figura 8.10).

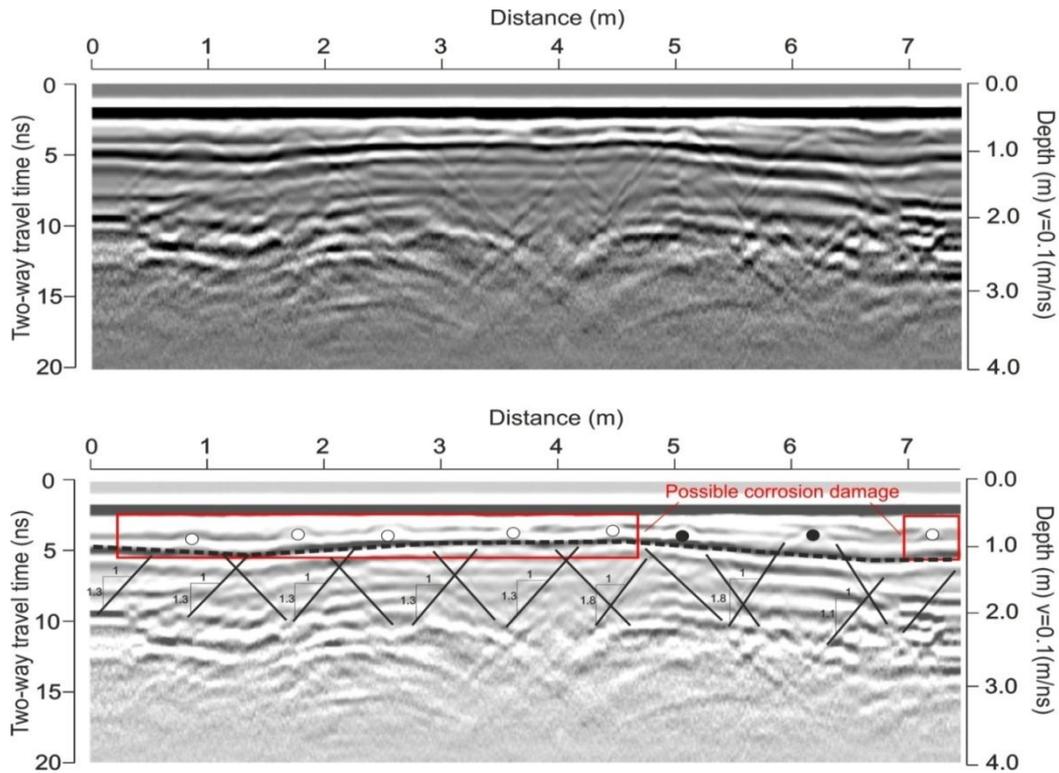


Figura 8.10. Radargrama obtenido en el perfil R6, en el que se observa el cambio en la pendiente de los brazos de las hipérbolas producidas en las barras transversales afectadas por corrosión.

Los dos efectos, tanto el cambio de pendiente de los brazos de las hipérbolas como la disminución de su amplitud son indicios de la existencia de corrosión en algunas barras. Las que estarían más dañadas son las situadas en la parte central de la losa sobre la que se sitúa la plaza del parque. Esta información se contrasta con la extracción de testigos.

Algunos de los testigos extraídos muestran parte refuerzo metálico, apreciándose corrosión y también humedad en los materiales. La ubicación del testigo que se muestra en la Figura 8.4d se sitúa aproximadamente entre los 4 m y los 5 m del radargrama R6, en zona en la que se ha producido el efecto de difusión en las hipérbolas y en la que

se ha observado una mayor velocidad de propagación, estimada a partir de la pendiente de los brazos de las hipérbolas.

La interpretación conjunta de todos los radargramas obtenidos en los perfiles trazados en la plaza ha permitido obtener un modelo de la geometría de la estructura, situando las barras metálicas de refuerzo (Figura 8.11).

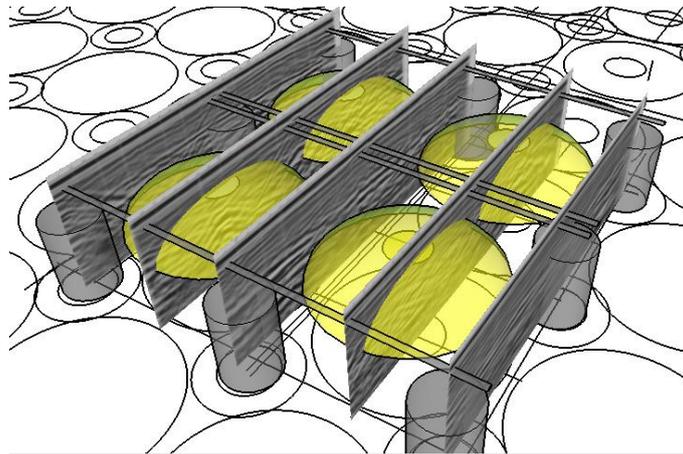


Figura 8.11. Modelo tridimensional de la estructura.

En los radargramas de la zona A, se puede observar que las barras que presentan indicios de corrosión están más cerca de la zona central de la losa. A lo largo del tiempo podrían haber existido acumulaciones de agua en el centro de la losa debido al taponamiento de las bajantes. Las bajantes principales estaban ubicadas en las columnas centrales (Figura 8.12). El agua estancada pudo mantener la zona central más húmeda, lo que posiblemente propició la corrosión de los refuerzos de forma más localizada en esa zona.

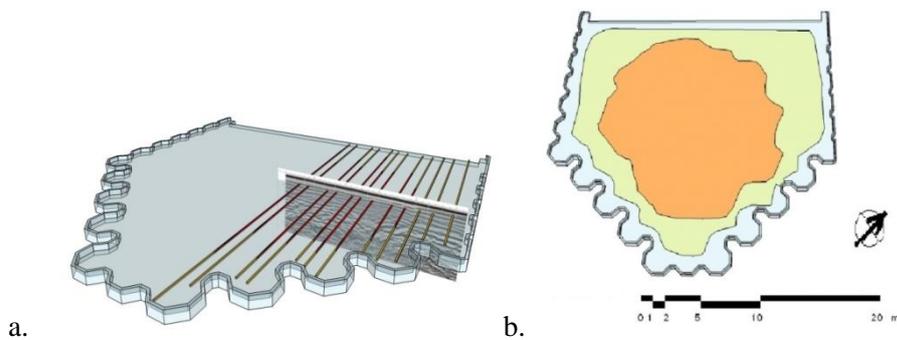


Figura 8.12. Hipótesis de acumulación de humedad en la losa por estancamiento del drenaje central.

8.4.2. Zona B. Estudio del techo de la sala hipóstila

La zona B es el techo de la sala hipóstila, bajo la plaza. El objetivo del estudio de esta zona es analizar los desprendimientos de cerámica que se observaron en la inspección visual, y estudiar los elementos y materiales de los que está compuesta la losa.

La figura 8.13, muestra los perfiles estudiados con georradar. La adquisición de datos se ha realizado de abajo hacia arriba. Dado que la superficie no es regular, se ha realizado también una corrección topográfica en uno de los perfiles más representativos como el R14 (Figura 8.14). En otros perfiles, como por ejemplo, el R9 y R10 (Figura 8.13) no ha sido necesario hacer la corrección topográfica ya que al estar horizontal se pueden observar con mayor claridad las anomalías asociadas a las piezas de cerámica fragmentada y su heterogeneidad. Ambos perfiles identifican dos grandes reflexiones que coinciden con la unión de bóveda y bóveda, estas uniones aparentan tener refuerzos de acero.

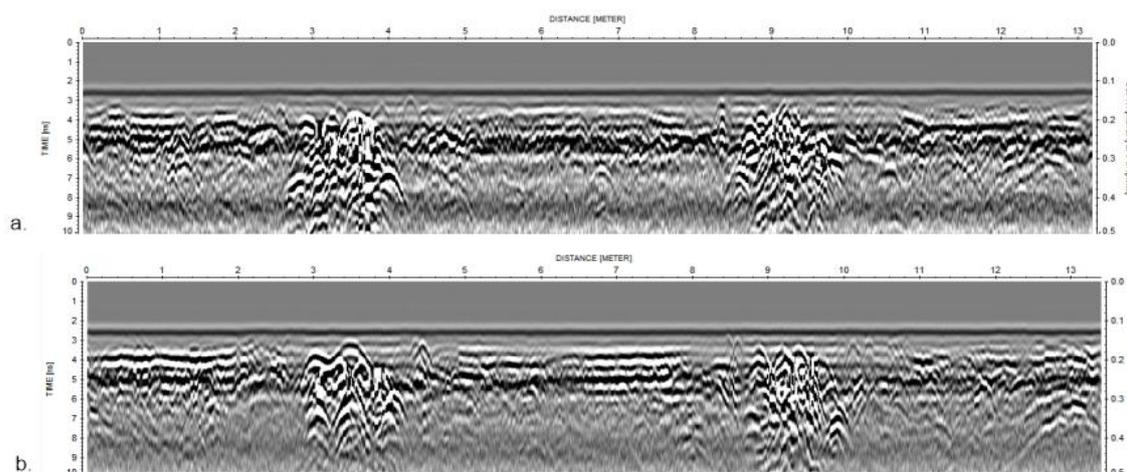


Figura 8.13. Perfiles adquiridos Zona B, a) Radargrama R11, b) Radargrama R9, ambos perfiles tienen aproximadamente la misma longitud y han sido a los lados de la zona central abarcan el paso de dos medias cúpulas.

Un radargrama que muestra las características observadas en casi todos los demás es el obtenido en el perfil R14 (Figura 8.14), que atraviesa la zona B por el centro. .

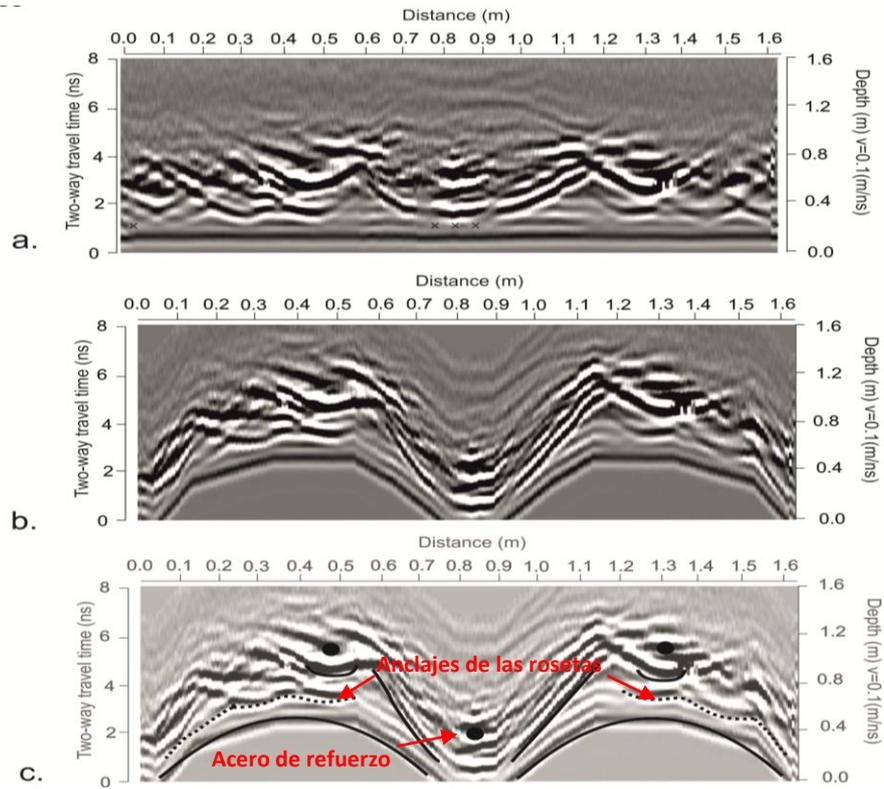


Figura 8.14. a) Radargrama obtenido en el perfil R14, una vez se ha invertido. b) El mismo radargrama tras aplicar la corrección topográfica . c) Interpretación de los datos.

En el radargrama de perfil R14 pueden verse algunas anomalías que podrían estar ocasionada en armaduras o en elementos metálicos situados en el interior de la estructura. Las dos fuertes reflexiones laterales podrían corresponder con elementos metálicos que sostienen los rosetones de cerámica. La posición de estas anomalías es coincidente con la de las dos rosetas que están en los laterales (Figura 8.14).

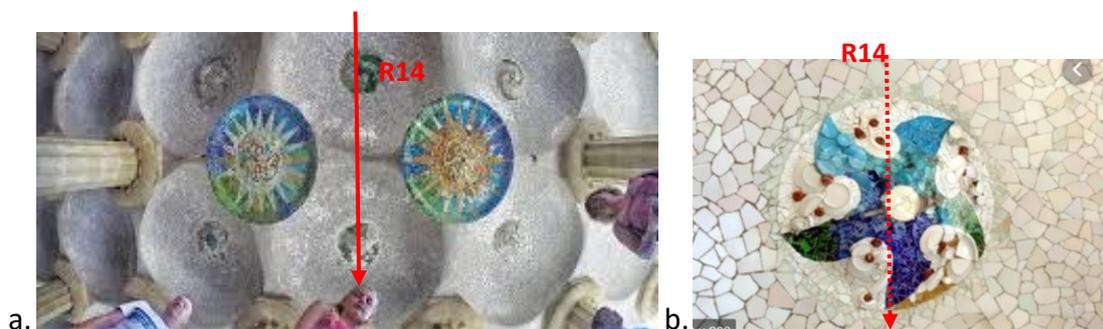


Figura 8.14. a) Fotografía real Zona 2 y línea de radar, b) Elemento de cerámica (posiblemente colgado).

Aunque se ha alcanzado una una profundidad de inspección aproximada de 1 m, no se han detectado las barras observadas en los radargramas de la Zona A. En los registros, los únicos elementos metálicos que se han observado han sido los elementos para sustentar las rosetas y una posible barra central de refuerzo (figura 8.14).

En los radargramas longitudinales, en los que no se ha realizado la corrección topográfica para ver el estado de la cerámica (Figura 8.13), se puede apreciar que aparecen zonas muy heterogeneas, que se corresponderían con sectores de cerámica fragmentada más irregulares. En algunas zonas de los registros se observa un importante cambio en la amplitud de la señal reflejada. Este efecto puede ser debido a que en el recubrimiento cerámico hay un cambio de material que posiblemente contiene trozos de vidrio.

8.5. Discusión y conclusiones

La inspección no destructiva con georradar ha permitido obtener modelos tridimensionales de la estructura, formada por cúpulas internas que distribuyen las cargas hacia las columnas. Sobre estas cúpulas se ha colocado una losa sobre la que hay un suelo de relleno utilizado para nivelar la superficie de la plaza central del parque.

La zona A incluye el sector de la plaza en el que se retiró una de las columnas de la sala hipóstila. El análisis de este sector ha mostrado la existencia de un armado de refuerzo posiblemente en dos direcciones. Los radargramas muestran claramente las hipérbolas producidas en las barras transversales al perfil, pero resulta difícil identificar las barras longitudinales.

En la misma zona se han identificado y analizado dos efectos asociados a la corrosión en los elementos metálicos: una atenuación señal registrada, que produce hipérbolas de aspecto difuso y menos claro que las producidas en otras barras sanas; y también un aumento de la velocidad de propagación, observable mediante la pendiente de los brazos de las hipérbolas de los radargramas. Las zonas en las que se suponen problemas de corrosión a partir de los registros de georradar concuerdan con la información obtenida mediante la extracción de testigos.

Los ensayos de laboratorio realizados para analizar el efecto de la corrosión de elementos metálicos corroboran los efectos observados en los radargramas: disminución de la amplitud de la señal hasta la casi desaparición de la imagen debido a la corrosión de los elementos metálicos, y un efecto de neblina que estaría relacionado con la dispersión de la señal en el hormigón circundante a la barra dañada, también afectado por los procesos de corrosión. Comparando los resultados del trabajo de campo con los obtenidos en los ensayos controlados de laboratorio, se puede deducir que el mayor daño en algunas barras puede estar acompañado de la degradación del hormigón circundante.

Aunque no se descarta que todas las barras pudieran presentar un cierto grado de corrosión, los resultados indican la existencia de una zona que aparentemente está más afectada que el resto. Se observa también que esta misma zona puede presentar una mayor humedad. La zona más dañada es la situada en el centro de la plaza, en el sector en el que están los bajantes para aguas pluviales, que pasan por el centro de las columnas. Una posible hipótesis es la acumulación de agua debido a un taponamiento del drenaje. Esta acumulación de agua afecta directamente a la corrosión de las barras de refuerzo en la zona.

El análisis de la zona B, que ha sido realizado en el techo de la sala hipóstila, ha sido útil para verificar el estado de la ornamentación adherida al techo, realizada mediante cerámica fragmentada y rosetas sostenidas con ganchos internos anclados a la losa. No se ha detectado la presencia de grietas ni de huecos importantes. Destacan las reflexiones de gran amplitud producidas en los elementos metálicos de los que cuelgan las rosetas.

**CAPITULO 9- CASO DE
ESTUDIO ESTRUCTURA
DEL VASO DE UNA PISCINA**

CAPITULO 9- CASO DE ESTUDIO CASO DE ESTUDIO ESTRUCTURA DEL VASO DE UNA PISCINA

9.1. Introducción

Este trabajo está dirigido al estudio del vaso de una piscina municipal construida en hormigón armado y ubicada en la población de Centelles (provincia de Barcelona). Las autoridades municipales comunican que en la estructura del vaso de la piscina se han detectado filtraciones con lo que se puede haber generado un problema de corrosión en las armaduras de la estructura del vaso.

El análisis de la corrosión, en elementos de hormigón armado, es una práctica que aún genera incertidumbres. Los métodos más usuales para el análisis del fenómeno de corrosión, entre los más comunes son Potencial corrosion (Gece, 2008; Andrade *et al.*, 2001), Análisis petrográfico (Arndt *et al.*, 2009) y Resistivímetro (Assis, 2006), son levemente invasivos y puntuales, y no permiten analizar áreas extensas. (Chang *et al.*, 2009, Barrile *et al.*, 2005).

La tecnología del radar de subsuelo, *Ground Penetrating Radar* (GPR), ha permitido el desarrollo de notables avances en esta área. Investigaciones recientes demostraron que el GPR es capaz de diferenciar la señal cuando interacciona con elementos con corrosión respecto de cuando lo hace con elementos metálicos sanos (Zaki *et al.*, 2018, Wong *et al.*, 2018, Hasan *et al.*, 2016 Lai *et al.*, 2010) confirmando que es una herramienta útil y capaz para la identificación de la corrosión en elementos y estructuras de concreto reforzado.

Para analizar la estructura del vaso de la piscina se plantearon perfiles GPR sobre toda la extensión de la base del vaso. Se trazaron perfiles longitudinales paralelos y separados 15cm. La prospección se realizó utilizando dos antenas diferentes con frecuencias centrales de 1600MHz y 500MHz, respectivamente. A partir de los resultados de la prospección se ha podido apreciar la ubicación de las armaduras y también ha sido posible estimar el espesor de la base del vaso. Asimismo, el análisis de los resultados permitió detectar la presencia de corrosión en una zona de la base del vaso.

9.2. Estructura Piscina

La piscina municipal está ubicada en la población de Centelles (provincia de Barcelona) y forma parte del equipamiento deportivo del ayuntamiento de Centelles (Figura 9.1).



Figura 9.1. Vista aérea de la ubicación de la piscina en la población de Centelles, Barcelona (Fuente: Google-earth).

El vaso de la piscina, construido en 2000, es de hormigón armado y, hasta la fecha, ha sido objeto de algunos trabajos de reparación, especialmente trabajos de impermeabilización. El vaso de la piscina es una estructura construida en base a un hormigón de tipo HM-25, cuya resistencia característica es $f_{ck}=25\text{MPa}$, y unas armaduras en acero de clase B400S, con una resistencia característica $f_{sk}=440\text{MPa}$.

La estructura del vaso de la piscina consta de una base o losa de cimentación y muros perimetrales. El conjunto ha sido hormigonado con continuidad. Las dimensiones de la planta rectangular de la piscina son 25m de largo por 16,5m de ancho. La profundidad del vaso varía debido a que la base tiene una ligera inclinación (Figura 9.2).

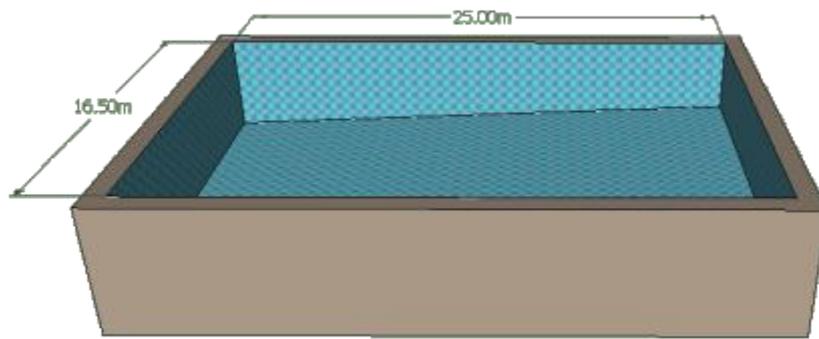


Figura 9.2. Esquema y dimensiones del vaso de la piscina.

La base del vaso, a modo de losa de cimentación, está apoyada directamente sobre el terreno y los muros perimetrales tienen continuidad con la base, de modo que puede considerarse que su elemento de cimentación es la misma losa. Los muros soportan lateralmente todo el peso del trasdós y si la losa tiene algún problema estructural, los muros también podrían estar comprometidos. Efectivamente, si se presentan problemas de filtraciones de agua bajo la base del vaso, las condiciones hídricas del terreno podrían variar y podrían aparecer asentamientos diferenciales en la base del vaso. Estos asentamientos diferenciales afectarían a los muros en el perímetro del vaso y podrían aparecer daños en los mismos.

La base del vaso, o losa de cimentación, es el elemento portante que transmite las cargas por peso propio y agua, asumiendo que trabaja a flexión debido a posibles asentamientos o irregularidades del terreno.

La estructura está comprometida principalmente desde dos puntos de vista: i) Las filtraciones que pueden generar asentamientos diferenciales en el terreno, que pueden, a su vez, generar en el vaso esfuerzos no previstos; ii) Las filtraciones podrían haber alcanzado las armaduras, generando el ambiente propicio para que se genere corrosión. Adicionalmente, los asentamientos diferenciales pueden afectar el desempeño de los muros que cierran el vaso de la piscina.

9.3. Metodología

El objetivo principal del estudio es evaluar el estado de conservación del vaso de la piscina y la presencia de corrosión en la estructura. Los principales problemas visiblemente identificados son: filtraciones de agua y pequeñas grietas.

Para ello se plantea el estudio con antenas GPR. En primer lugar, la capacidad de las mediciones GPR de alta frecuencia para la evaluación de grietas y la detección de corrosión, es un aspecto fundamental al plantear la utilización de estos equipos en el presente estudio. Otros aspectos que hacen conveniente y recomendable esta tecnología son su capacidad para realizar prospecciones no invasivas y no destructivas. Adicionalmente, otra característica a destacar en la aplicación de esta técnica es su capacidad para adquirir una gran cantidad de datos en un tiempo relativamente corto mediante un manejo relativamente sencillo de los equipos de adquisición. Esto permite planificar trabajos de campo y prospecciones que pueden realizarse en pocos días e incluso horas, dependiendo del alcance del estudio.

Para ese estudio se emplea un equipo georradar de registro continuo, manufacturado por la firma MALA. El equipo utilizado consta, básicamente, de dos antenas, cuyas frecuencias centrales son 1600MHz y 500 MHz respectivamente, y un odómetro utilizado para el control de dimensiones durante la toma de datos. Para el procesado de señales se han utilizado dos programas, REFLEX® y GPR Slice (Goodman, 2004).

La antena 500 MHz se ha utilizado para estudiar un sector de la piscina que abarca toda la longitud de la piscina y un ancho de 9.7m (Figura 9.3). La separación de los perfiles de radar ha sido; los primeros 3.2m cada 10cm y los siguientes 6.5m cada 15cm (Figura 9.3a). Con la antena de 1600 MHz se ha estudiado el área restante de la planta de la piscina que no fue prospectada con la antena de 500MHz. En este segundo caso, el sector abarca toda la longitud de la piscina y un ancho de 6.0m. La separación de los perfiles de radar ha sido de 10cm (Figura 9.3b).

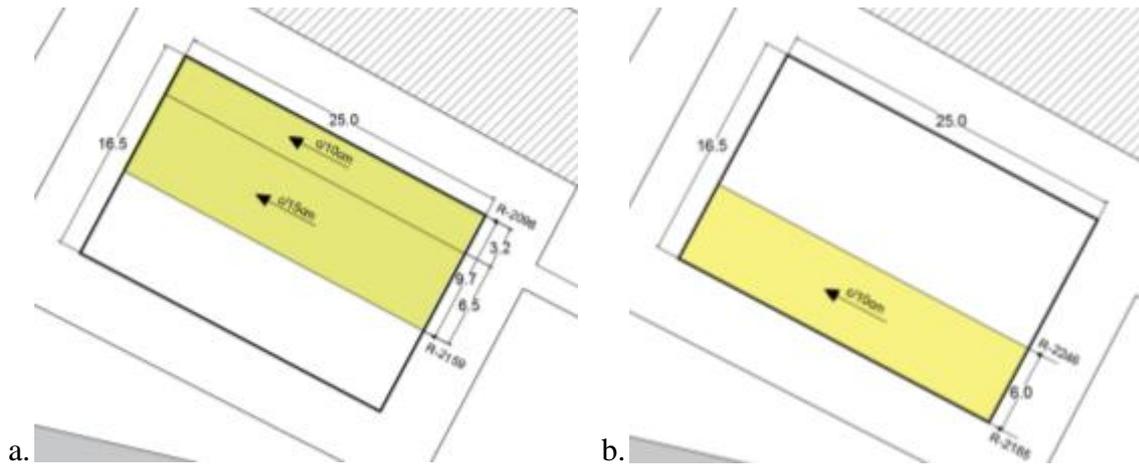


Figura 9.3. Zonas de adquisición de datos en el vaso de la piscina, a) Zona de adquisición Antena de 500MHz, b) Zona de adquisición Antena de 1600MHz.

El procesado de los radargramas, ha sido realizado con el programa ReflexW®. El tratamiento de los registros se ha basado en la aplicación de una secuencia de filtros y tratamientos/acondicionamientos de señal. Se han utilizado: un filtro de banda frecuencial con frecuencias de corte entre 500MHz y 1GHz; un filtro *substrating average*, que utiliza un promediado sobre 10 trazas; un tratamiento *background removal* y un tratamiento de ganancia manual de 4 puntos.

Para el análisis de los radargramas se ha seleccionado uno cada 60cm debido a la cantidad de perfiles, todos a la misma distancia y son los que muestra la Figura 9.4.

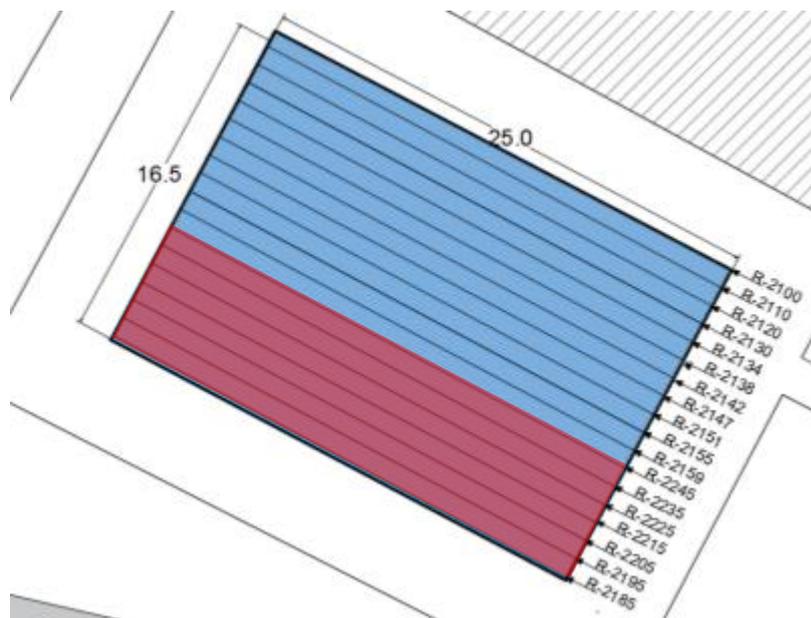


Figura 9.4. Radargramas empleados para el análisis, zona roja, Antena 1600MHz, zona azul antena 500MHz.

Conjuntamente, además del análisis 2D que proporciona el programa ReflexW®, y aprovechando la densidad de datos obtenidos durante la adquisición, se ha efectuado un análisis 3D utilizando el software GPRslice (Goodman, 2004). Para el análisis 3D se parte de perfiles equidistantes. En este caso se han usado todos los perfiles adquiridos con la antena de alta frecuencia de 1600MHz, que es la que permite una mayor resolución con perfiles separados cada 10cm.

Partiendo de estos perfiles el programa es capaz de generar un volumen a partir de la composición de secciones horizontales.

Para ello es necesario introducir en el programa todos los perfiles adquiridos (Figura 9.5). Al disminuir la separación entre señales, se incrementa la nitidez en los cortes o secciones horizontales generadas por el programa.

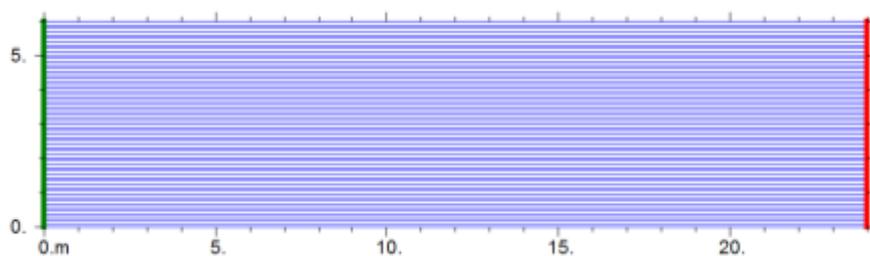
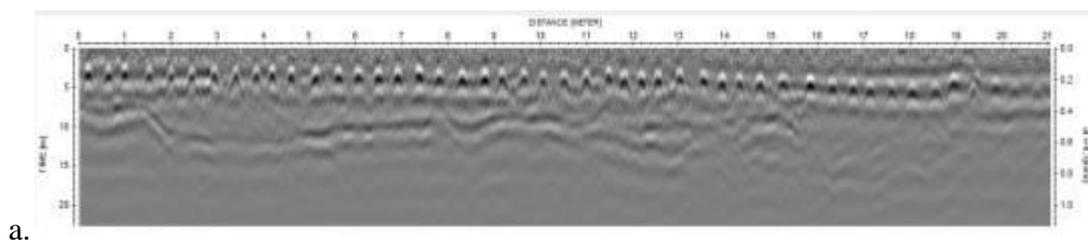
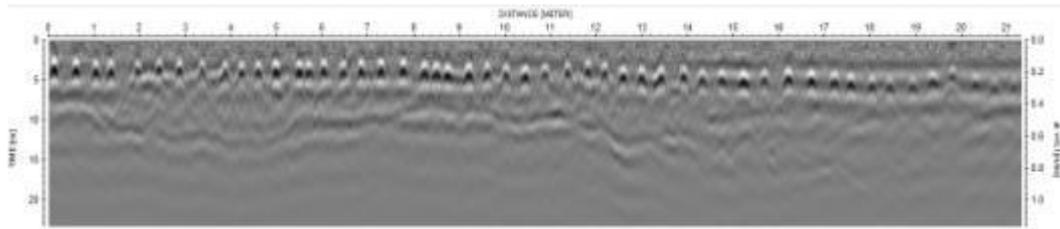


Figura 9.5. Radagramas introducidos al programa GPRslice (Imagen que genera el programa de los perfiles de radar introducidos, en la que se puede observar la alta densidad de perfiles).

9.4. Discusión y análisis de resultados

Pese a que las dos antenas detectan las mismas anomalías, se advierten algunas diferencias. Por ello se analizan los perfiles 2159 y 2245, paralelos entre sí y separados por 20cm. El perfil 2245 fue adquirido con la antena de 1600MHz y muestra con mayor nitidez las armaduras y el contacto con la losa de cimentación (Figura 9.6).





b.

Figura 9.6. Análisis de secciones y comparación de dos radargramas paralelos y separados 20cm. a) Radagrama 2159 registrado con antena de 500MHz, b) Radagrama 2245 registrado con antena de 1600MHz.

Por ello se puede afirmar que las dos antenas empleadas en el estudio son válidas para el análisis de esta estructura. En ambos registros se aprecian, con relativa claridad, las barras de las armaduras y la separación entre las mismas.

Respecto del análisis de las anomalías en los radargramas, dada la densidad de perfiles adquiridos, se analiza un grupo de 4 radargramas consecutivos.

En primer lugar, se analizan los radargramas adquiridos con la antena de 1600MHz, que son los codificados como 2185, 2195, 2205 y 2215. En todos se observan anomalías similares y es posible identificar, con relativa claridad, el armado. En algunos radargramas la apreciación es más clara que en otros (Figura 9.7).

La Anomalía A, que está comprendida en la sección de la longitud del vaso de la piscina que abarca desde los 17.5m hasta los 21m, las armaduras son evidentemente borrosas, difusas y su nitidez es inferior a la que presentan el resto de armaduras que no están comprendidas en esta sección (Zona A, Figura 9.7).

Por otro lado, la superficie de contacto de la losa y el terreno es irregular y es posible distinguir dos anomalías; la Anomalía B se localiza en el contacto de la losa con el suelo, en la sección de la longitud situada entre los 0m y 7m, se observa una línea interrumpida y con profundidad variable (Zona B, Figura 9.7); La Anomalía C, situada aproximadamente entre los 8m y 11m, en la que se aprecia una reflexión más fuerte que el resto en el contacto con la superficie del terreno. Esta reflexión cambia cuando se comparan los 4 radargramas: en los radargramas 2205 y 2215, la reflexión es más clara (Zona C, Figura 9.7c y d), mientras que en el radargrama 2195 la reflexión aparece más puntual (Zona C, Figura 9.7b). Estas diferencias en el plano de contacto con el terreno podrían deberse a un daño considerable en el hormigón. Cuando la interfaz de contacto desaparece parcialmente, las propiedades del suelo tendrían que asimilarse a las del hormigón, es decir, el hormigón tendría que estar degradado.

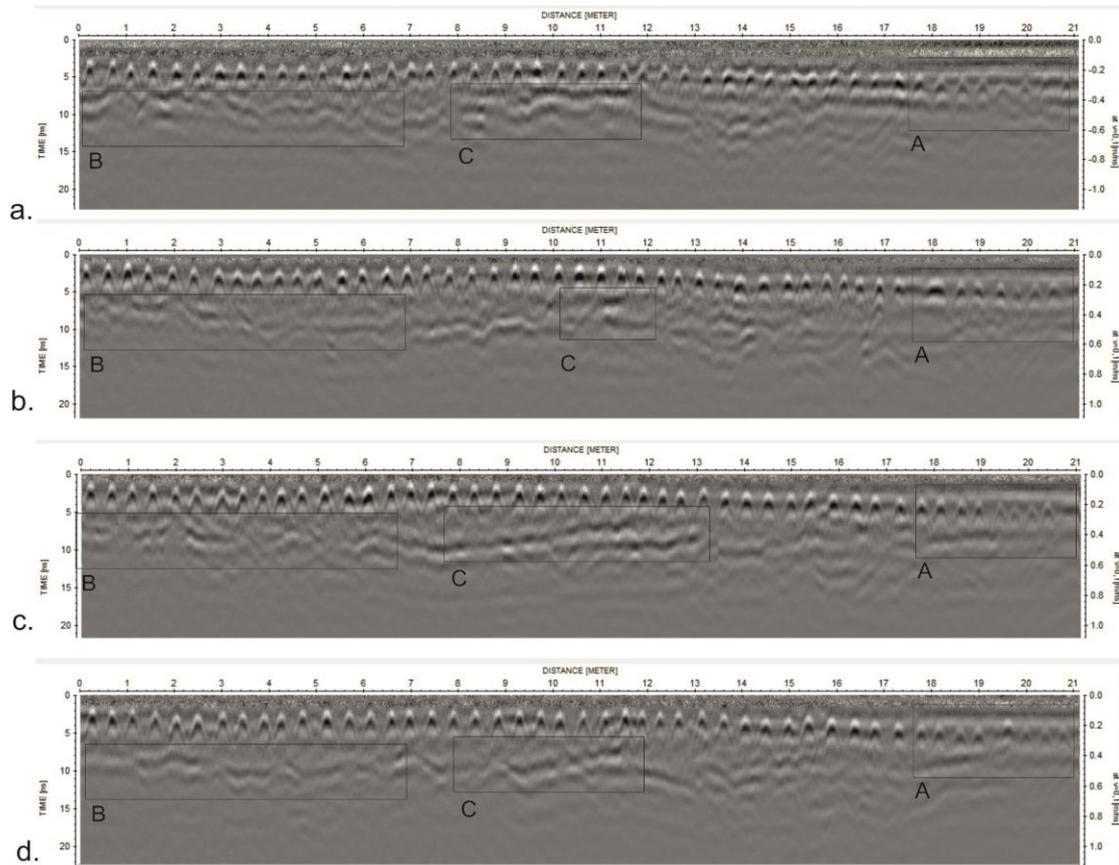


Figura 9.7. Análisis de radagramas y zonificación de anomalías a) Radargrama 2185, b) Radargrama 2195, c) Radargrama 2205 y d) Radargrama 2215.

El análisis de los radagramas adquiridos con la antena 500MHz se ha realizado utilizando los perfiles codificados como: 2155, 2151, 2147 y 2142. En estos perfiles se puede evidenciar que el efecto de la Anomalía A persiste en los últimos metros y se detecta una nueva anomalía, la Anomalía D. En esta anomalía se aprecia, en los primeros 12m, que las barras de la armadura aparecen con un espaciado mucho menor que en los anteriores registros. Este efecto se aprecia solo en los radargamas 2151, 2147 y 2142 (Figura 9.8 b, c, d). Esta menor distancia entre ejes de las barras de la armadura, puede interpretarse como un refuerzo en esta zona del vaso de la piscina.

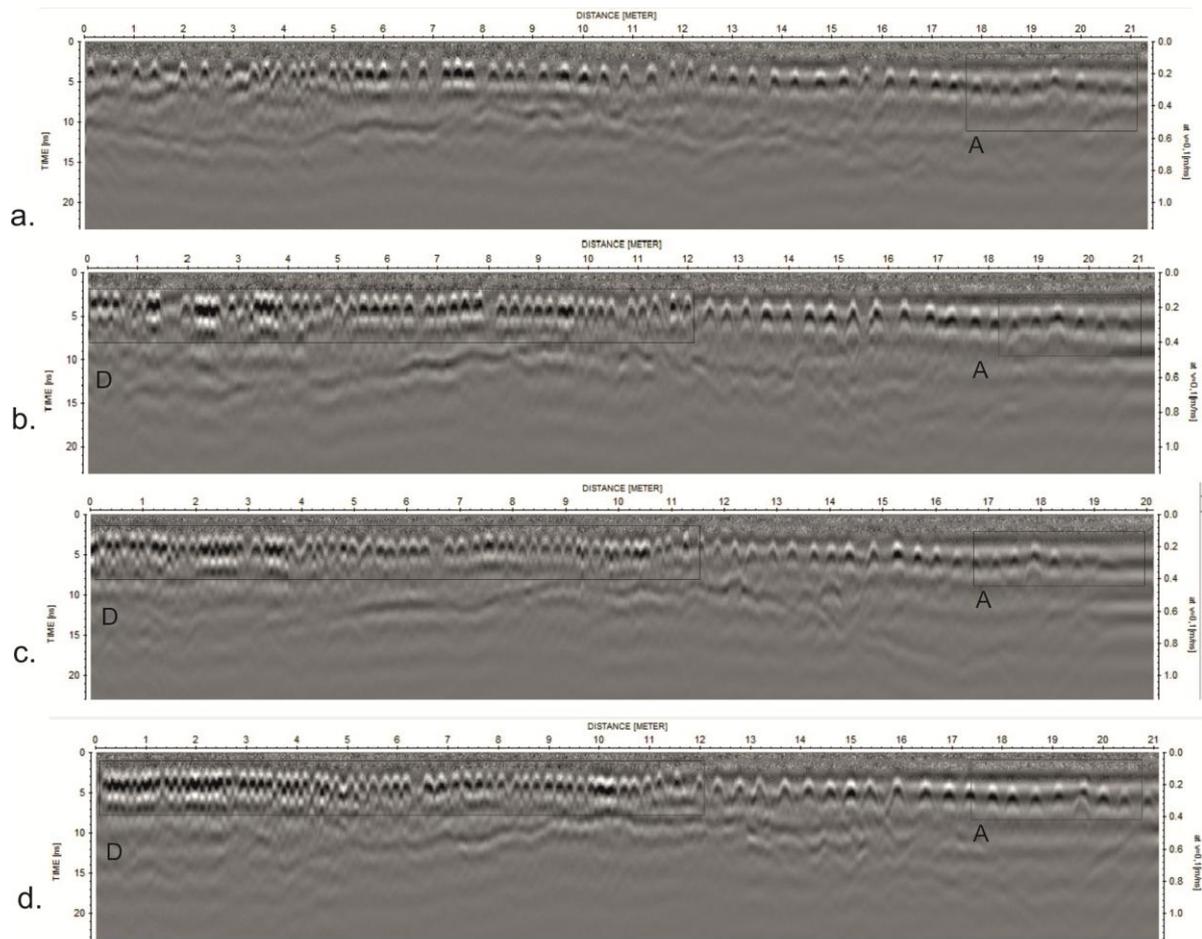


Figura 9.8. Análisis de radagramas y zonificación de anomalías a) Radargrama 2155, b) Radargrama 2151, c) Radargrama 2147 y e) Radargrama 2142.

Utilizando el software GPRslice (Goodman, 2004), se han generado secciones horizontales separadas cada 10cm. El análisis de las secciones permite destacar, a 5cm de profundidad, una reflexión fuerte (Zona A Figura 9.9) que puede corresponder a la primera capa de acero. Esta reflexión es mayor a los 10cm que es la profundidad a la que se estima que se sitúa la armadura superior. La reflexión disminuye en las secciones siguientes hasta alcanzar los 30cm de profundidad donde aún se observa muy levemente la reflexión. Se interpreta que a esta profundidad, presumiblemente se sitúa la armadura inferior (Figura 9.9).

También se puede observar que en secciones situadas a profundidades superiores a los 40cm, las reflexiones son más difusas y podrían corresponder a una capa de hormigón de limpieza que no es estructural pero muy común en losa de cimentación. En este caso, se estima que el espesor de esta capa es de 10cm (Figura 9.9 y Figura 9.10).

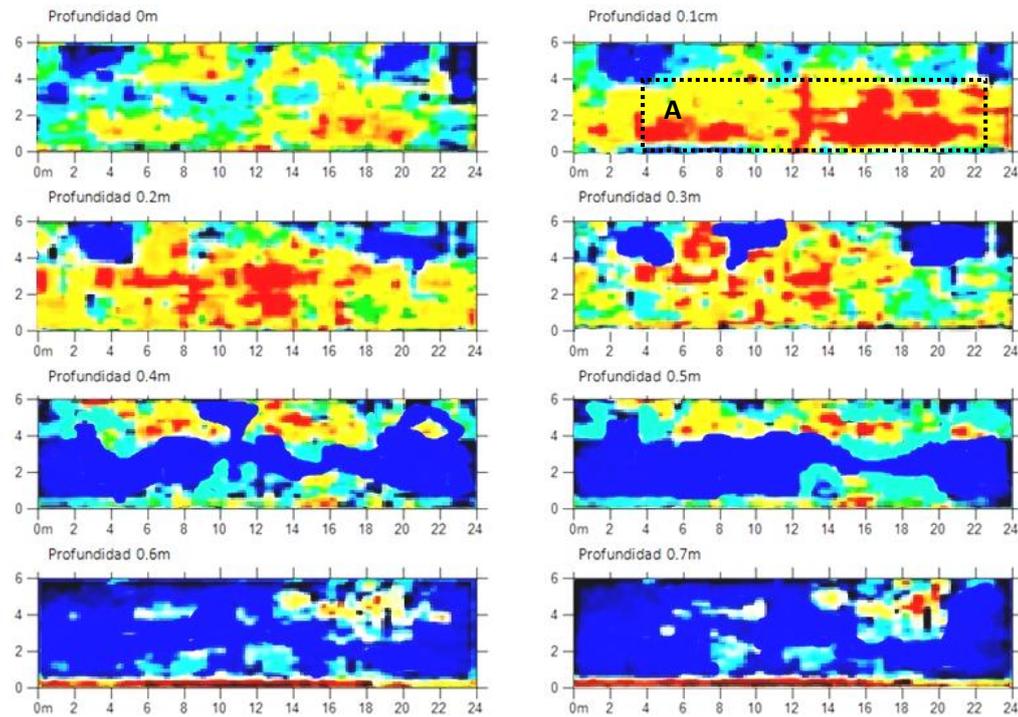


Figura 9.9. Secciones horizontales generadas por el programa GPR Slice, las secciones han sido generadas cada 10 cm a partir de la cota de superficie asumiendo que este es nivel 0, a medida que las secciones avanzan se pueden ver diferentes anomalías.

A partir del análisis realizado con el software GPRsilice (Goodman, 2004), se puede afirmar que la sección geométrica aproximada de la base del vaso de la piscina es la que se detalla en el esquema representado en la Figura 9.10. Esta distribución de elementos y capas están razonablemente corroborados con los análisis 2D realizados con el software ReflexW®.

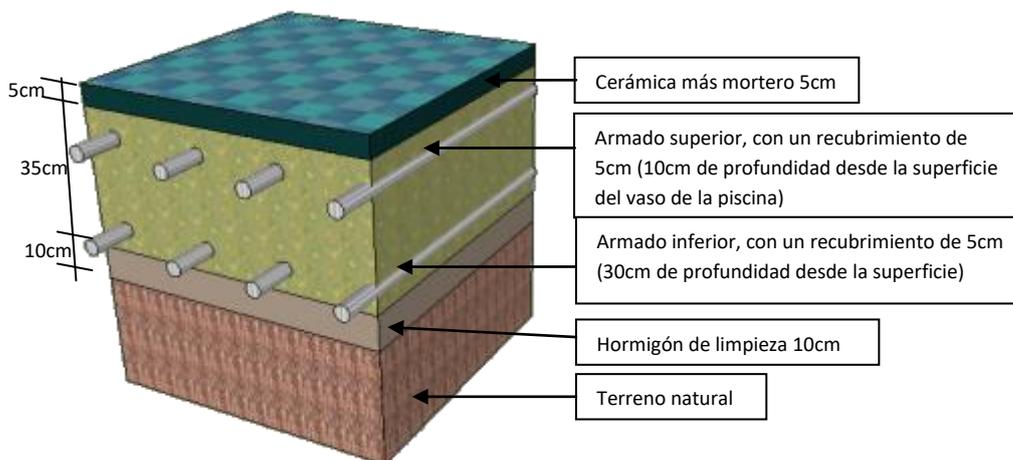


Figura 9.10. Esquema de la sección constructiva de la base del vaso de la piscina.

Para realizar un análisis más gráfico de los resultados se propone un modelo 3D de la base del vaso de la piscina generado a partir de los resultados de la prospección. Para ello se ha utilizado un programa de modelado de información de construcción (*Building information modeling* – BIM) con el que se han posicionado los radargramas más representativos y sobreponiendo las barras de las armaduras y los cambios de material encontrados, se ha podido generar el modelo en 3 dimensiones de la base del vaso de la piscina (Figura 9.10).

En este proceso quedan evidenciadas de forma bastante clara las armaduras que atraviesan transversalmente al perfil y la zona de contacto del fondo del vaso con el terreno.

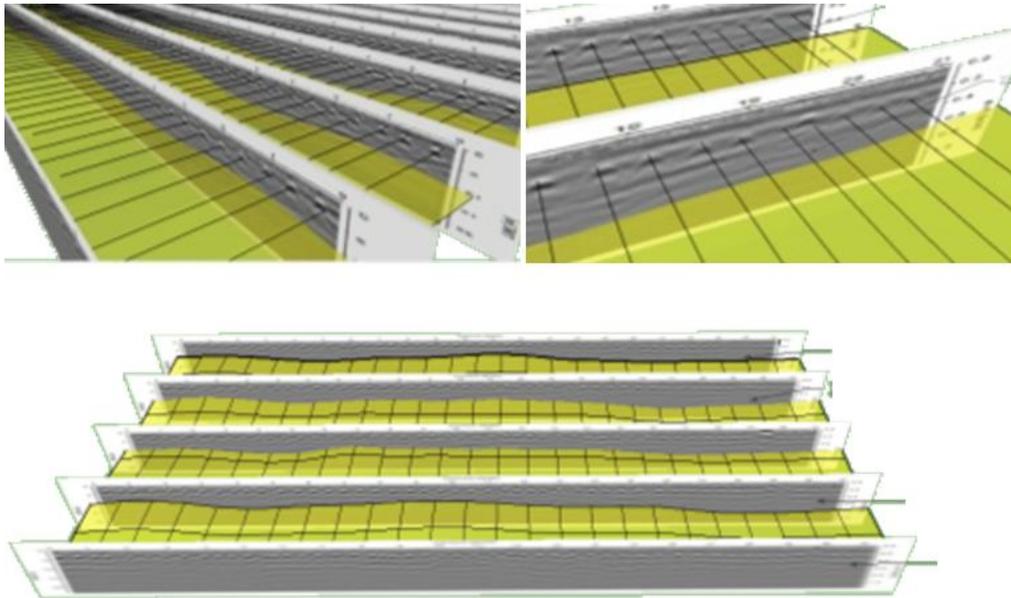


Figura 9.11. Reconstrucción 3D a partir de los radargramas más representativos.

9.5. Conclusión

Se ha podido corroborar que la tecnología de georradar (GPR) es muy practica para este tipo de trabajos dada la rapidez en la prospección y sus características como técnica no invasiva y no destructiva. El análisis de los radargramas ayudó a definir los espesores de las capas que conforman la base del vaso de la piscina, e incluso permitió determinar, aproximadamente, la profundidad de las armaduras superior e inferior.

Se ha identificado un efecto asociado a la presencia de corrosión en las armaduras situadas en los últimos 3-4m de la base del vaso, zona que coincide con la parte más baja de la base (ya que esta se diseñó con una ligera inclinación). La hipótesis principal consideraba filtraciones o pérdidas de agua, este hecho ratificaría la corrosión en la parte baja de la piscina.

En todos los radargramas analizados se pudo detectar el cambio de superficie entre el hormigón y el terreno bajo la base del vaso, pero este cambio no es uniforme en toda la longitud de la piscina. Se puede afirmar que en el tramo situado entre los 15 a 25 metros tiene un efecto de menor claridad, lo que podría indicar daño en el hormigón, saturación del suelo o asentamientos diferenciales.

En una zona central de la losa, los 12 primeros metros (Anomalía D), se puede observar que la separación de las barras de la armadura disminuye respecto de otras áreas, esto es interpretado como un posible refuerzo localizado.

En todos los radargramas, a partir de los 17 metros y hasta el final de la longitud de la piscina, se observan barras borrosas y difusas. Este efecto, por la experiencia adquirida en trabajos anteriores, podría ser indicativo de la presencia de corrosión en las barras de las armaduras situadas en esta zona.

El uso de dos antenas de diferentes frecuencias centrales (500MHz y 1600MHz), ha permitido verificar la validez de las dos antenas para este tipo de estudio. No obstante, y tal y como cabía esperar, la antena de alta frecuencia (1600MHz) proporcionó radargramas más nítidos, especialmente cuando el objeto era la detección de las barras de las armaduras.

El análisis por secciones horizontales, ha permitido reconstruir la geometría de la base del vaso y el posicionamiento de las barras de las armaduras superior e inferior. Esta reconstrucción ha sido más difícil de realizar utilizando herramientas de análisis 2D.

Se ha encontrado indicios de corrosión en una zona específica, un método de reparación podría ser la pasivación de armaduras como una solución inicial para controlar la corrosión.

CAPITULO 10- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

CAPITULO 10- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

10.1. Conclusiones particulares de cada análisis

Las conclusiones particulares se estructuran por capítulos. Para ello se han resumido los resultados obtenidos en cada capítulo y se detalla la contribución de los mismos a los objetivos propuestos en este trabajo de tesis.

10.1.1. Ensayos de laboratorio para calibración

Los ensayos de laboratorio consistieron en la calibración de la antena de 1600 MHz. Esta antena ha sido la utilizada en los ensayos posteriores de laboratorio para analizar daños por corrosión. También ha sido una de las empleadas en los trabajos sobre elementos estructurales tanto en laboratorio como en campañas de prospección en estructuras civiles y en edificios pertenecientes al patrimonio arquitectónico de Barcelona, incluidos en esta tesis. Los primeros ensayos sirvieron para conocer los equipos, sus limitaciones y capacidades, y para mejorar la forma de adquisición de datos. Por otro lado, los ensayos iniciales se utilizaron para preparar y planificar los trabajos siguientes de laboratorio. Aspectos como la selección del tamaño de probetas, los diámetros mínimos de las armaduras de acero, la separación mínima de redondos de acero en armaduras y los efectos de contorno, se han analizado y determinado mediante los resultados obtenidos en este capítulo. Los resultados obtenidos permiten determinar que las separaciones de barras inferiores a 5 cm no permiten discriminar en los radargramas las anomalías producidas por la reflexión en las barras debido a un efecto de acoplamiento. Este efecto está limitado por la resolución de la señal a cada profundidad y depende de las propiedades electromagnéticas del medio, de la longitud de onda de la señal y de la huella de la antena. Respecto al diseño de las probetas, aunque es deseable que las probetas pueden ser pequeñas y manipulables, no se pueden reducir excesivamente por dos motivos principalmente: 1) la superficie de la probeta sobre la que se adquieren los datos debe ser lo suficientemente grande para que los efectos de contorno sean mínimos, reconocibles e interfieran poco con las señales correspondientes a elementos (barras) embebidos en las probetas; 2) el grosor de las probetas debe ser suficiente como para que la reflexión en el elemento embebido no se solape con la primera llegada (debida al acoplamiento de la onda directa con la reflexión

en la superficie) ni con la onda reflejada en la superficie posterior de la probeta. Por tanto, es necesario que las probetas tengan un tamaño mínimo para evitar estos efectos no deseados. Además de considerar el tamaño de cada probeta, en ensayos de laboratorio, siempre y cuando sea posible, es adecuado realizar mediciones utilizando medios adecuados y suficientemente extensos para la adquisición de datos y para evitar efectos de contorno. Disponer de bancadas extensas de arena, i.e. medios extensos uniformes, en las que también son controlables la temperatura y la humedad, ayuda a la realización de pruebas y ensayos en los que los efectos de contorno disminuyen y se pueden controlar mejor. Los ensayos demuestran también la importancia de la calibración preliminar de los equipos antes de proceder a la adquisición de datos en trabajos de campo.

10.1.2. Ensayos laboratorio para analizar la corrosión

Para el estudio de la corrosión en elementos estructurales mediante georadar, se diseñaron dos campañas experimentales con objetivos complementarios.

- En una primera campaña de laboratorio, el objetivo planteado consistió en determinar la capacidad de la tecnología GPR para la detección de la corrosión en elementos metálicos embebidos en hormigón. Para ello, en el Test A se utilizaron dos probetas de hormigón. En una primera probeta se insertó una barra metálica sana y, en una segunda probeta, se embebió una barra previamente corroída (esta barra estaba corroída previo al hormigonado de la probeta). En ambos casos se realizaron mediciones tras el curado del hormigón y las medidas se realizaron sobre el hormigón sano. Con este análisis pudo observarse que los registros de radar presentan cambios aparentes en las señales procedentes de las barras corroídas, comparadas con las procedentes de las barras sanas, de manera que permiten distinguir entre barra sana y barra corroída, cuando el hormigón que envuelve los elementos metálicos todavía no presenta alteraciones ni daños. Los ensayos permitieron concluir que las evaluaciones no destructivas mediante georadar permiten distinguir entre material corroído y material sano aún cuando el relleno de la probeta (hormigón) todavía no ha sido afectado, física y químicamente, por la corrosión de los elementos embebidos.

En la segunda campaña de laboratorio, el objetivo principal era el determinar la capacidad del georadar para distinguir, de forma cualitativa y cuantitativa,

diferentes estados de corrosión en metal embebido en un medio de baja conductividad y diferentes estados de alteración y daño del hormigón. Para alcanzar este objetivo se elaboraron probetas de hormigón armado con diferentes grados de corrosión en sus armaduras. Los equipos GPR se utilizaron para identificar y analizar los diferentes grados de corrosión en el acero y para verificar si la degradación del hormigón, a medida que el grado de corrosión avanza, puede ser detectada a partir de las señales recibidas y de las imágenes en los radargramas. En el Test B se han utilizado cuatro probetas que han pasado por un proceso de corrosión en ambiente controlado durante diferentes intervalos temporales. El mayor grado de corrosión se obtuvo mediante el proceso forzado. De este modo, los elementos de cada conjunto armadura-probeta de hormigón, envejecieron conjuntamente en los cuatro casos. Los resultados obtenidos a partir del análisis de las señales de georadar indican que esta tecnología es capaz de identificar la corrosión y discriminar diferentes etapas de su desarrollo. Un análisis comparado de los radargramas correspondientes a mediciones sobre probetas con diferentes grados de corrosión, permite detectar diferencias razonables que pueden discutirse cualitativa y cuantitativamente. A mayor tiempo en las cámaras de curado (ambiente controlado) se incrementa el grado de corrosión de las probetas y los efectos detectados en los radargramas se incrementan. En el Test B se observa que el cambio es mínimo, posiblemente por el corto tiempo que pasaron las probetas por el proceso de corrosión (de 3 a 12 meses). En situaciones de exposición real de estructuras a un ambiente determinado y durante varios años, la corrosión debería evidenciarse de forma mucho más clara si se compara con los resultados de laboratorio obtenidos con las probetas utilizadas en esta tesis. En este caso, las limitaciones de tiempo en el trabajo de tesis se imponen. En el test B, al igual que en el Test A, estos resultados se verificaron cualitativamente por análisis y comparación de resultados. Las barras con corrosión mostraban un efecto cualitativo de dispersión (*scattering*) y difusión en los radargramas. Pero el análisis de amplitudes permitió observar que el coeficiente de atenuación se relaciona directamente con el grado de corrosión. Los valores más altos de este coeficiente se observaron en las probetas que habían estado sometidas durante un período de tiempo más prolongado (12 meses) al proceso de corrosión en ambiente controlado (cámaras de curado).

A nivel cualitativo ambos Tests A y B, demuestran que la presencia de corrosión conlleva cambios en la señal registrada que quedan reflejados directamente en los radargramas. Parece confirmado que el efecto de difusión que se observa en los radargramas es un indicativo de la existencia de corrosión, por el efecto de dispersión (*scattering*) que genera la superficie de óxido de hierro de las barras en la señal. Estos resultados son coherentes con los trabajos publicados en investigaciones anteriores.

A nivel cuantitativo se realizó un análisis numérico identificando parámetros propios de la señal (A-scan) que se alteran con la corrosión. Se determinó que las amplitudes parecen ser claves para identificar y cuantificar este fenómeno. Los resultados presentados parecen indicar que el coeficiente de atenuación es un indicador clave para cuantificar el grado de corrosión. Los resultados indican, razonablemente, es posible un análisis cuantitativo de la corrosión, por medio del análisis comparado de la atenuación de amplitudes de los A-scans en muestras con diferentes grados de corrosión.

10.1.3. Caso de estudio de la basílica de Santa María del Pi

La basílica de Santa María del Pi forma parte del patrimonio arquitectónico de Barcelona. Se trata de una construcción de arquitectura gótica, cuya tipología constructiva es la mampostería y sillería no reforzadas y cuyos inicios se remontan al siglo XV. La detección, mediante técnicas no destructivas, de patologías y daños en diferentes elementos y zonas de la basílica, esto incluye elementos constructivos y el terreno, y la prospección orientada a mejorar el conocimiento de la composición interna de estructuras ocultas o inaccesibles han sido el objeto de este trabajo.

En el caso de la cubierta de la basílica, utilizando tecnología de georadar, se han localizado áreas en las que la humedad supone una vulnerabilidad para el edificio. El análisis comparado de radargramas permitió identificar zonas de alto contraste que se asociaron con la presencia de agua en el medio. Se ha generado un mapa localizando las áreas en las que se sitúan las anomalías. En general, las anomalías estaban ubicadas alrededor de los sumideros que conectaban con los bajantes pluviales de la cubierta. La conclusión de esta prospección es la hipótesis que presenta algunos taponamientos y colmataciones en los bajantes pluviales como origen o causa de una deficiente estanqueidad del sistema de desagüe de aguas pluviales en cubierta.

La prospección GPR en la cubierta también ha permitido describir la estructura interna de la cubierta. Cabe destacar las prospecciones realizadas en el área comprendida en las intersecciones de las bóvedas. Estas prospecciones han aportado información sobre la estructura de los rellenos y la existencia de elementos internos ocultos en algunos casos, e inaccesibles en otros, y sobre los que no se disponía de información documentada.

Por otro lado, se ha combinado la técnica del georadar con la metodología del coeficiente espectral H/V en prospecciones del subsuelo de la basílica. Esta combinación de técnicas permite complementar el análisis de la capacidad portante del subsuelo y su influencia en el comportamiento de los muros, columnas y otros elementos de apoyo de la basílica. Las fisuras y grietas observadas en algunos muros, se han podido asociar a probables asentamientos diferenciales del apoyo de los muros ocasionados por la variabilidad de la capacidad portante del suelo bajo la basílica. A partir del estudio del subsuelo, utilizando el método del coeficiente espectral H/V, se han podido identificar las zonas de relleno por la variabilidad lateral de los máximos valores de resonancia del terreno y su proximidad a los periodos $T=0,1s$. Los resultados relativos a los cambios laterales se han recogido en un mapa a partir del cual es posible inferir que la mayor parte del edificio se apoya en terreno consolidado. Existen pequeñas zonas situadas en el interior de la basílica y cuyas anomalías asociadas parecen indicar zonas de relleno, pero que no representan un problema estructural dado que no se corresponden con apoyos de columnas o muros. No obstante, este estudio ha permitido identificar una zona vulnerable y a la que las autoridades deberán prestar especial atención en un futuro. La esquina norte de la basílica está afectada por un patrón de grietas en el suelo y fisuras en los muros que pueden ser compatibles con moderados asentamientos diferenciales del terreno. Los resultados obtenidos a partir de la técnica del coeficiente espectral muestran, en esta zona, variaciones laterales en el terreno compatibles con zonas poco consolidadas que podrían corresponder a áreas de relleno.

10.1.4. Caso de estudio de la basílica Santa María del Mar

La basílica Santa María del Mar es un edificio gótico que forma parte del patrimonio histórico-artístico de Barcelona. Está construida mediante sillería de piedra arenisca extraída de Montjuic. Desde el exterior su aspecto es macizo y robusto. Sin embargo, el

interior es un espacio de tres naves de aspecto diáfano gracias a las esbeltas columnas separadas 15 m entre sí.

El edificio ha sufrido importantes daños desde su construcción. Su estado actual muestra algunas grietas y una previa inspección visual determinó la existencia de daños. El estudio mediante ensayos no destructivos tuvo como objetivos el localizar daños internos y conocer características estructurales para aportar información para un posterior cálculo estructural. Se realizó mediante georadar, tomografía sísmica y sísmica pasiva. La cubierta se estudió mediante georadar. Para las columnas se combinaron los estudios con georadar y con tomografía sísmica. El suelo de la basílica también se analizó mediante prospección con georadar. Y, finalmente, el análisis dinámico de la estructura en conjunto y de diferentes partes se realizó utilizando técnicas de sísmica pasiva.

.

El estudio de la cubierta proporcionó radargramas en los que se podían observar anomalías con forma de hipérbola situadas en partes concretas de los registros y organizadas por capas de forma equiespaciada. Estas anomalías indicaban la existencia de sectores en los que los materiales constructivos eran elementos huecos, posiblemente cerámicos. Estos sectores se situaban en las zonas de mayor espesor de materiales. La hipótesis es que se habían utilizado para reducir las cargas de la cubierta transmitidas a las esbeltas columnas.

El estudio de las columnas mediante georadar y tomografía sísmica permitió determinar la organización interna de los sillares. Las imágenes de tomografía sísmica muestran la existencia de una piedra cuadrada en el centro de la columna octagonal y cuatro sillares, adaptados a la forma octogonal de la columna, a su alrededor. Por otro lado, en los radargramas pueden observarse anomalías que indican que la piedra cuadrada central gira 45° en cada fila, respecto de la fila anterior. Respecto a los daños, en las imágenes de georadar se observaban algunas anomalías que podían corresponder con pequeñas concentraciones de grietas o con despegues en el interior de la columna, mientras que en las imágenes de tomografía sísmica se observan zonas de baja velocidad, correspondientes a juntas entre sillares y también a zonas dañadas, ya que las velocidades de las ondas sísmicas están directamente relacionadas con la densidad y homogeneidad de los materiales.

El estudio del subsuelo, realizado con georadar, ha revelado la existencia de posibles tumbas y restos de edificios dentro y fuera de la fachada principal.

Respecto al comportamiento dinámico de la estructura, se ha observado que los periodos son similares en distintas partes, lo que indica una buena integridad de la estructura. Se han observado, no obstante, dos modos longitudinales en el análisis de la torre que muestran características particulares. El motivo puede ser la asimetría de la estructura. En el caso de la fachada, aunque a la misma frecuencia, aparece un doble pico característico debido a la existencia de una grieta de gran tamaño. Finalmente, el estudio del subsuelo mediante sismica pasiva demuestra la existencia de un suelo muy blando debajo de la fachada principal de la basílica, por lo que pueden esperarse asientos diferenciales.

10.1.5. Caso de estudio del parque Güell

El parque Güell es complejo de jardines y edificaciones de estilo modernista diseñado por Antoni Gaudí, declarado en 1984 patrimonio de la humanidad. El conjunto tiene una plaza principal de 2.000m² circundada por bancos irregulares adornados mediante mosaicos de cerámica rota que simulan un dragón. Esta plaza se sitúa encima de la sala hipóstila. La losa bajo la plaza se sustenta mediante columnas y bóvedas decoradas con rosetones y también recubiertas de mosaico de cerámica rota. Debajo de la sala hipóstila hay un depósito para aguas pluviales que se adapta a la topografía irregular del terreno. Las aguas se recogen en el centro de la plaza principal y se dirigen hacia el depósito mediante canalizaciones metálicas embebidas en el interior de las columnas centrales de la sala hipóstila.

A lo largo de su vida útil, en las estructuras de la plaza y de la sala hipóstila han aparecido daños, principalmente relacionados con la durabilidad de los materiales que se han ido deteriorando. Aunque se han realizado varias restauraciones, en la actualidad se aprecian pérdidas del recubrimiento de cerámica y grietas en el techo de la sala, y son habituales las filtraciones de agua. En 1987 se reparó el mosaico y se impermeabilizó el suelo de la plaza. Sin embargo, se han vuelto a producir inundaciones y filtraciones en la sala hipóstila, de manera que la principal causa de daño observado en las bóvedas y en los recubrimientos cerámicos es el agua y, más específicamente, los problemas relacionados con el sistema de drenaje.

El estudio no destructivo se realizó en dos sectores: la plaza y el techo de la sala hipóstila. El objetivo era determinar la estructura interna de la losa y localizar zonas que pudieran estar dañadas. La losa es de hormigón y está reforzada con elementos metálicos, aunque en la época no existía una normativa. Las filtraciones de agua, junto con la alta porosidad y un pH muy bajo del hormigón utilizado han podido favorecer la corrosión de los elementos de refuerzo. La inspección mediante georadar ha permitido localizar las barras metálicas y obtener imágenes tridimensionales del interior de la losa, de los refuerzos y de las bóvedas. En varios de los radargramas se observa un sector en el cual las anomalías asociadas a las reflexiones en los refuerzos metálicos se observan muy atenuadas, presentando en esa zona una imagen muy difusa. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en los ensayos realizados en probetas de hormigón armado. La corrosión de algunas armaduras producía unas imágenes difusas con una mayor atenuación de la señal. La zona a la que corresponden estos sectores de menor amplitud en los radargramas es la parte central de la plaza, justo en la que se sitúan los bajantes para recoger agua pluvial.

Por otro lado, en los registros obtenidos se observa también un cambio de velocidad de la onda en la zona afectada. Este cambio de velocidad puede estar ocasionado por el mayor contenido de agua en el tramo dañado. El análisis de velocidad se ha realizado estudiando la pendiente de los brazos de las hipérbolas generadas en las barras de refuerzo.

Como conclusión general puede decirse que, aunque no se descarta que todas las barras pudieran presentar un cierto grado de corrosión, los resultados indican la existencia de una zona que aparentemente está más afectada que el resto.

El estudio del techo de la sala hipóstila ha permitido concluir que no existen despegues ni grietas importantes. Se ha podido determinar también el sistema de sujeción de las rosetas, mediante ganchos metálicos anclados en la losa.

10.1.6. Caso de estudio de la piscina Municipal

El caso de estudio de una piscina municipal ha sido el único caso de estudio dedicado a una estructura no patrimonial. Se trata de una estructura civil diseñada recientemente. Por tanto, en su diseño, y a diferencia de lo que sucede con los restantes casos de estudio dedicados a edificios históricos, se han considerado todas las prescripciones de códigos y normativas vigentes o de vigencia muy reciente. Más específicamente, el interés de este caso de estudio es la estructura de hormigón armado que corresponde al vaso de la piscina y la oportunidad que ofrece de abordar el estudio de la corrosión en armaduras para una estructura real de hormigón armado. De este modo, se ha podido aplicar la metodología de análisis desarrollada en los ensayos diseñados en laboratorio y que ya han sido presentados en este trabajo de tesis.

El caso de estudio se realiza utilizando dos antenas con diferentes frecuencias centrales: 500 MHz y 1600 MHz. Las antenas fueron calibradas y probadas en ensayos de laboratorio, de modo que se consideraron adecuadas para las características y geometría de los elementos de hormigón armado que componen el vaso de la piscina.

En este caso se ha realizado un análisis cualitativo de los radargramas y se han podido identificar efectos similares a aquellos obtenidos en el caso de estudio del Parque Güell y en los ensayos de laboratorio. Sobre la base de aquellos resultados, se confirma la presencia de corrosión en una zona del vaso de la piscina.

Es interesante realizar una comparación de los resultados de los dos últimos casos de estudio propuestos en este trabajo de tesis, *i.e.* Parque Güell y piscina Municipal. En ambos casos, siendo diferentes las técnicas y materiales constructivos y las normativas de diseño prescritas para cada caso, la metodología propuesta en este trabajo de tesis es capaz de detectar la presencia de corrosión en armaduras y otros elementos metálicos.

En el caso de estudio del Parque Güell, la estructura estudiada tenía más susceptibilidad a la corrosión por una combinación desfavorable de dos circunstancias: i) El hormigón utilizado en su construcción tenía un índice pH bajo; ii) La relativa cercanía al mar causa que el conjunto sea más sensible a la corrosión.

En el caso de estudio de la piscina, la losa de cimentación del vaso soporta filtraciones de agua con lo que las armaduras y el propio hormigón quedan expuestos a la corrosión, particularmente en la base del vaso que es el área hacia la que el agua se desplaza por gravedad. Se puede observar que esta localización del daño por corrosión es común a

ambos casos de estudio. En el caso del Parque Güell, el daño se concentra en armaduras y elementos metálicos situados en la parte central de la losa, probablemente debido a un posible taponamiento de las bajantes pluviales.

En los dos casos de estudio se han realizado análisis cualitativos de los radargramas a partir de los cuales se pueden inferir observaciones que pueden ser útiles como indicadores prácticos para la interpretación de patologías asociadas a la corrosión. De estos indicadores cabe destacar:

- La difusión y el efecto de dispersión (*scattering*) se observan en los radargramas de ambos casos de estudio. Estos efectos también fueron observados en los ensayos de laboratorio y contrastados con otros autores.
- En el caso de estudio del Parque Güell aparece un efecto interesante en los brazos de las hipérbolas correspondientes a las barras del armado. Estas hipérbolas tenían los brazos más abiertos, lo que es un indicativo de una mayor velocidad a la cual se refleja la onda. En tecnología de georadar, la velocidad de reflexión de la onda se puede medir a través de los brazos de las hipérbolas, de modo que, a mayor apertura de los brazos, mayor velocidad de las ondas. En la piscina este efecto ha sido más difícil de identificar, debido a que la separación de barras era más reducida, efecto que reduce la calidad de la imagen
- En los dos casos de estudio se pudo detectar un leve desnivel de las barras que presentaban corrosión. No es posible asegurar que esta observación esté correlacionada con la patología por corrosión debido a que se desconoce cómo fueron hormigonadas estas barras. No obstante, es una circunstancia que cabe resaltar.

10.2. Conclusiones Generales

La tesis ha abordado el análisis de patologías con georadar, centrando el análisis en el estudio de la corrosión en el hormigón armado.

En el caso de daños de corrosión se ha realizado un análisis cualitativo y un análisis cuantitativo:

- a) El análisis cualitativo demuestra que la corrosión en elementos de hormigón produce una atenuación de la señal, de manera que en los radargramas las

anomalías se observan con mucha menor amplitud. Por otro lado, en la zona se produce un efecto de dispersión de energía que se visualiza en los B-scans como una zona más difusa o borrosa. Estos resultados se han observado tanto en experimentos controlados en laboratorio como en estudios de campo en edificios históricos con elementos metálicos embebidos (caso de estudio del parque Güell), como en estructuras modernas de hormigón armado (caso de estudio de la piscina).

- b) El análisis cuantitativo ha permitido plantear una prometedora metodología para la detección de corrosión, que permite estimar el grado del daño. Esta metodología se basa en la atenuación de la señal, mucho más importante en el caso de zonas en las que existen elementos metálicos corroídos. La atenuación se analiza mediante el coeficiente o factor de atenuación. Se ha observado una correlación entre este factor de atenuación y el grado de corrosión de las armaduras. Los resultados se han observado en ensayos controlados de laboratorio. En el caso de estudios de campo no se ha podido comprobar esta relación debido a que los radargramas presentan anomalías diversas debidas a distintas causas, que se superponen con los registros de interés. Por otro lado, son necesarios más ensayos de laboratorio para poder determinar una relación empírica que pueda resultar de utilidad en estudios de campo.

En el caso de estudios generales de construcciones, se ha observado que se trata de un método que resulta muy útil para determinar elementos constructivos ocultos y la estructura interna de partes de las edificaciones. Las imágenes permiten reconstrucciones tridimensionales que permiten obtener modelos internos de las estructuras, aunque en algunos casos se necesitan técnicas complementarias para poder extraer conclusiones finales. Es el caso del estudio de las columnas de la basílica de Santa María del Mar, en el que los análisis de tomografía sísmica permitieron conocer la forma interna y la disposición de los sillares, mientras que los de radar fueron cruciales para determinar cómo iba rotando el sillar interno de una hilera de piedra a la siguiente.

La obtención de estos modelos estructurales es de gran interés para los cálculos estructurales necesarios de cara a una rehabilitación. Por ejemplo, los resultados con georadar han demostrado la existencia de elementos constructivos huecos de gran

tamaño, que hacen que las cargas transmitidas a las columnas sean mucho menores que las esperadas en el caso de una estructura de la cubierta maciza.

La técnica también es de gran utilidad para la detección de daños debidos a grietas o a despegues. Conviene, no obstante, cotejar los resultados con los obtenidos mediante otros métodos o con testigos extraídos en zonas puntuales de las estructuras, como por ejemplo en el estudio del techo de la sala hipóstila del parque Güell, en el que se compararon los radargramas con la información que proporcionaban los testigos. Otro ejemplo es el caso de las columnas de la basílica de Santa María del Mar. En los radargramas se observan pequeñas anomalías. Al comparar los registros con la información que proporciona la tomografía sísmica se puede observar que en esas zonas se produce una disminución de la velocidad de la onda sísmica, relacionada con la calidad de la piedra.

El análisis de velocidades de propagación de las señales de georadar también permite conocer cambios en el contenido de agua del medio. Estos cambios se observan en el caso del estudio de la plaza del parque Güell. Los cambios de pendiente de las ramas de las hipérbolas generadas en la reflexión sobre las armaduras permiten situar zonas con velocidades anómalas que se pueden corresponder con zonas de mayor humedad. El cambio de amplitud de la señal reflejada también se relaciona con una mayor humedad, como se observa en el estudio de la cubierta de Santa María del Pi.

Concluyendo, se ha observado la aplicabilidad del método en el estudio de patologías estructurales, aunque debe recomendarse el combinar los resultados obtenidos con georadar con los de otras técnicas o incluso con datos de testigos o sondeos. En el caso de daños por corrosión, los resultados son prometedores y apuntan hacia una relación empírica entre el coeficiente de atenuación y el grado de daño.

10.2. Futuras líneas de estudio

Como en cualquier trabajo de investigación, quedan muchas líneas abiertas que se pueden explorar en un futuro. Algunas de ellas son:

- Continuación de los ensayos de laboratorio para analizar el efecto de la corrosión en los registros de georadar. Para ello se deberían diseñar nuevos experimentos que

incluyan la obtención de datos diarios de probetas sometidas a corrosión forzada durante como mínimo un año. Esto permitiría analizar estadísticamente los cambios en la amplitud de la señal reflejada. En otros ensayos se podrían construir probetas de mayor tamaño para disminuir aún más los efectos de contorno. También puede ser interesante diseñar nuevos ensayos con casos más complejos, añadiendo más variables al análisis: incrementar el número de barras o superponer más de una capa de refuerzos. De esta forma se tendrán casos más parecidos a las estructuras reales de hormigón armado.

- El estudio de la atenuación de la señal debería continuarse con más medidas, para obtener una relación empírica entre el factor de atenuación y el grado de corrosión. También podría realizarse el análisis con diferentes tipos de hormigón, para determinar si la relación empírica cambia de un tipo a otro.
- Desarrollo de programa informático de reconocimiento de patrones para localizar elementos estructurales comunes y elementos que pueden asociarse con daños. Para ello puede ser necesario una primera etapa en la que se realice un catálogo de imágenes de radar asociadas con cada uno de los daños considerados y con cada elemento estructural. En estas imágenes se deberían determinar los parámetros que pueden ser indicativos.
- Realizar un análisis en el dominio frecuencial y observar el comportamiento de la frecuencia en el caso de las patologías más comunes: corrosión, humedad y zonas de grietas.

TRABAJOS DERIVADOS DE ESTA TESIS

El contenido experimental de esta tesis ha dado lugar a diversas publicaciones científicas. Algunas de ellas se han publicado ya en revistas indexadas revisadas por pares. Otras son publicaciones que están en proceso. Finalmente, algunos resultados se han presentado en congresos y reuniones internacionales.

Contribuciones a revistas científicas indexadas y revisadas por pares

- Sossa, V., Pérez-Gracia, V., González-Drigo, R., Rasol M. (2019). *Lab Non Destructive Test to Analyze the Effect of Corrosion on Ground Penetrating Radar Scans*. Special Issue Close Range Remote Sensing. 2019, Vol 11(23), pp 2814.

INDICE DE IMPACTO / ÁREA / CUARTIL

- Pérez - Gracia, V., Santos, S., Caselles, O., Clapes, J., Sossa, V. *Combining ground penetrating radar and seismic surveys in the assessment of cultural heritage buildings: The study of roofs, columns, and ground of the gothic church Santa Maria del Mar, in Barcelona (Spain)*. Structural Control and Health Monitoring. 2019, Vol. 26(4), pp. 2327.

- INDICE DE IMPACTO / ÁREA / CUARTIL

Publicación en Actas de Congresos internacionales

- V. Sossa, V Pérez-Gracia, R. González-Drigo, J. Clapes, O. Caselles, “Detection of the corrosion phenomenon in reinforced concrete with GPR and the application to historical heritages from Barcelona - Park Guell.”: European Geosciences Union EGU, General Assembly 2017, Viena – Austria, Abril 2017.
- V. Sossa, V Pérez-Gracia, S. Santos. J. Clapes, O. Caselles. “GPR applications in civil engineering collaborating with a Company and preparation of material for the educational package to teach in Universities. STSM, COST Action TU1208.”, European Geosciences Union EGU, General Assembly 2017, Viena – Austria, Abril 2017.

- V. Sossa, V Pérez-Gracia, S. Santos, R. González-Drigo, J. Clapes, O. Caselles. “Detection of the corrosion phenomenon in reinforced concrete with GPR and the application to historical heritages from Barcelona - Park Guell, ” COST | Action TU1208 Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar- Conferencia Final GPR, Varsovia- Polonia Septiembre 2017.
- V. Sossa, V Pérez-Gracia, R. González-Drigo, S. Santos, J. Clapes, O. Caselles, “Detection of the corrosion phenomenon in reinforced concrete with GPR and the application to historical heritages from Barcelona - Park Guell”, 17th International Conference on Ground Penetrating Radar, Rapperswil – Suiza, Junio 2018
- S. Santos, V Pérez-Gracia, V. Sossa “Geophysical survey of an archeological Iberian Village by means of Ground Penetrating Radar.”, 17th International Conference on Ground Penetrating Radar, Rapperswil – Suiza, Junio 2018

Futuras publicaciones

- **Analysis of corrosion in heritage structures: the case study of the Park Güell, in Barcelona**
Autores: Sossa, V., Pérez-Gracia, V., González-Drigo, R.
Revista: Construction and Building Materials, NDT and E International o Remote Sensing
Estado: Artículo finalizado en proceso de revisión por los coautores
- **Monitoring and assessment of historical heritage. The study of the basilica of Santa Maria del PI in Barcelona**
Autores: Sossa, V., Pérez-Gracia, V., González-Drigo, R.
Revista: Structural Health Monitoring o Journal of Archaeological Science.
Estado: En proceso de redacción

REFERENCIAS

Agred, K., Klysz, G. y Balayssac, J. *Location of reinforcement and moisture assessment in reinforced concrete with a double receiver GPR antenna*. Construction and Building Materials. **2018**, Vol. 188, pp. 1119-1127.

Alani, A. M., Aboutalebi, M. y Kilic, G. *Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment*. Journal of Applied Geophysics. **2013**, Vol. 97, pp. 45-54.

Al-Naqram, N. *Compare Reflex-2D-data analysis with other programs in data processing*. Journal of Physics: Conference Series. **2019**, pp. 2-14

Al-Sulaimani, G.J., Kaleemullah, M. y Basunbul, I.A. *Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members*. Struct. J. **1990**, 87, pp. 220–231.

Annan, A. P., y Davis, J. L. *Impulse radar sounding in permafrost*. Radio Science. **1976**, Vol. 11(4), pp 383-394.

Annan, A., Cosway, S. y De Souza, T. *Application of GPR to map concrete to delineate embedded structural elements and defects*. in Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar. **2002**, Vol. 475, pp. 359-364.

Andrade, C., Martínez, I., Alonso, C. y Fullea, J. *New advanced electromechanical techniques for on site measurements of reinforcement corrosion*. Instituto de Ciencia de la Construcción Eduardo Torroja. **1990**, pp. 97-107

Arzi, A. *Microgravimetry for engineering applications*. Geophysical Prospecting. **1975**, Vol. 23(3), pp. 408-425.

Azfaratul, A. G., Syahrul, S. y Hamid, R. *Corrosion Detection and Quantification Using Ground Penetrating Radar*. Conference Paper. **2012**, pp. 1-9

Barr, G. D., Buchholz, P., Carosi, R., Coward, D., Cundy, D., Doble, N. y Van Der Lans, J. A. *New measurement of direct CP violation in the neutral kaon system*. Physics Letters B. **1993**, Vol. 317, pp. 233-242.

Barrile, V., Pucinotti, R., *Application of radar technology to reinforced concrete structures*. NDT & E International. **2005**, Vol. 38, pp. 596-604.

- Bassa V. *Basílica de Santa María del Pi: patrimonio y gestión turístico cultural. Patrimoni sacre: permanent innovació*. AADIPA, COAC. **2014**,1-4.
- Bassegoda-Nonell, J. *La construcción de las bóvedas góticas catalanas*. Boletín académico ETSA. **1989**, N° 11, pp. 30-38.
- Beckmann, P. y Spizzichino, A. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*. Artech House Inc.: Norwood, MA, USA. **1987**, pp. 511
- Bello, P. M. *Determinación de la velocidad de corrosión en armaduras mediante técnicas cuantitativas de análisis electroquímico*. Universitat Politècnica de València, Tesis Maestría. **2013**, pp. 120
- Benci, V. y Fortunato, D. *An eigenvalue problem for the Schrödinger-Maxwell equations*. Topological Methods in Nonlinear Analysis. **1998**, Vol. 11 (2), pp. 283-293.
- Benedetto, A., Tosti, F., Ciampoli, L. B., D'Amico, F. *GPR applications across engineering and geosciences disciplines in Italy: A review*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. **2016**, Vol. 9, pp. 2952-2965.
- Bertolini, L., Carsana, M. y Redaelli, E. *Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation*. Journal of Cultural Heritage. **2008**, Vol. 9(4), pp.376-385.
- Bhaskar, S. y Vasanthakumar, S. *Study on the Applicability of Cover Meter and GPR Survey For Cover Thickness and Rebar Identification in Reinforced Concrete Structures*. in NDE 2017 Conference & Exhibition of the society for NDT (ISNT), Chennai, T.N., India, 14-16 December 2017. **2017**.
- Binda, L. y Saisi, A., Tiraboschi, C. *Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries*. Construct Build Mater. **2000**, Vol. 14(4), pp. 199-233
- Bristow, C. S. y Jol, H. M. *An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments*. Geological Society, London, Special Publications. **2003**, Vol. 211 (1), pp. 1-7.

Busby, J. P., Cuss, R. J. y Raines, M. G., Beamish, D. *Application of Ground Penetrating Radar to Geological Investigations*. British Geological Survey. **2004**, Vol. 21 (4), pp. 33.

Castel, A., Francois, R. y Arliguie, G. *Mechanical behavior of corroded reinforced concrete beams*. Materials and Structures. **2000**, Vol. 33, pp. 539-544.

Calia, A., Lettieri, M., Leucci, G., Matera, L. y Persico, R., Sileo, M. *The mosaic of the crypt of St. Nicholas in Bari (Italy): integrated GPR and laboratory diagnostic study*. J Archaeol Sci., **2013**, 40(12), pp. 4162-4169.

Caselles, O., Martínez, G., Clapés, J. y Roca, P., Pérez-Gracia, M.V. *Application of particle motion technique to structural modal identification of heritage buildings*. Int J Archit Herit. **2015**, Vol. 9(3), pp. 310-323.

Cataldo, R., De Donno, A., De Nunzio, G., Leucci, G., Nuzzo, L. y Siviero, S. *Integrated methods for analysis of deterioration of cultural heritage: the Crypt of "Cattedrale di Otranto"*. J Cult Herit. **2005**, Vol. 6(1), pp. 29-38.

Calleja, J., Andrade, M. C. *Prevención de la corrosión de armaduras en el hormigón mediante aditivos inhibidores*. Materiales de Construcción, **1973**, Vol. 23, pp. 175-190.

Cook, J. C. *Radar transparencies of mine and tunnel rocks*. Geophysics. **1975**. Vol 40(5), pp 865-885.

Chang, C.W., Lin, C.H. y Lien, H.S. *Measurement radius of reinforcing steel bar in concrete using digital image GPR*. Construction and Building Materials. **2009**, Vol. 23, pp. 1057-1063.

Cirlot, J. E. *La plástica de Antonio Gaudí*. Goya. Revista de Arte. **1955**, Vol. 9, pp. 176-182.

Daniels, J. J. *Ground penetrating radar fundamentals*. Prepared as an appendix to a Report to the US EPA. **2000**, Vol. 1, pp. 21.

Daniels, D. *Ground Penetrating Radar, The Institution of Electrical Engineers*. United Kingdom. **2004**, Vol.14-18, pp 36-37.

- Davis, J. L., Scott, W. J. y Morey, R. M., Annan, A. P. *Impulse radar experiments on permafrost near Tuktoyaktuk, Northwest Territories*. Canadian journal of earth sciences, **1976**, Vol13(11), pp 1584-1590.
- Delgado, J., Casado, C. L., Estevez, A., Giner, J., Cuenca, A. y Molina, S. *Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain): a case study of microtremors as an exploration tool*. Journal of Applied Geophysics. **2000**, Vol.45(1), pp.19-32.
- Diamanti N., Giannopoulos A. y Forde M. *Numerical modelling and experimental verification of GPR to investigate ring separation in brick masonry arch bridges*. NDT & E International. **2008**, Vol.41(5), pp.354-363.
- Dikmen U. y Mirzaoglu M. *The seismic microzonation map of Yenisehir-Bursa, NW of Turkey by means of ambient noise measurements*. Journal of the Balkan Geophysical Society. **2005**, Vol.8, pp.53-62.
- Dillmann, P. y Watkinson, D., Angelini, E., Adriaens, A. *Corrosion and conservation of cultural heritage metallic artefacts*. Elsevier. **2013**
- Di Prinzio, M., Bittelli, M., Castellarin, A. y Pisa, P. *Application of GPR to the monitoring of river embankments*. Journal of Applied Geophysics. **2010**, Vol. 71, pp. 53-61.
- El-Said, M. A. H. *Geophysical prospection of underground water in the desert by means of electromagnetic interference fringes*. Proceedings of the IRE. **1956**, Vol44(1), pp 24-30.
- Elyamani, A., Caselles, O., Roca, P. y Clapes, J. *Dynamic investigation of a large historical cathedral*. *Struct Control Health Monit.* **2016**, Vol.24(3): pp.885. <https://doi.org/10.1002/stc.1885>
- Eisenmann, D. y Margentan, F. T., Chou, Ch., Roberts, R., Wendt, S. *Ground Penetrating Radar to Rebar Corrosion Inspection*. in the proceedings of the 39th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Iowa State University. **2012**, pp. 1341-1348.

Eisenmann, D., Margetan, F., Chiou, C. P. y Roberts, R., Wendt, S. *Ground penetrating radar applied to rebar corrosion inspection*. In *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics. **2013**, Vol. 1511, pp. 1341-1348.

Emslie, A. G. y Lagace, R. L.. *Propagation of low and medium frequency radio waves in a coal seam*. *Radio Science*. **1976**, Vol. 11(4), pp. 253-261

Feliú, S., González, J. A. y Feliú, S. Jr. y Andrade, C. *Confinement of the electrical signal or in-situ measurement of Polarization Resistance in Reinforced concrete*. *ACI Materials Journal*. **1990**, Vol. 87, pp. 457.

Fernández, E. M. *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón: Estudio experimental de la variación de la ductilidad en armaduras corroídas aplicando el criterio de acero equivalente*. Universidad Carlos II de Madrid, Tesis Doctoral. **2008**, pp. 345

Fontana, M. G. *Corrosion engineering*. 3rd Edition, McGraw-hill. **2005**, pp. 576

François, R., Laurens, S., Deby, F. *Corrosion and Its Consequences for Reinforced Concrete Structures*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. **2018**.

Ghodoosi, F., Bagchi, A., Zayed, T. y Hosseini, M. *Method for developing and updating deterioration models for concrete bridge decks using GPR data*. *Automation in Construction*. **2018**, Vol. 91, pp. 133-141.

Geosience, M. A. L. A.. *RAMAC/GPR Software Manual*. **1997**

Grimm, R.E., Heggy, E., Cluord, S., Dinwiddie, C., McGinnis, R. y Farrell, D. *Absorption and scattering in ground-penetrating radar: Analysis of the Bishop Tu_*. *J. Geophys. Res. Planets*. **2006**, pp. 111.

Gruber, S., Ludwig, F. *Application of Ground Penetrating Radar in Glaciology and Permafrost Prospecting*. Study Paper for the Arctic Studies Programme at the Arctic Centre, Rovaniemi, Finland. **1996**, pp. 22

Goodman, D., Nishimura, Y. y Rogers, J. D. *GPR time slices in archaeological prospection*. *Archaeological prospection*. **1995**, 2(2), 85-89.

Goodman, D., Piro, S., Nishimura, Y., Schneider, K., Hongo, H., Higashi, N. y Damiata, B. *GPR archaeometry. Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, **2008**, 479-508.

Guéguen, P., Cornou, C., Garambois, S. y Banton, J. *On the limitation of the H/V spectral ratio using seismic noise as an exploration tool: application to the Grenoble valley (France), a small apex ratio basin*. Pure and applied geophysics. **2007**, Vol. 164(1), pp.115-134.

Hamrouche, R., Klysz, G. y Balayssac, JP. *Numerical modeling of ground-penetrating radar (GPR) for the investigation of jointing defects in brick masonry structures*. Non-Destr Test Civ Eng NDTCE. **2009**, pp.9.

Hasan, I. y Yazdani, N. *An Experimental and Numerical Study on Embedded Rebar Diameter in Concrete Using Ground Penetrating Radar*. Hindawi Publishing Corporation, Chinese Journal of Engineering, **2016**, Vol. 16, pp. 1-8.

He, X.Q., Zhu, Z. Q., Liu, Q. Y. y Lu, G. Y. *Review of GPR Rebar Detection*. Piers Proceedings, Beijing, China. **2009**, March, pp. 23–27.

Himi M., Perez-Gracia V., Casas A., Caselles J., Clapes J. y Rivero L. *Non-destructive geophysical characterization of cultural heritage buildings: applications at Spanish cathedrals*. Asociación Europea de Geocientíficos e Ingenieros. **2016**, Vol.34, pp.93-101.

Hong, S. *GPR-Based Periodic Monitoring of Reinforcement Corrosion in Chloride-Contaminated Concrete*, Doctoral Thesi. Technische Universitaet Berlin. **2015**.

Hong, S., Lai, W. W. L., Wilsch, G., Helmerich, R., Helmerich, R. y Günther, T., Wiggenhauser, H. *Periodic mapping of reinforcement corrosion in intrusive chloride contaminated concrete with GPR*. Construction and Building Materials. **2014**, Vol. 66, pp 671-684.

Hong, S., Wiggenhauser, H., Helmerich, R., Dong, B., Dong, P. y Xing, F. *Long-term monitoring of reinforcement corrosion in concrete using ground penetrating radar*. Corrosion Science. **2017**, Vol. 114, pp. 123-132.

Hubbard, S., Zhang, J., Monteiro, M., Peterson, J.E. y Rubin, Y. *Experimental detection of reinforcing bar corrosion using nondestructive geophysical techniques*. ACI Materials Journal. **2003**, Vol. 100, pp. 501-510.

Huisman, J. A., Hubbard, S. S., Redman, J. D. y Annan, A. P. *Measuring soil water content with ground penetrating radar*. Vadose zone journal. **2003**, Vol. 2 (4), pp. 476-491.

Hunsperger, R. G. *Integrated Optics: Theory and Technology*. Springer. **1982**, pp. 302

Huston, D., Pelczarski, N., Esser, B., Maser, K. y Weedon W. *Damage Assessment in Roadway With Ground Penetrating Radar*, in Proceedings of Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities, and Pipelines IV, **2000**, Vol. 3995, pp. 12-14.

Huston, D., Cui, J., Burns, D. y Hurley, D. *Concrete bridge deck condition assessment with automated multisensor techniques*. Structure and Infrastructure Engineering. **2011**, Vol. 7(7-8), pp. 613-623.

Jiménes, P.Garcia, A. y Morán, R. *Hormigón armado*. Gistavo Gil. **2000**

Jol, H. M. *Ground penetrating radar theory and applications*. Elsevier. **2008**, pp. 544

Kabir, S. y Zaki, A. *Detection and Quantification of Corrosion Damage Using Ground Penetrating Radar (GPR)*, in proceedings of the Conference. Progress in Electromagnetics Research Symposium, Marrakesh, Morocco. **2011**, pp. 4-5.

Kilic, G. y Eren, L. *Neural network-based inspection of voids and karst conduits in hydro–electric power station tunnels using GPR*. Journal of Applied Geophysics **2018**, Vol. 151, pp. 194-204.

Kilic, G. y Unluturk, M. *Performance evaluation of the neural networks for moisture detection using GPR*. Nondestructive Testing and Evaluation. **2014**, Vol. 29 (4), pp. 283-296.

Kim, W., Ismail, A., Anderson, N., Atekwana, E. y Buccellato, A. *Non-destructive testing (NDT) for corrosion in bridge decks using GPR*. The 3rd International Conference on Applied Geophysics, Orlando, Florida, USA. **2003**.

Krishnarajapete, R. *Estimation Rebar Corrosion in Concrete Using GPR*. Doctoral Thesis, University of Texas. **2015**, pp. 94

Lachet C., Hatzfeld D., Bard P., Theodulidis N., Papaioannou C. y Savvaidis A. *Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches*. Bulletin of the Seismological Society of America. **1996**, Vol.86, pp.1692-1703.

Lai, W.L., Kind, T., Stoppel, M. y Wiggenhauser, H. *Measurement of Accelerated Steel Corrosion in Concrete Using Ground Penetrating Radar and a Modified Half-Cell Potential Method*. Journal of Infrastructure Systems. **2013**, Vol. 19, Issue 2.

Lachowicz, J. y Rucka, M. *Application of GPR method in diagnostics of reinforced concrete structures*, Diagnostyka **2015**, Vol. 16 (2), pp. 31-36.

Ledesma-Benítez, R. *La finca y los pabellones Güell de Antoni Gaudí*. Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. **2016**

Leucci, G. *Ground penetrating radar: an application to estimate volumetric water content and reinforced bar diameter in concrete structures*. Journal of Advanced Concrete Technology. **2012**, Vol 10(12), pp. 411-422.

Leucci, G., Negri, S. y Carrozzo, M.T. *Ground penetrating radar (GPR): an application for evaluating the state of maintenance of the building coating*. Ann Geophys. **2003**, pp. 46.

Leucci, G., Cataldo, R. y De Nunzio G. *Assessment of fractures in some columns inside the crypt of the Cattedrale di Otranto using integrated geophysical methods*. J Archaeol Sci. **2007**, Vol. 34(2), pp. 222-232.

Leucci, G. *Ground penetrating radar: the electromagnetic signal attenuation and maximum penetration depth*. Scholarly research exchange. **2008**.

Lim, Y. C., Noguchi, T. y Shin, S. *Corrosion evaluation by estimating the surface resistivity of reinforcing bar*. Journal of Advanced Concrete Technology. **2010**, Vol. 8(2), pp 113-119.

Liner C. y Liner J. *Application of GPR to a site investigation involving shallow faults*. The Leading Edge. **1997**, Vol. 16 (11), pp. 1649-1651.

López, R., Aguado, A., Gomez J. y Gaudí and Reinforced Concrete in Construction, *International Journal of Architectural Heritage*, **2013**, 7, pp 375-402,

Lourenço, P. B. *Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney*. *Constr Build Mater*. **2006**, Vol.20(4), pp. 239-251.

Lucius J., Powers M. *GPR Data Processing Computes Software for the PC*, U.S. Geological Survey. **2002**, pp. 101

Maierhofer Ch. y Leipold S. *Radar investigation of masonry structures*. *NDT & E International*. **2001**, Vol.34, pp.139-147.

Martinho E. y Dionísio, A. *Main geophysical techniques used for non-destructive evaluation in cultural built heritage: a review*. *J Geophys Eng*. **2014**, Vol.11(5)

Masini, N., Persico, R. y Rizzo, E. *Integrated techniques for analysis and monitoring of historical monuments: the case of San Giovanni al Sepolcro in Brindisi, southern Italy*. *Near Surface Geophys*. **2010**, vol.8(5), pp.423-432.

Masini, N. y Soldovieri, F. *Integrated non-invasive sensing techniques and geophysical methods for the study and conservation of architectural, archaeological and artistic heritage*. *J Geophys Eng*. **2011**, Vol. 8(3).

McCann D.M. y Forde M.C. *Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures*. *Ndt & E International*. **2001**, Vol.34(2), pp.71-84.

Meng, D., Lin, S. y Azari, H. *Nondestructive corrosion evaluation of reinforced concrete bridge decks with overlays: an experimental study*. *Journal of Testing and Evaluation*. **2020**, Vol. 48 (1), pp. 516-537.

Miller, G., Gaydecki, P., Quack, S., Fernandes, B. T. y Zaid, M. *Detection and imaging of surface corrosion on steel reinforcing bars using a phase-sensitive inductive sensor intended for use with concrete*. *NDT&E International*. **2003**, Vol. 36 (1), pp. 19-26.

Moreno-Fernández, E. *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón: Estudio experimental de la variación de la ductilidad en armaduras corroídas aplicando el criterio de acero equivalente*. Universidad Carlos II de Madrid. **2008**, pp. 62-65

Moropoulou, A., Labropoulos, K., Delegou, E., Karoglou y M., Bakolas, A. *Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage*. Construction and Building Materials. **2013**, Vol. 48, pp. 1222-1239.

Murcia-Delso, J., Das, A. K, Roca, M. y Cervera, M. *Seismic safety analysis of historical masonry structures using a damage constitutive model*. In: Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, **2009**.

Murcia, J. . *Seismic analysis of Santa Maria del Mar church in Barcelona (Doctoral dissertation, Master thesis, Technical University of Catalunya, Spain)*. **2008**

Nakamura, S. *The roles of structural imperfections in InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes*. Science. **1998**, 281(5379), 956-961.

Nuzzo, L., Leucci, G., Negri, S., Carrozzo, M. y Quarta, T. *Application of 3D visualization techniques in the analysis of GPR data for archaeology*. Annals of Geophysics. **2002**, Vol. 45 (2), pp. 321-337.

Oh B.H., Cho Y.G., Cha S.W. y Jang B.S. *Prediction of Corrosion Resistance of Concrete Structures*. Department of Civil Engineering Journal, Seoul National University Korea. **1999**.

Palet-Martínez, J.M, Orengo-Romeu H.A. y Riera-Mora, S. *Centuriación del territorio y modelación del paisaje en los llanos litorales de Barcino (Barcelona) y Tarraco (Tarragona): una investigación interdisciplinar a través de la integración de datos arqueomorfológicos y paleoambientales*. Agri Centuriati. **2011**, Vol.7, pp. 113-133.

Pavlík, Z., Jiříčková, M., Černý, R., Sobczuk, H. y Suchorab, Z. *Determination of moisture diffusivity using the time domain reflectometry (TDR) method*. Journal of Building Physics. **2006**, Vol. 30(1), pp. 59-70.

Pérez Gracia V. *Evaluación para Aplicaciones en Arqueología en Patrimonio Histórico-Artístico*. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Cataluña. **2001**.

Pérez-Gracia, V., González-Drigo, R. y Di Capua, D. *Horizontal resolution in a non-destructive shallow GPR survey: An experimental evaluation*. NDT E Int. **2008**, Vol.41, pp. 611–620.

Pérez-Gracia, V., García, F. G. y Abad, I. R. *GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats: A case study*. NDT & e International. **2008**, Vol 41(5), pp. 341-353.

Pérez-Gracia, V. y Solla, M. *Inspection procedures for effective GPR surveying of buildings*. In: *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. Switzerland: Springer International Publishing, **2015**, pp. 97-123.

Pérez-Gracia, V., Caselles, J.O. y Clapés, J., Martínez, G., Osorio, R. *Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: evaluating the Mallorca cathedral supporting structures*. NDT&E Int. **2013**, Vol.59, pp. 40-47.

Pérez-Gracia, V., Canas, J.A. y Pujades, L.G. *GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain)*. J Appl Geophys. **2000**, Vol.43(2-4), pp. 167-174.

Pérez-Gracia, V., García, F., Pujades, L.G., Drigo, R.G. y Di Capua, D. *GPR survey to study the restoration of a Roman monument*. J Cult Herit. **2008**, Vol.9(1), pp. 89-96.

Pérez-Gracia, V., Caselles, J.O., Clapes, J., Osorio, R., Martínez, G. y Canas, J.A. *Integrated near-surface geophysical survey of the Cathedral of Mallorca*. J Archaeol Sci. **2009**, Vol.36(7), pp. 1289-1299.

Pérez-Gracia, V., Caselles, O., Clapés, J., Osorio, R., Canas, J.A., Pujades, L.G. *Radar exploration applied to historical buildings: a case study of the Marques de Llió palace, in Barcelona (Spain)*. Eng Fail Anal. **2009**, Vol.(4), pp. 1039-1050.

Pickard, R. *A comparative review of policy for the protection of the architectural heritage of Europe*. International Journal of Heritage Studies. **2002**, Vol.8(4), pp. 349-363.

Prego, F.J., Nuñez, X., Solla, M. y Arias, P. *Evaluación no destructiva de estructuras de obra civil mediante técnicas GPR. Proyecto Sitegi: Una introducción a su empleo en túneles*. Compat. **2015**, pp.1-8

Prego, F.J. y Nieto, L.A. *GPR inspection techniques in construction: Android App for signal processing*, VII congreso de ACHE. **2017**, pp. 1-11

Prieto, M., Cobo, A., Rodriguez, A. y Manso, J. *Sintomatología de la corrosión en barras de acero de armar embebidas en morteros con incorporación de escorias blancas de horno cuchara*. Congreso de Innovación Tecnológica en la Edificación. **2011**, pp. 1-6

Rappaport, C. M. *Fundamentals of Ground Penetrating Radar*. Northeastern University. **2008**, pp. 14

Rhazi, J., Dous, O. y Laurens, S. *Application of the GPR Technique to Reinforced Concrete Bridge Decks*. 4ta Middle East NDT Conference and Exhibition of Bahrain. **2007**, pp. 1-11

Reci, H., Mai, T. C., Sbartai, Z. M., Pajewskib L. y Kiri, E. *Non-destructive evaluation of moisture content in wood using ground-penetrating radar*. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. **2016**, Vol. 5(2), pp. 575-581.

Roca, P. *Study of gothic churches: inspection, monitoring and structural analysis*. Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio Construido. **2009**, pp. 1-19.

Robinson, M., Bristow, C., McKinley, J. y Ruffell, A. *Ground Penetrating Radar*. British Society for Geomorphology, Geomorphological Techniques. Part 1, Sec 5.5. **2013**, pp. 26

Rodriguez, J., Ortega, L.M. y Casal, J. *Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement*. Constr. Build. Mater. **1997**, Vol.11, pp. 239–248.

Rodriguez, I., Klysz, G., Martinez, R, Balayssac, J.P. y Mené, J. *Application of Ground Penetrating Radar Technique to evaluate the waterfront Location in Hardened Concrete*. Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems. **2016**, pp. 567-574.

Rojas-Klein L. *Estudio de la Durabilidad de Estructuras de Hormigón Armado, con Enfasis en la Corrosión de la Armaduras*. Tesis doctoral Universidad de Chile. **2006**.

Rojas-Poveda, C., *Adquisición, Procesamiento e Interpretación de Datos de Georadar Aplicados A una Refinería de Petróleo*. Universidad Simón Bolívar. **2015**. Pp. 39-41

Rosado R., *Corrosión del acero en el concreto*.**1985**, pp.77

Roudari, S., Okore-Hanson, T., Hamoush, S. y Yi, S. GPR Robotic Assisted Non-Destructive Evaluation of Concrete Structures, in Waste Management **2020**.

Sandmeier, J. ReflexW *Sandmeier Scientific Software*. Karlsruhe, Germany, Version 5.0.9, **2010**.

Sahni, S., Singhal, M., Kumar, P. y Kamal, R. A. Sneak Peek into Ground Penetrating Radar. Everyman's Science. **2014**, Vol. XLIX (5), pp. 301-306.

Sales-Carbonell J. *Santa María de las Arenas, Santa María del Mar y el anfiteatro romano de Barcelona*. Revista d'Arqueologia de Ponent. **2011**, Vol.21, pp. 61-74.

Salinas Naval, V., Santos-Assunção, S. y Pérez-Gracia, V. *GPR clutter amplitude processing to detect shallow geological targets*. Remote Sens. **2018**, Vol.10, pp.88.

Santos-Assunção, S., Perez-Gracia, V., Caselles, O., Clapes, J. y Salinas, V. *Assessment of complex masonry structures with GPR compared to other non-destructive testing studies*. Remote Sensing. **2014**, Vol. 6(9), pp. 8220-8237.

Saribudak M. *A Case Study of Ground-Penetrating Radar for Concrete Moisture Mapping and Void Detection in the Saturated Soil Beneath the Concrete Residential Foundation, Houston*. Houston Geological Society Bulletin. **2010**, Vol. 52, pp. 27-49.

Scheers, B., Acheroy, M. P. y Vander Vorst, A. *Migration technique based on the time-domain model of the ground penetrating radar*. In Subsurface and Surface Sensing Technologies and Applications III. **2001**, Vol. 4491, pp. 111-119.

Selek, I. *Reliability of Non-destructive Testing Methods for Detecting Steel Rebar, in Existing Concrete Structures*. Master Thesis, Eindhoven University of Technology. **2015**, pp.97

Sigurdsson, T. y Overgaard, T. *Application of GPR for 3-D visualization of geological and structural variation in a limestone formation*. Journal of Applied Geophysics. **1998**, Vol. 40 (1-3), pp. 29-36.

Soldovieri, F., Persico, R., Utsi, E. y Utsi, V. *The application of inverse scattering techniques with ground penetrating radar to the problem of rebar location in concrete*. NDT & E International. **2006**, Vol 39(7), pp. 602-607.

Soldovieri, F., Solimene, R., Monte, L.L., Bavusi, M. y Loperte, A. *Sparse reconstruction from GPR data with applications to rebar detection*. IEEE Trans. Instrum. Meas. **2010**, Vol.60, pp. 1070–1079.

Solla, M., Lagüela, S., Riveiro, B. y Lorenzo, H. *Non-destructive testing for the analysis of moisture in the masonry arch bridge of Lubians (Spain)*. **Structural Control and Health Monitoring**. **2013**, Vol.20(11), pp.1366-1376.

Solla, M., Lorenzo, H., Rial, F. I. y Novo, A. *GPR evaluation of the Roman masonry arch bridge of Lugo (Spain)*. NDT & E International. **2011**. Vol. 44(1), pp.8-12.

Solla, M., Lagüela, S., Fernández, N. y Garrido, I. *Assessing Rebar Corrosion through the Combination of Nondestructive GPR and IRT Methodologies*. Remote Sensing. **2019**, Vol. 11 (14), pp. 1705.

Sossa, V., Pérez-Gracia, V., González-Drigo, R. y Rasol, M. *Lab Non Destructive Test to Analyze the Effect of Corrosion on Ground Penetrating Radar Scans*. Remote Sensing. **2019**, Vol 11(23), pp. 2814.

Stampolidis, A., Soupios, P., Vallianatos, F. y Tsokas, G. N. *Detection of leaks in buried plastic water distribution pipes in urban places-a case study*. Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, **2003**, pp. 120-124

Stern, W. *Versuch einer elektrodynamischen Dickenmessung von letschereis*. Gerl. Beitr. Zur Geophysik. **1929**, Vol. 23, pp. 292-333.

Szymczyk, P. y Szymczyk, M. *Non-destructive building investigation through analysis of GPR signal by S-transform*. Automation in Construction. **2015**, Vol 55, pp. 35-46.

Unterberger, R.R. *Radar propagation in rock salt*. Geophysical prospecting. **1978**, 26(2), 312-328.

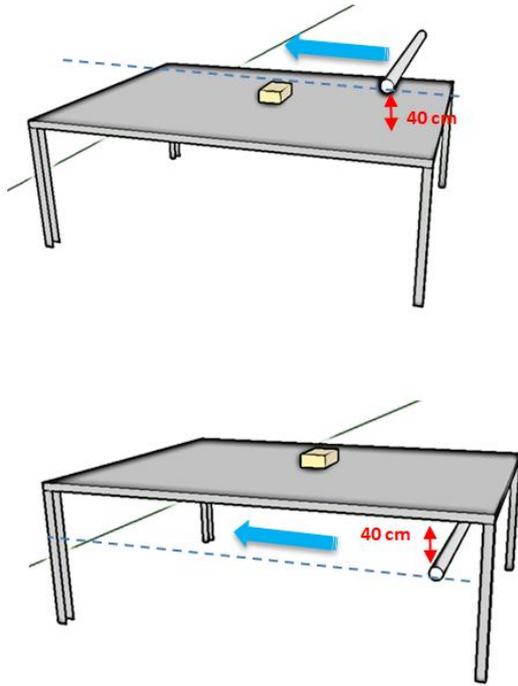
Van Hemelrijck, D., Vanlanduit, S., Anastasopoulos, A.A. y Philippidis, T.P. *Emerging Technologies in Non-Destructive Testing VI: Proceedings of the 6th International Conference on Emerging Technologies in Non-Destructive Testing*. Brussels, Belgium, 27-29 May. CRC Press, **2015**.

- Viveros, A. *Comportamiento del potencial de corrosión de concreto reforzado expuesto al ambiente de la ciudad de Xalapa*. Tesis para Grado de Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana. **2008**, pp. 65
- Vergés T. *Santa Maria del Pi la seva historia*. Barcelona, La Formiga. **1992**, Vol.84-85028-31, pp.7.
- Wang, Z., Zhou, M., Slabaugh, G., Zhai, J. y Fang, T. *Automatic Detection of Bridge Deck Condition From Ground Penetrating Radar Images*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. **2011**, Vol. 8, pp. 633-641.
- Wong, T.W.P., Poon C.S.P. y Lai, W.L.W. *Laboratory validation of corrosion-induced delamination in concrete by ground penetrating radar*. 17th International Conference on Ground Penetrating Radar. **2018**, pp. 2474-3844.
- Warren, C., Giannopoulos, A. y Giannakis, I.. *gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar*. Computer Physics Communications. **2016**, 209, 163-170.
- Xu, X., Xia, T., Venkatachalam, A. y Huston, D. *Development of high-speed ultrawideband ground-penetrating radar for rebar detection*. Journal of Engineering Mechanics. **2013**, Vol. 139 (3), pp. 272-285.
- Yelf. R., Yelf, D. *Where is True Time Zero?*. Georadar Research Pty Ltd. 2006, pp. 158-163
- Zaki, A., Chai, H. K., Aggelis, D. G. y Alver, N. *Non-destructive evaluation for corrosion monitoring in concrete: A review and capability of acoustic emission technique*. Sensors. **2015**, Vol. 15(8), pp. 19069-19101.
- Zaki, A., Johari, M., Azmi, M., Hussin, W., Aminuddin, W.M. y Jusman, Y. *Experimental Assessment of Rebar Corrosion in Concrete Slab Using Ground Penetrating Radar (GPR)*. Int. J. Corros. **2018**, Vol.283, pp. 1–10.
- Zegelin, S. J., White, I. y Jenkins, D. R. *Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry*. Water Resources Research., **1989**, Vol. 25(11), pp.2367-2376.

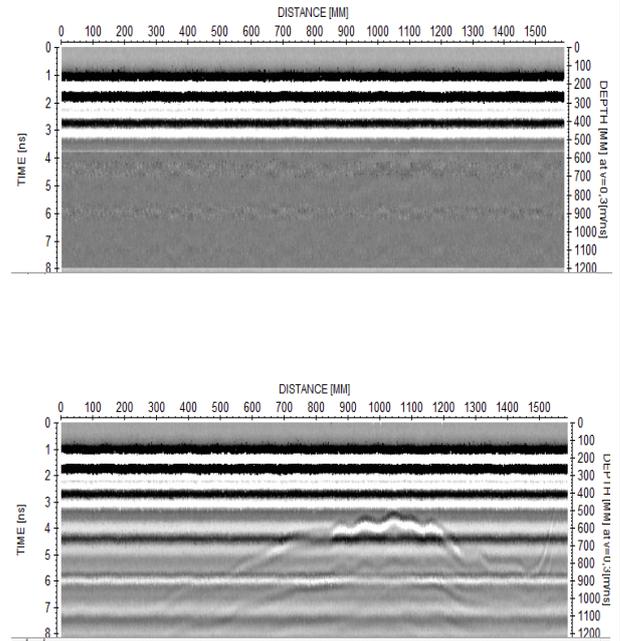
ANEXOS

FICHAS DE LABORATORIO

Esquema del ensayo



Resultado imagen GPR



Procedimiento del ensayo

La prueba consiste en dejar la antena estática sobre la parte central de una mesa de 3m por 2 m y de 0.80m de altura, realizando dos pruebas:

- El primera, una barra tubular de 2 cm de diámetro pasa a 40 cm de altura sobre la mesa
- La segunda, la misma barra tubular pasa a 4 cm de altura debajo de la superficie del tablero de la mesa

Interpretación

- Primer ensayo. Cuando el objeto metálico pasa a 40 cm sobre de la mesa a velocidad constante, el radargrama refleja pocas variaciones en su registro, por lo que se concluye que la antena tiene un buen apantallamiento superior, puesto que no detecta elementos que se encuentran sobre el nivel del elemento transmisor.
- Segundo ensayo. Cuando el elemento metálico está situado bajo del nivel de la antena, es detectado perfectamente, que es lo esperado y conveniente cuando se realiza un estudio con la técnica de GPR

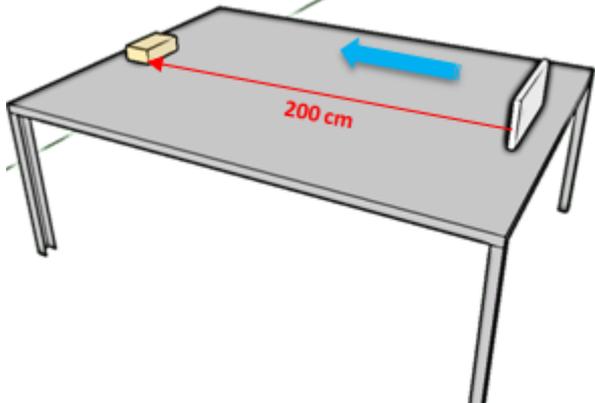
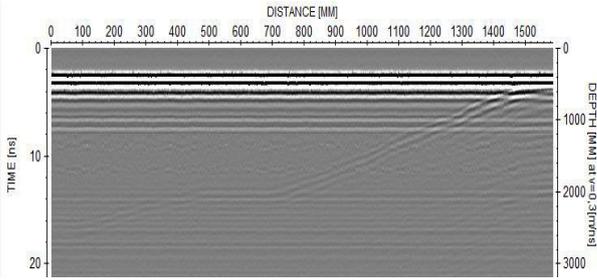
Procesado

Las imágenes de los radargramas muestran claramente los objetivos buscados sin requerir un procesado de la información

Información complementaria

Cuando el objeto tubular pasa debajo de la antena, se forma correctamente una hipérbola de reflexión

Prueba de laboratorio 1	Prueba de efecto Clutter según apantallamiento de la antena
-------------------------	---

Esquema del ensayo	Resultado imagen GPR
	

Procedimiento del ensayo	Interpretación
<p>La prueba consiste en el acercamiento lateral de la placa metálica a velocidad constante en dirección de la antena</p>	<p>La imagen del radargrama muestra una línea ascendente a medida que se acerca a la antena, además se ve que mantiene la misma pendiente en tramos, lo que indica que la velocidad de aproximación fue constante en estos tramos.</p>

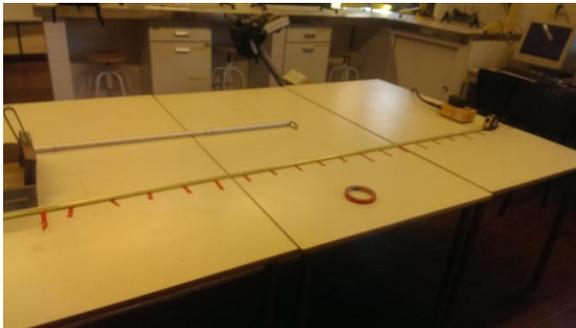
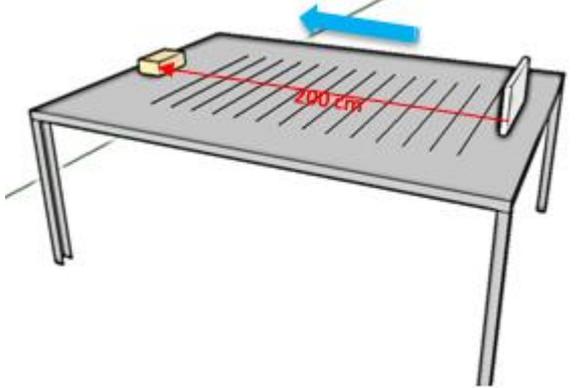
Procesado
<p>Las imágenes de los radargramas muestran claramente los objetivos buscados sin requerir un procesado de la información</p>

Información complementaria

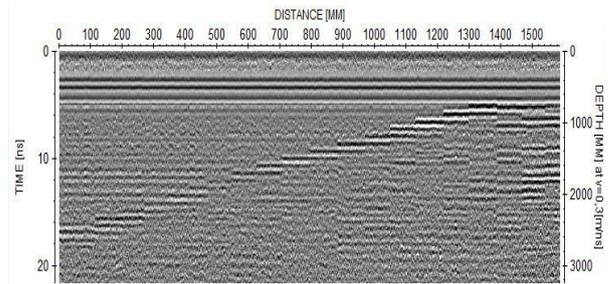
Prueba de laboratorio 1

Prueba de efecto Clutter según apantallamiento de la antena

Esquema y fotografía del ensayo



Resultado imagen GPR



Procedimiento del ensayo

La prueba consiste en el acercamiento lateral de la placa metálica en dirección de la antena con pausas de 5 segundos cada 15 cm.

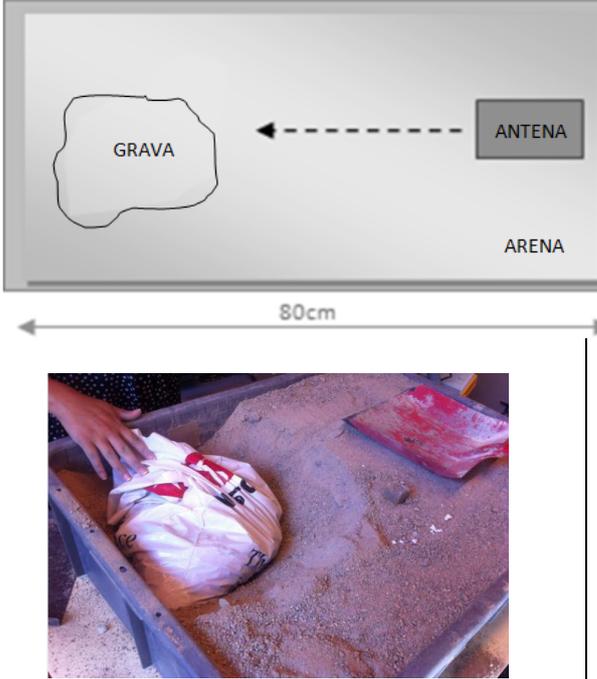
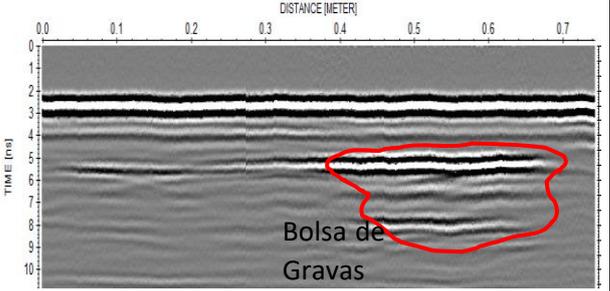
Interpretación

En este ensayo se puede ver que los intervalos de tiempo son reflejados en el radargrama como pequeñas líneas rectas, donde la separación de estas líneas asciende a medida que la placa se acerca a la antena

Procesado

Las imágenes de los radargramas muestran claramente los objetivos buscados sin requerir un procesado de la información

Información complementaria

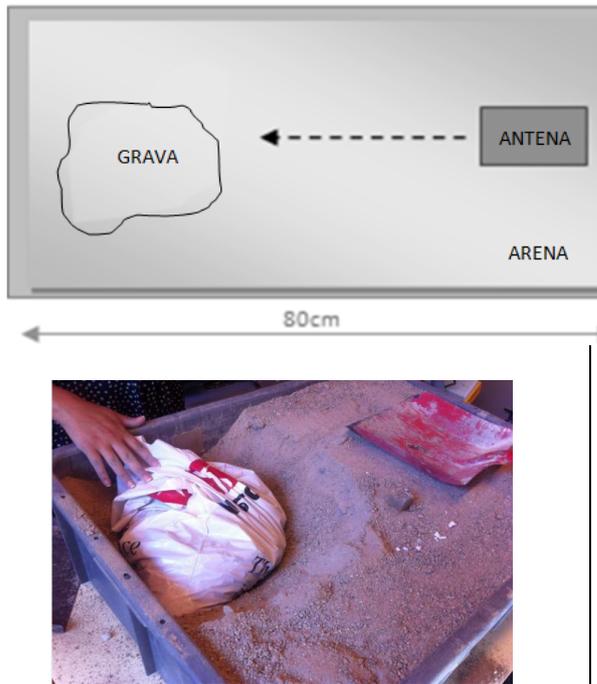
Esquema y fotografía del ensayo	Resultado imagen GPR
	

Procedimiento del ensayo	Interpretación
<p>En este ensayo se emplaza una bolsa plástica con 5 Kg de grava en una cubeta cuyas dimensiones son de 80x50x20cm llena de arena fina, ubicando la bolsa próxima a un extremo del recipiente como se ve en el esquema</p> <p>Para la adquisición de datos se emplea una antena MALA de 1600 Mhz de frecuencia, que se desplaza siguiendo el eje longitudinal de la cubeta y centrada transversalmente a la misma, donde se tomaron 10 perfiles</p>	<p>se adquirieron 10 perfiles a lo largo del eje que atraviesa longitudinalmente la cubeta, la mayor parte con resultados similares salvo algunos, de los cuales se analiza uno de ellos, el que se considera representativo y es que se muestra como imagen del GPR</p> <p>En la imagen se identifica claramente la superficie de contacto y en un extremo las anomalías generadas por la reflexiones en las superficies del material granular generadas por la dispersión angular generadas por las superficies de contacto aire-grava</p>

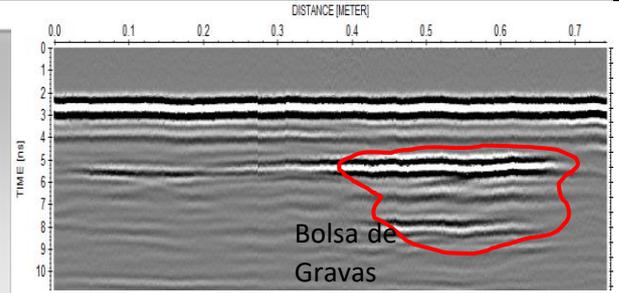
Procesado
<p>Se aplicaron los filtros Background, Removal y Ganancia Energy Decay. Así mismo se ha cambiado la ventana de tiempo, para poder observar el fenómeno desde el primer momento en que empieza a detectarse la señal.</p>

Información complementaria
<p>Los resultados de esta campaña experimental sirvieron para ratificar un aspecto muy importante, y es la importancia que la longitud de la onda emitida debe ser menor que la menor dimensión de las partículas que se pretenden detectar.</p>

Esquema y fotografía del ensayo



Resultado imagen GPR



Procedimiento del ensayo

En este ensayo se emplaza una bolsa plástica con 5 Kg de grava en una cubeta cuyas dimensiones son de 80x50x20cm llena de arena fina, ubicando la bolsa próxima a un extremo del recipiente como se ve en el esquema
 Para la adquisición de datos se emplea una antena MALA de 1600 Mhz de frecuencia, que se desplaza siguiendo el eje longitudinal de la cubeta y centrada transversalmente a la misma, donde se tomaron 10 perfiles

Interpretación

se adquirieron 10 perfiles a lo largo del eje que atraviesa longitudinalmente la cubeta, la mayor parte con resultados similares salvo algunos, de los cuales se analiza uno de ellos, el que se considera representativo y es que se muestra como imagen del GPR
 En la imagen se identifica claramente la superficie de contacto y en un extremo las anomalías generadas por la reflexiones en las superficies del material granular generadas por la dispersión angular generadas por las superficies de contacto aire-grava

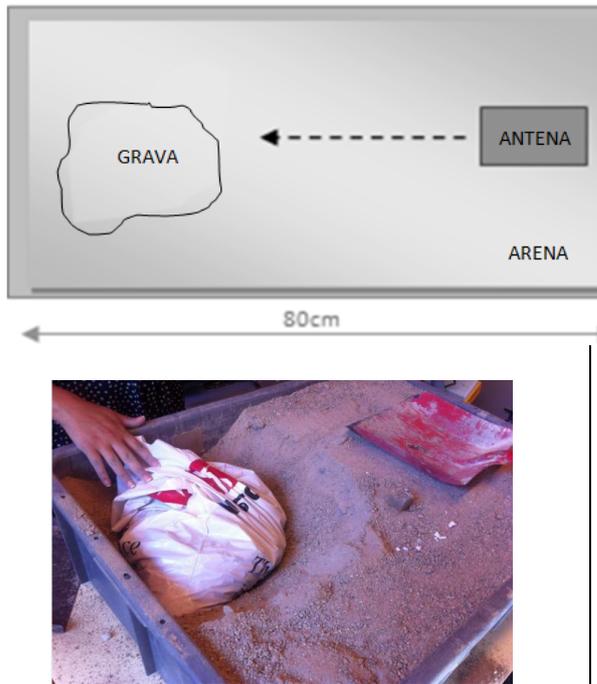
Procesado

Se aplicaron los filtros Background, Removal y Ganancia Energy Decay. Así mismo se ha cambiado la ventana de tiempo, para poder observar el fenómeno desde el primer momento en que empieza a detectarse la señal.

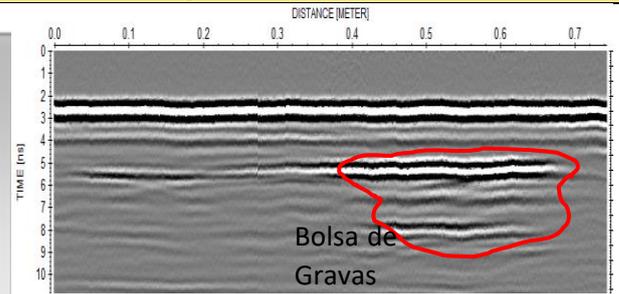
Información complementaria

Los resultados de esta campaña experimental sirvieron para ratificar un aspecto muy importante, y es la importancia que la longitud de la onda emitida debe ser menor que la menor dimensión de las partículas que se pretenden detectar.

Esquema y fotografía del ensayo



Resultado imagen GPR



Procedimiento del ensayo

En este ensayo se emplaza una bolsa plástica con 5 Kg de grava en una cubeta cuyas dimensiones son de 80x50x20cm llena de arena fina, ubicando la bolsa próxima a un extremo del recipiente como se ve en el esquema
 Para la adquisición de datos se emplea una antena MALA de 1600 Mhz de frecuencia, que se desplaza siguiendo el eje longitudinal de la cubeta y centrada transversalmente a la misma, donde se tomaron 10 perfiles

Interpretación

Se adquirieron 10 perfiles a lo largo del eje que atraviesa longitudinalmente la cubeta, la mayor parte con resultados similares salvo algunos, de los cuales se analiza uno de ellos, el que se considera representativo y es que se muestra como imagen del GPR
 En la imagen se identifica claramente la superficie de contacto y en un extremo las anomalías generadas por la reflexiones en las superficies del material granular generadas por la dispersión angular generadas por las superficies de contacto aire-grava

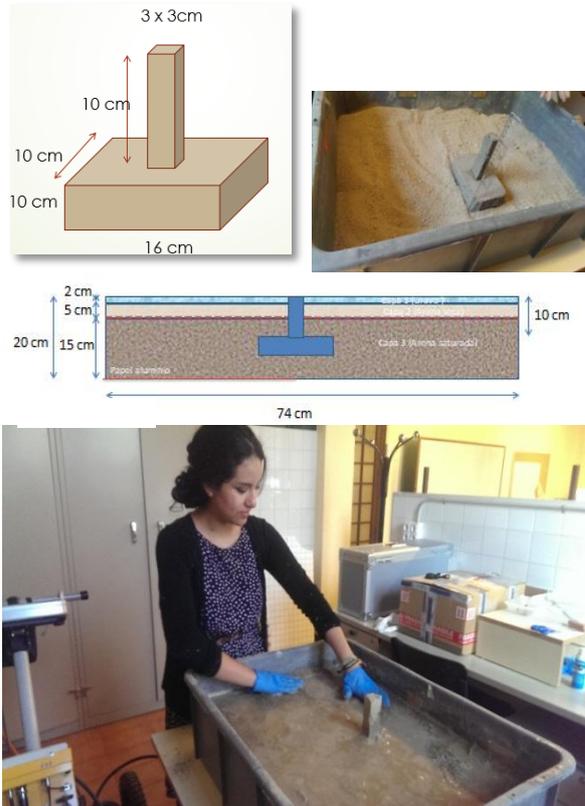
Procesado

Se aplicaron los filtros Background, Removal y Ganancia Energy Decay. Así mismo se ha cambiado la ventana de tiempo, para poder observar el fenómeno desde el primer momento en que empieza a detectarse la señal.

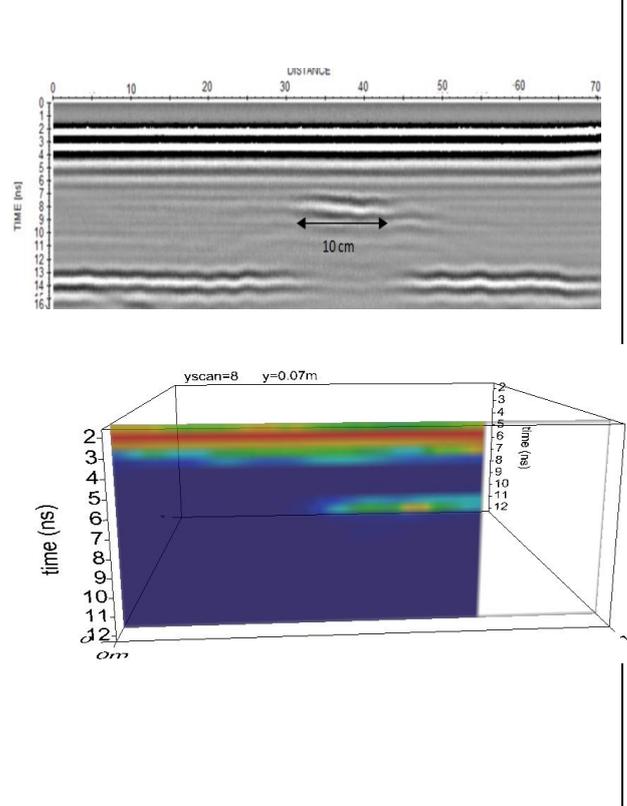
Información complementaria

Los resultados de esta campaña experimental sirvieron para ratificar un aspecto muy importante, y es la importancia que la longitud de la onda emitida debe ser menor que la menor dimensión de las partículas que se pretenden detectar.

Esquema y fotografías del ensayo



Resultado imagen GPR



Procedimiento del ensayo

El modelo de zapata enterra a una profundidad de 5cm en una cubeta (dimensiones de 80x50cm), que luego se llena de arena fina hasta que esta quede completamente cubierta del material fino
 Para una ordenada adquisición de datos se emplea la ayuda de un plano de material capaz de soportar el tránsito de la antena sobre él, en el cual se marca una retícula ortogonal con líneas marcadas transversalmente cada 5 cm y longitudinalmente cada 2 cm.
 Se ejecutan el ensayo en terreno saturado

Interpretación

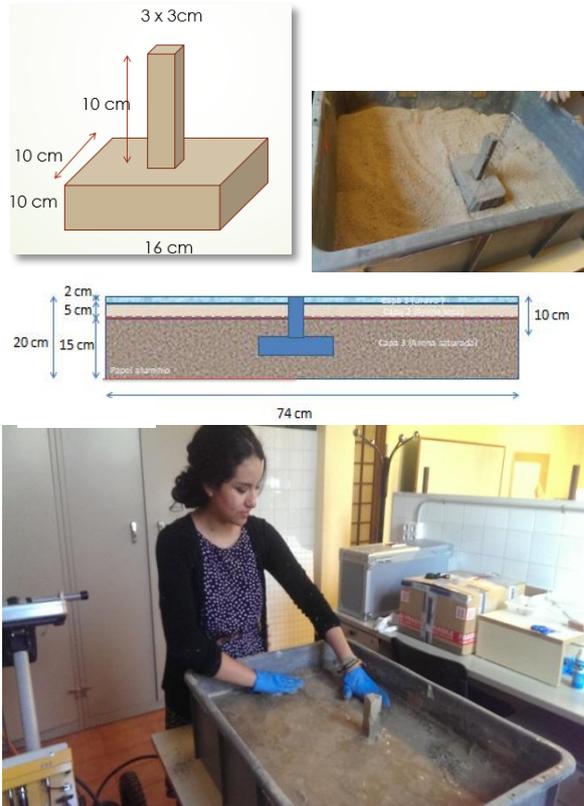
Analizando la imagen del radargrama que pasa por el eje del modelo de la zapata enterrada, se puede identificar claramente su ubicación y también verificar la dimensión de uno de sus lados, que en este caso es de 10 cm, que corresponde exactamente con las medidas reales de la misma
 También se afirma que se mejora la interpretación a partir del procesado en 3D

Procesado

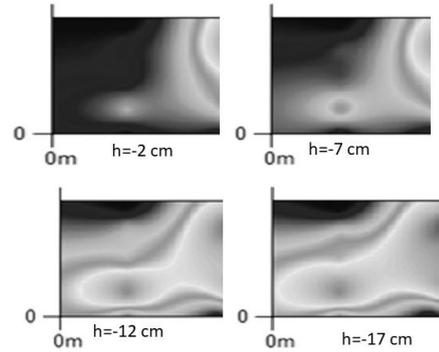
Para general el modelo 3D se emplea el programa GPR Slice, software que es capaz de reconstruir un volumen 3D a partir de varios radargramas paralelos interpolando puntos

Información complementaria

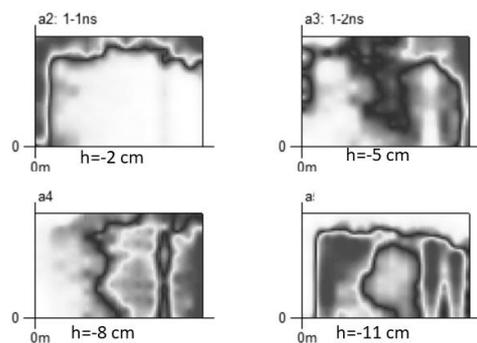
Esquemas y fotografías del ensayo



Resultado imagen GPR



Secciones horizontales en suelo seco



Secciones horizontales en suelo saturado

Procedimiento del ensayo

El modelo de zapata enterra a una profundidad de 5cm en una cubeta (dimensiones de 80x50cm), que luego se llena de arena fina hasta que esta quede completamente cubierta del material fino
 Para una ordenada adquisición de datos se emplea la ayuda de un plano de material capaz de soportar el tránsito de la antena sobre él, en el cual se marca una retícula ortogonal con líneas marcadas transversalmente cada 5 cm y longitudinalmente cada 2 cm.
 Se ejecutan el ensayo en terreno seco

Interpretación

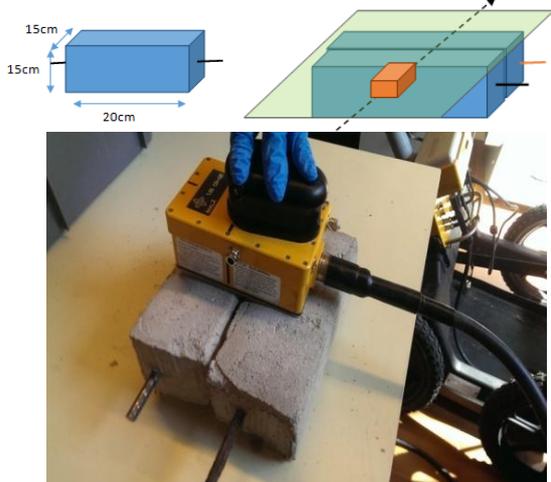
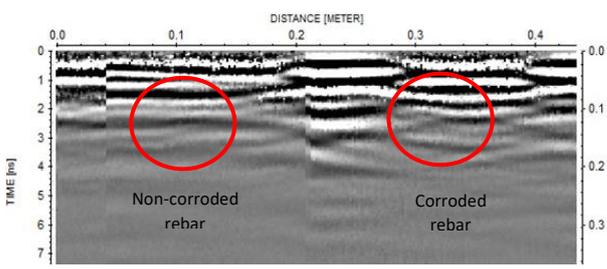
A diferencia del caso de suelo seco, cuando éste está en estado saturado es posible ubicar la posición de la zapata con mayor precisión debido a la mayor intensidad de las imágenes, como se muestra en las secciones horizontales de los dos casos

Procesado

Para general el modelo 3D se emplea el programa GPR Slice, software que es capaz de reconstruir un volumen 3D a partir de varios radargramas paralelos interpolando puntos, donde el resultado final es obtener secciones horizontales que ayudan en la interpretación de la forma y dimensiones del objeto como se muestra en la imagen

Información complementaria

Dos materiales con el mismo componente (hormigón y arena) presentan distinto comportamiento de permitividad dieléctrica, solo por tener distinto grado de consolidación,

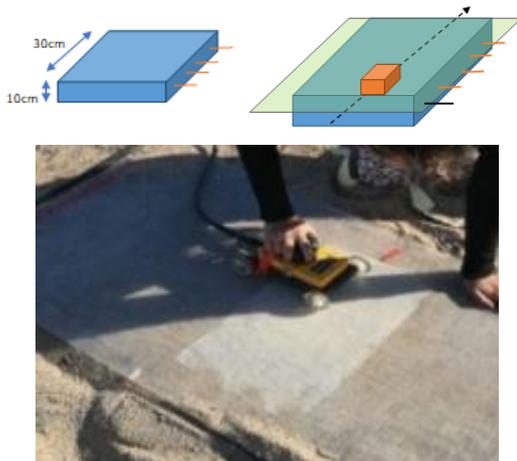
Esquemas y fotografía del ensayo	Resultado imagen GPR
	

Procedimiento del ensayo	Interpretación
<p>Este ensayo pretende identificar el fenómeno de corrosión, a través de la determinación de las diferencias existentes en las imágenes de los radargramas de dos muestras de hormigón armado, con dos tipos barras de acero una sin corrosión y otra corroída</p>	<p>Se utiliza el radargrama mas representativo para el analisis de resultados, dado que el perfil fue adquirido transverslmente a las barras de refuerzo y debido a la alta reflectividad del acero, estas barras deberian ser identificados perfectamente. Pero esto no es asi en el caso de la barra corroida, la cual pese al prosesado cuesta ser identificada</p>

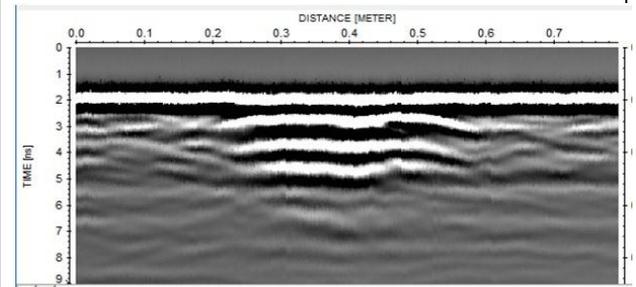
Procesado
<p>No se realizó ningún procesado de datos</p>

Información complementaria
<p>En los radargramas se pueden observar muchos efectos de contorno, que al parecer se deben a los vertices formados por la intersección de los planos de las caras de las dos probetas.</p>

Esquemas y fotografía del ensayo



Resultado imagen GPR



Procedimiento del ensayo

Se elabora una probeta de 15x30x30 cm de hormigón, que contiene 6 barras de acero corroídas y no corroídas ubicadas aleatoriamente con una separación variable entre 3 y 5 cm, emplazada en un medio arenoso para evitar el efecto de sus vértices.

Interpretación

Los resultados mostrados en la imagen del radargrama no son favorables, debido a que no se identifican individualmente las barras, y solo se ve una gran reflexión única sin mostrar la ubicación de las barras.

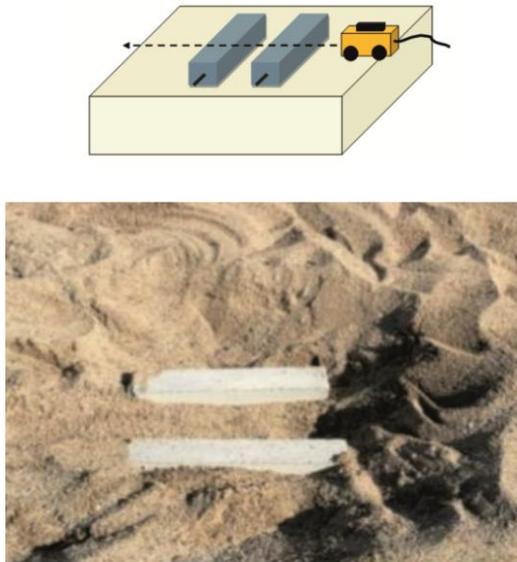
Procesado

No se realizó ningún procesamiento de datos

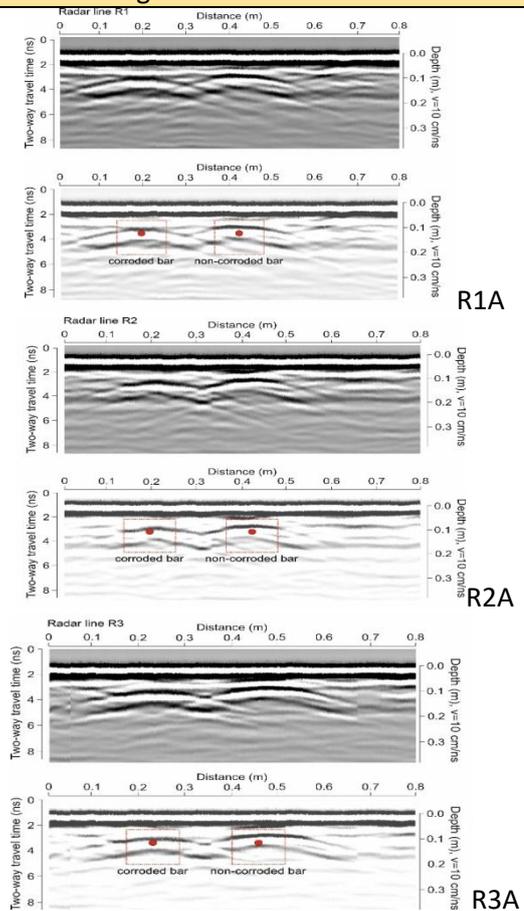
Información complementaria

La falta de resolución de la imagen posiblemente se deba al reducido diámetro de las barras que son de 12 mm y a la separación entre barras inferior a 7cm, distancias que son menores a la resolución horizontal que tiene el instrumento, debido a que la frecuencia central a la que trabaja es solo de 1.6 GHz.

Esquema y fotografía del ensayo



Resultado imagen GPR



Procedimiento del ensayo

Se elabora en laboratorio dos probetas de 30x8x8 cm, hormigonadas con una barra de 12 mm al medio de cada probeta. Para generar la comparación se utiliza una barra no corroída y una barra corroída previamente al hormigonado de la probeta.
 Para evitar efectos de contorno, las trazas fueron adquiridas deslizando el radar sobre probetas embebidas en un manto de arena. La continuidad de la superficie entre probeta y arena minimizó el efecto de contorno.
 La toma de datos es transversal a las barras

Interpretación

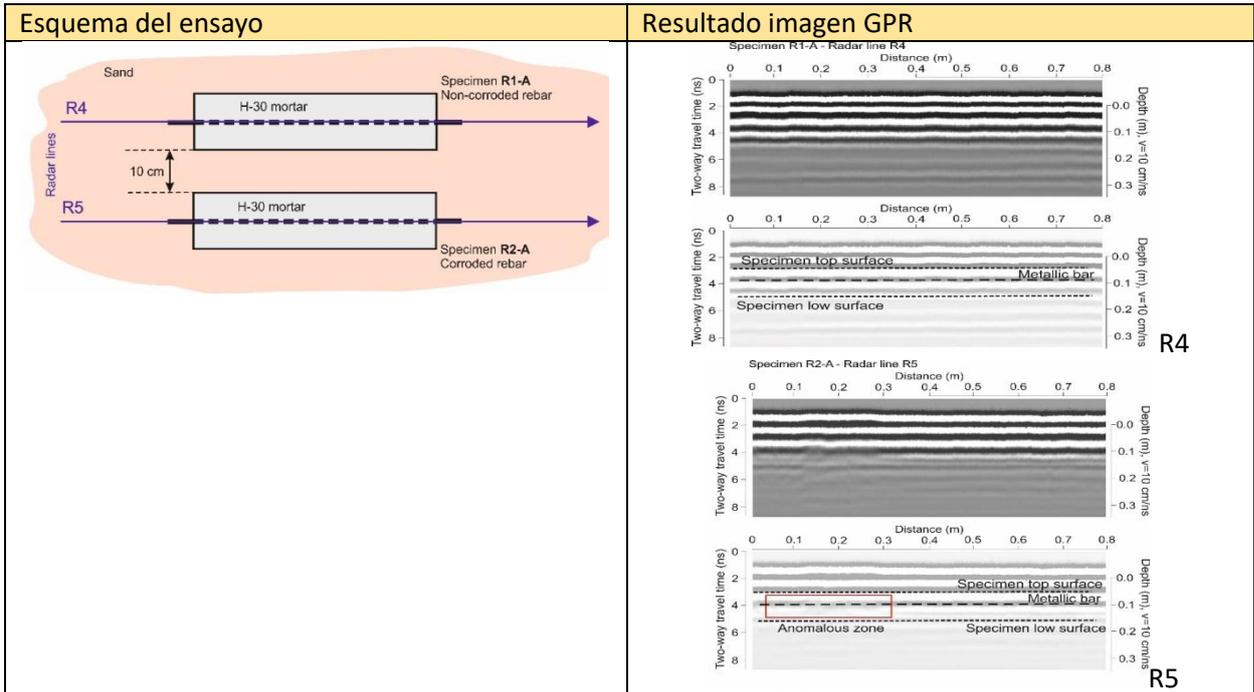
Analizando los radargramas que cruzan transversalmente las probetas (R1A, R2A y R3A), se puede observar claramente que en las barras metálicas, resaltaron pequeñas diferencias entre ellas, siendo la más difusa, la imagen producida por la reflexión sobre la barra corroída. Además se observa que el tiempo de viaje bidireccional de la anomalía asociada a la onda reflejada en la barra corroída es ligeramente mayor.

Procesado

El procesado se realizó con el programa Reflex, software que a la vez permitió seleccionar las trazas para posteriormente analizarlas numéricamente, como se muestra en los resultados.

Información complementaria

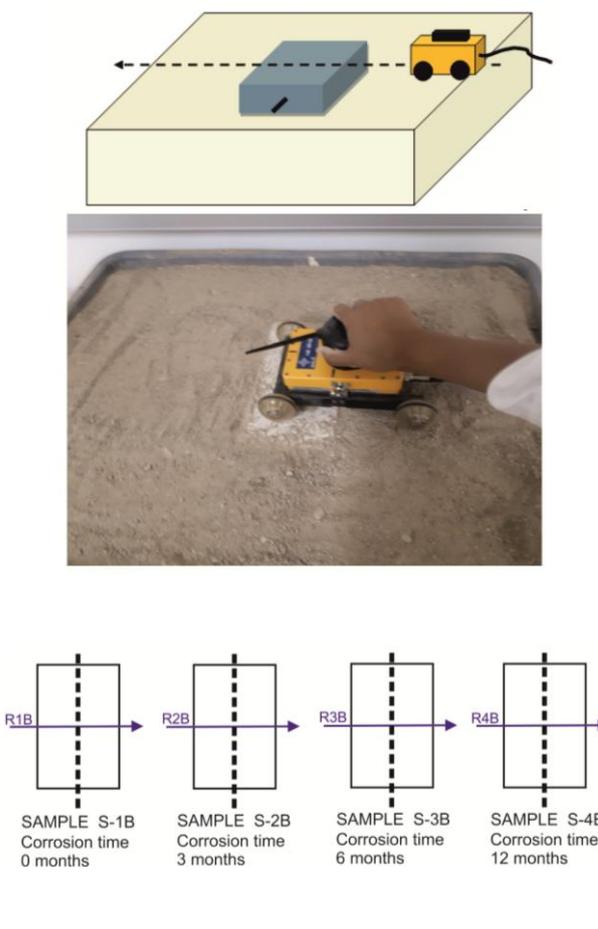
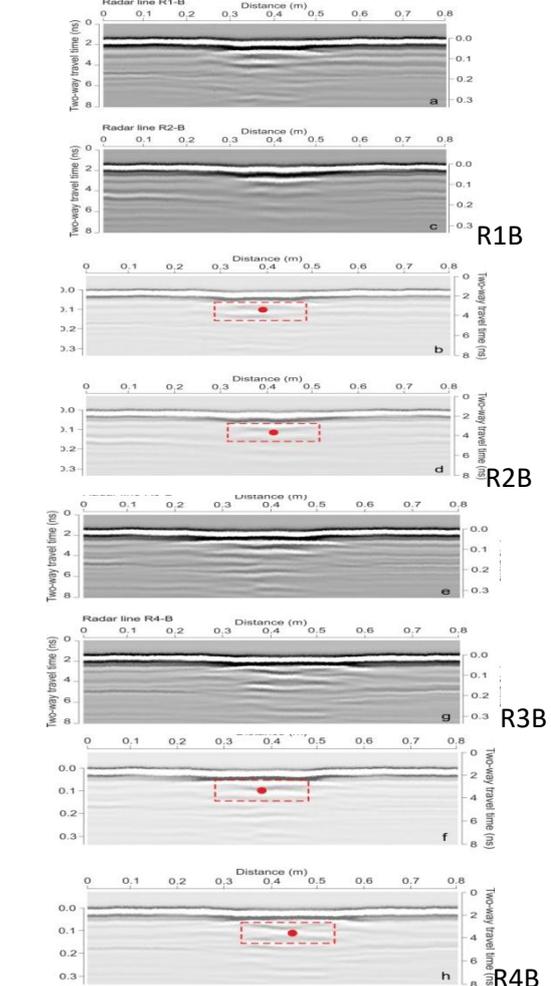
Las imágenes muestran una sección aún más difusa de la muestra corroída, que probablemente se deba a la dispersión en la parte más corroída de la barra metálica



Procedimiento del ensayo	Interpretación
<p>Se elabora en laboratorio dos probetas de 30x8x8 cm, hormigonadas con una barra de 12 mm al medio de cada probeta. Para generar la comparación se utiliza una barra no corroída y una barra corroída previamente al hormigonado de la probeta.</p> <p>Para evitar efectos de contorno, las trazas fueron adquiridas deslizando el radar sobre probetas embebidas en un manto de arena. La continuidad de la superficie entre probeta y arena minimizó el efecto de contorno.</p> <p>La toma de datos es longitudinal a las barras</p>	<p>En los perfiles R4 y R5, adquiridos longitudinalmente sobre el eje de las barras, se observa que pese a la alta reflexión que provoca el acero se puede identificar una anomalía en la probeta con la barra corroída, que puede estar asociada a cambios longitudinales del grado de corrosión de la barra</p>

Procesado
No se realiza ningún procesado de datos

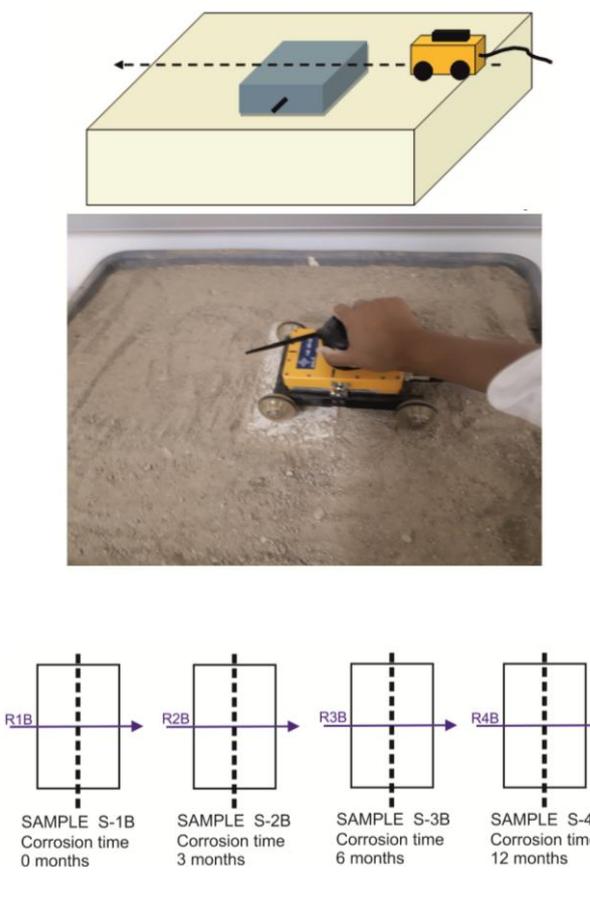
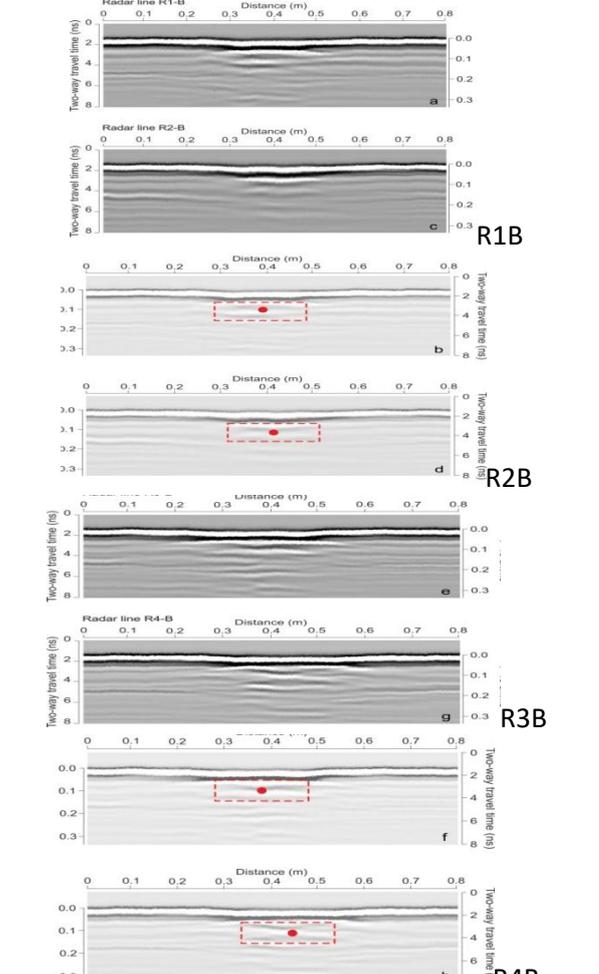
Información complementaria

Esquema y fotografía del ensayo	Resultado imagen GPR
 <p>R1B SAMPLE S-1B Corrosion time 0 months</p> <p>R2B SAMPLE S-2B Corrosion time 3 months</p> <p>R3B SAMPLE S-3B Corrosion time 6 months</p> <p>R4B SAMPLE S-4B Corrosion time 12 months</p>	 <p>R1B</p> <p>R2B</p> <p>R3B</p> <p>R4B</p>

Procedimiento del ensayo	Interpretación
<p>En esta campaña se vio por conveniente elaborar un proceso de oxidación de la barra y el hormigón (juntos), para ver la afección de la oxidación al hormigón y cómo influye este en el comportamiento de las ondas electromagnéticas. Para esto se recurre a un proceso de corrosión acelerada en un ambiente agresivo de una cámara de curado de concreto. Las 4 probetas de 30x20x7 cm se disponen en un recipiente lleno de arena de 100x100x40 cm. La toma de datos se la realiza transversalmente a las barras.</p>	<p>En un análisis cualitativo la característica principal es que la armadura no corroída (R1-B), produce la anomalía más clara, convirtiéndose en la anomalía más difícil de ver a medida que aumenta el tiempo de corrosión. A mayor tiempo de corrosión es más difícil identificar la barra de refuerzo. Mientras un análisis cuantitativo realiza un análisis de las amplitudes de la onda reflejada presentadas por las trazas de cada una de las mediciones expresadas en las A-scan.</p>

Procesado
<p>Después de la adquisición de datos, se realizó el procesado con el programa Reflex, software que a la vez permitió seleccionar las trazas para posteriormente analizarlas numéricamente.</p>

Información complementaria
<p> </p>

Esquema y fotografía del ensayo	Resultado imagen GPR
 <p>R1B SAMPLE S-1B Corrosion time 0 months</p> <p>R2B SAMPLE S-2B Corrosion time 3 months</p> <p>R3B SAMPLE S-3B Corrosion time 6 months</p> <p>R4B SAMPLE S-4B Corrosion time 12 months</p>	 <p>R1B</p> <p>R2B</p> <p>R3B</p> <p>R4B</p>

Procedimiento del ensayo	Interpretación
<p>En esta campaña se vio por conveniente elaborar un proceso de oxidación de la barra y el hormigón (juntos), para ver la afeción de la oxidación al hormigón y cómo influye este en el comportamiento de las ondas electromagnéticas. Para esto se recurre a un proceso de corrosión acelerada en un ambiente agresivo de una cámara de curado de concreto. Las 4 probetas de 30x20x7 cm se disponen en un recipiente lleno de arena de 100x100x40 cm. La toma de datos se la realiza transversalmente a las barras.</p>	<p>En un análisis cualitativo la característica principal es que la armadura no corroída (R1-B), produce la anomalía más clara, convirtiéndose en la anomalía más difícil de ver a medida que aumenta el tiempo de corrosión. A mayor tiempo de corrosión es más difícil identificar la barra de refuerzo.</p> <p>Mientras un análisis cuantitativo realiza un análisis de las amplitudes de la onda reflejada presentadas por las trazas de cada una de las mediciones expresadas en las A-scan.</p>

Procesado
<p>Después de la adquisición de datos, se realizó el procesamiento con el programa Reflex, software que a la vez permitió seleccionar las trazas para posteriormente analizarlas numéricamente.</p>

Información complementaria
<p> </p>

Santa María del Mar	Estudio de las patologías
---------------------	---------------------------

Esquema y fotografía del ensayo	Resultado imagen GPR

Procedimiento del ensayo	Interpretación
<p>En esta campaña se vio por conveniente elaborar un proceso de oxidación de la barra y el hormigón (juntos), para ver la afección de la oxidación al hormigón y cómo influye este en el comportamiento de las ondas electromagnéticas. Para esto se recurre a un proceso de corrosión acelerada en un ambiente agresivo de una cámara de curado de concreto. Las 4 probetas de 30x20x7 cm se disponen en un recipiente lleno de arena de 100x100x40 cm. La toma de dos se la realiza transversalmente a las barras.</p>	<p>En un análisis cualitativo la característica principal es que la armadura no corroída (R1-B), produce la anomalía más clara, convirtiéndose en la anomalía más difícil de ver a medida que aumenta el tiempo de corrosión. A mayor tiempo de corrosión es más difícil identificar la barra de refuerzo.</p> <p>Mientras un análisis cuantitativo realiza un análisis de las amplitudes de la onda reflejada presentadas por las trazas de cada una de las mediciones expresadas en las A-scan.</p>

Procesado
Después de la adquisición de datos, se realizó el procesado con el programa Reflex, software que a la vez permitió seleccionar las trazas para posteriormente analizarlas numéricamente.

Información complementaria

