

Estudio experimental sobre la técnica del georradar para detectar armaduras de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP)

Experimental study on georadar technology to detect Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars

Alberto Piñeiro  Universidad Politécnica de Madrid, España. apineirorenales@gmail.com

Sonia Martínez  Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, España. soniamdm@ietcc.csic.es (autor de contacto)

Rafael Piñeiro  Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, España. rpineiro@ietcc.csic.es

Eduardo Lahoz  Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, España. elahoz@ietcc.csic.es

RESUMEN

Las barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio (Glass Fibre-Reinforced Polymers, GFRP) están sustituyendo al acero en aplicaciones de hormigón armado con exigencias de durabilidad elevadas, como infraestructuras portuarias o centrales nucleares. El objetivo del este trabajo es estudiar la viabilidad de la técnica de inspección no destructiva del georradar (Ground Penetrating Radar, GPR) para detectar armaduras de GFRP en hormigón, en comparación con el armado convencional de acero. Para ello se inspeccionaron con un equipo georradar portátil varias losas de hormigón armadas con GFRP y acero: dos losas fabricadas en laboratorio (con barras de distinto diámetro, separación y recubrimiento) y dos losas de hormigón de obras reales. Como resultado se obtuvo que la inspección con georradar permitió detectar la mayor parte de las barras de GFRP, aunque con una señal menos clara que para el acero, detectando las de diámetro mayor o igual que 14 mm y recubrimiento de hormigón de 25 mm.

Palabras clave: polímeros reforzados con fibra de vidrio; GFRP; materiales compuestos; georradar; técnicas no destructivas.

ABSTRACT

Glass Fibre-Reinforced Polymers (GFRP) bars are replacing steel bars in reinforced concrete elements with high durability requirements, such as port infrastructures or nuclear power plants. The aim of this work is to study the viability of the georadar non-destructive inspection technique (Ground Penetrating Radar, GPR) to detect GFRP reinforcement in concrete, compared to conventional steel reinforcement. For this purpose, several concrete slabs with GFRP and steel reinforcement were inspected with portable georadar equipment: two slabs manufactured in the laboratory (with different diameter, separation and coating thickness) and two concrete slabs from real works. As a result, it was obtained that the inspection with georadar has allowed the detection of GFRP bars, although with a less clear signal than for steel, detecting those with a diameter greater than or equal to 14 mm and a concrete cover of 25 mm.

Keywords: Glass fiber-reinforced polymers; GFRP bars; composites materials; georadar; non-destructive techniques.

Cómo citar este artículo/Citation: Alberto Piñeiro, Sonia Martínez, Rafael Piñeiro y Eduardo Lahoz (2024). Estudio experimental sobre la técnica del georradar para detectar armaduras de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP). Informes de la Construcción, 76 (576): 6897. <https://doi.org/10.3989/ic.6897>

Copyright: © 2024 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 09/01/2024

Aceptado/Accepted: 24/10/2024

Publicado on-line/Published on-line: 29/01/2025

1. INTRODUCCIÓN

El Radar de Penetración Terrestre (Ground Penetrating Radar, GPR) o “georradar” es un método de inspección no destructivo que utiliza ondas electromagnéticas de banda ultra-ancha (10 MHz – 2.6 GHz) que permite detectar con un alto grado de eficacia las características internas de un determinado medio, (1). Consiste en deslizar un aparato de georradar sobre la superficie de un elemento o medio a inspeccionar de forma que se transmitan ondas electromagnéticas de banda ultra-ancha a su través, al tiempo que el aparato recoge la señal de la parte de las ondas que se refleja al alcanzar el límite de dos materiales con distintas propiedades electromagnéticas.

Esta técnica fue descubierta y patentada a principios del siglo XX e inicialmente se empleó en la industria bélica. No obstante, dado su potencialidad como método de inspección no invasivo, ha ido evolucionando hasta emplearse en muy diversas áreas de conocimiento (geología, minería, arqueología, hidrología, etc.). En el campo de la construcción, como las propiedades electromagnéticas de los materiales están ligadas a otras propiedades físicas, el georradar permite abordar muy diversas investigaciones sobre materiales constructivos (2). En ingeniería civil se aplica para el estudio de pavimentos, puentes, túneles o localización de instalaciones. En arquitectura se emplea, de forma complementaria a otros tipos de estudios más invasivos, para investigar la composición y espesor de elementos constructivos o la existencia de daños ocultos.

En el campo de las estructuras de hormigón armado es útil para investigar, de forma no destructiva, la armadura interior de acero, especialmente, en edificios que, por su valor patrimonial, deben de ser preservados. El análisis de la señal que genera el reflejo de las ondas electromagnéticas, conocido como “radargrama”, permite estimar, por ejemplo, la distancia de separación entre barras de acero o el espesor del recubrimiento. También se emplea para detectar la existencia de zonas con anomalías en el interior del hormigón, como cavidades o zonas segregadas. Algunos autores han investigado la capacidad del georradar no sólo para detectar armaduras de acero embebidas en hormigón, sino también la posible existencia de patologías internas como la corrosión del armado (3). En otros trabajos se compara la información obtenida con distintas técnicas de inspección no destructiva (tomografía ultrasónica y georradar) en elementos de hormigón armados con barras de acero (4), resultando ambas técnicas viables y complementarias.

No obstante, hoy en día las barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio (Glass Fiber-Reinforced Polymers, GFRP) son una alternativa a las barras de acero en estructuras de hormigón por sus excelentes propiedades mecánicas (elevada resistencia a tracción), unido a su ligereza y durabilidad (5). En este sentido, cabe destacar su capacidad para resistir la corrosión y el ataque químico, así como su mayor neutralidad electromagnética en comparación con otros materiales, pudiendo mejorar las prestaciones de las estructuras de hormigón armado convencionales (6). Especialmente, en situaciones donde, por las condiciones ambientales, el hormigón reforzado con acero ofrece condiciones de servicio no adecuadas (7-8).

Las barras de GFRP se emplean, fundamentalmente, como armado de elementos estructurales a flexión (9) y cortante (10) ya que, en principio, no son aptas para resistir esfuerzos

a compresión. Su caracterización incluye, entre otros, la realización de ensayos de tracción de la barra y de adherencia en la zona del anclaje (11-12).

Además de las guías internacionales de recomendaciones de diseño (13-15), las normas estructurales avanzan para incluir criterios de cálculo y diseño de elementos estructurales de obra nueva con armaduras de FRP (16). En ellas se tienen en cuenta sus particularidades, como su comportamiento elástico lineal hasta rotura, su módulo de elasticidad inferior al acero o su comportamiento bajo carga mantenida a largo plazo.

Algunos trabajos experimentales estudian la detección de barras de GFRP embebidas en elementos de hormigón mediante las técnicas de inspección de ultrasonidos y georradar (17). Se constata que las barras de GFRP se detectan con más dificultad que las de acero. Los autores señalan que la inspección con georradar mediante ondas de mayor frecuencia mejora la información obtenida. No obstante, los trabajos publicados hasta la fecha sobre la aplicación del georradar a la inspección de armaduras de fibra de vidrio embebidas en hormigón son aún escasos y limitados.

La incorporación creciente de estructuras de hormigón armado con barras de tipo plástico, requiere avanzar en la investigación sobre las técnicas de inspección no invasivas que puedan resultar de aplicación, especialmente aquellas que sean de fácil implementación práctica. El presente estudio tiene por finalidad investigar la capacidad de detección de armaduras de GFRP embebidas en hormigón con la técnica del georradar. La escasez de estudios comparativos inspeccionando hormigones con barras de acero y de GFRP hace necesario abordar trabajos experimentales como el descrito en el presente trabajo. Cabe destacar que en este caso se emplea un equipo portátil de muy fácil aplicación en obra, lo que favorece que los hallazgos del estudio tengan aplicación directa en la práctica de la ingeniería y la arquitectura.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se ha realizado un estudio en laboratorio e “in situ” para investigar sobre la capacidad de la técnica de inspección por georradar para detectar barras de polímeros reforzados con fibra embebidos en losas de hormigón. La inspección se realiza con un aparato de georradar portátil (modelo C-THRU de IDS GeoRadar Srl y Leica Geosystems) por su facilidad de empleo en inspecciones “in situ”.

2.1. Programa experimental en laboratorio

En primer lugar, se diseñaron y fabricaron dos losas de hormigón (Losa 1 y Losa 2) en cuyo interior se dispusieron barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) y barras de acero B 500 SD, con el objetivo de estudiar las diferentes respuestas obtenidas en la inspección con georradar de las armaduras.

Las principales variables del estudio fueron: el tipo de material de las barras de armado (polímeros reforzados con fibra de vidrio y acero), el diámetro de la barra, el recubrimiento o distancia de la barra a la superficie de la losa de hormigón, la distancia de separación entre las barras (barras muy juntas podrían ser más difíciles de detectar) y la disposición del armado (longitudinal o en retícula).

Las dos losas tenían unas dimensiones de 120 cm de largo por 64 cm de ancho y 20 cm de canto. Este tamaño permite su manipulación para poder realizar la inspección con georradar sobre las dos superficies del elemento. Se fabricaron con un hormigón cuya resistencia a compresión a 28 días fue de 36 MPa, obtenida del ensayo a compresión de probetas cilíndricas normalizadas.

En la Losa 1 se varió el diámetro de las armaduras empleadas, de 6 mm a 32 mm, la distancia entre barras fue de 100 mm, excepto para el diámetro 32 que estaba separado 125 mm.

En la Losa 2 se dispusieron las armaduras con separaciones distintas para estudiar la dificultad de diferenciar armaduras muy próximas. En esta misma Losa 2, se colocó una parte del armado en retícula (parrilla) para investigar la señal entregada por el aparato.

Las imágenes de la Figura 1 muestran la armadura dispuesta en cada una de las losas, representando en azul las barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio y en rojo las de acero. En la Tabla 1 y la Tabla 2 se recogen los principales datos del armado de cada losa.

Tabla 1. Datos principales armadura dispuesta en la Losa 1

PARÁMETRO	BARRA 1		BARRA 2		BARRA 3		BARRA 4		BARRA 5		BARRA 6		BARRA 7		BARRA 8	
DIÁMETRO mm	6		12		14		14		16		20		20		32	
EMPRESA GFRP	RTHP				C-bar Marshall		RTHP		RTHP		RTHP		RTHP		RTHP	
RECUBRIMIENTO SUPERIOR mm	25		25		25		25		25		25		25		32	
RECUBRIMIENTO INFERIOR mm	169		163		161		161		159		155		155		138	
SEPARACIÓN ENTRE ARMADURAS mm	-	100		100		100		100		100		100		125		-
MATERIAL	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP
LONGITUD cm	39	25	51	13	39	25	39	25	39	25	39	25	39	25	39	25

Tabla 2. Datos principales armadura dispuesta en la Losa 2

PARÁMETRO	BARRA 1		BARRA 2		BARRA 3		BARRA 4		BARRA 5		BARRA 6		EMPARRILLADO 7	
DIÁMETRO mm	16												Ø16 # 7.5	
EMPRESA GFRP	RTHP (Vialobra, S.L.)													
RECUBRIMIENTO SUPERIOR mm	25												25	
RECUBRIMIENTO INFERIOR mm	159												159	
SEPARACIÓN ENTRE ARMADURAS mm	-	20		20		50		80		110		-	-	
MATERIAL	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP
LONGITUD cm	39	25	39	25	39	25	39	25	39	25	39	25	39	25

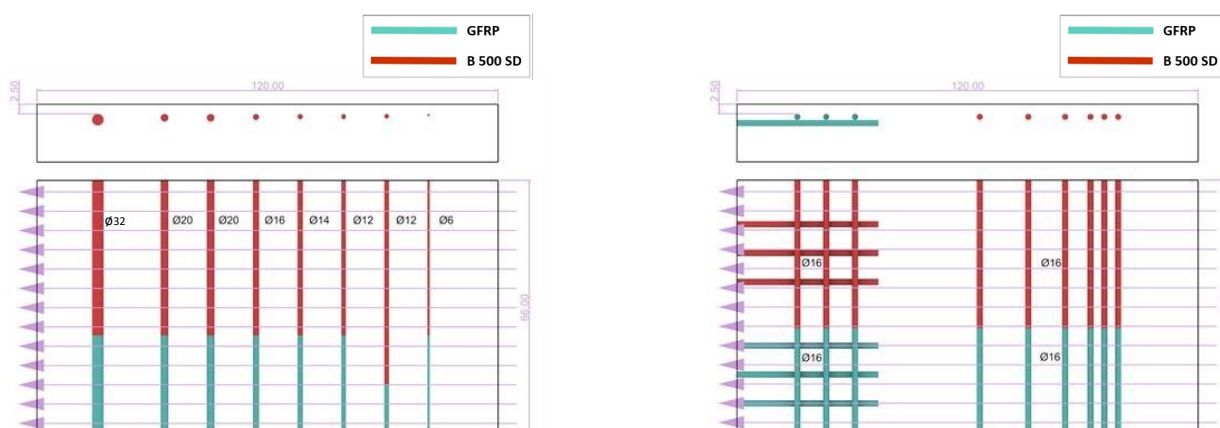


Figura 1. Armadura dispuesta en cada losa: a) Armado de la Losa 1 y b) Armado de la Losa 2

2.2. Programa de inspección de losas de hormigón “in situ”

El trabajo en laboratorio permite crear un entorno controlado para evaluar la inspección con georradar de barras de GFRP y acero embebidas en hormigón, ya que el tipo, posición, diámetro y profundidad de recubrimiento son conocidos con exactitud. No obstante, se ha querido complementar el trabajo con inspecciones “in situ” de dos losas de hormigón de dos obras reales. En estos casos no existe la variedad de parámetros del estudio en laboratorio, pero en cambio permite verificar la viabilidad de esta técnica de inspección no invasiva en las condiciones reales de la obra.

En concreto, se ha inspeccionado una losa de hormigón de solera de la obra del Puerto de Burriana armada con barras de acero y una losa de solera de la obra del Puerto de Vinaròs armada con barras de GFRP. En ambos casos las losas tenían una única capa de armado.

Cabe señalar que en estos trabajos de inspección “in situ” se ha empleado el mismo aparato georradar portátil que en las inspecciones de laboratorio.

2.3. Procedimiento de inspección

El presente estudio se ha realizado empleando un aparato modelo C-THRUE de IDS GeoRadar Srl y Leica Geosystems. Dispone de antenas de doble polarización, con frecuencia central de 2 GHz. La polarización dual permite la detección de barras de refuerzo tanto las situadas en el primer nivel de refuerzo como en el segundo. Las imágenes de la Figura 2 muestran el aparato utilizado y el procedimiento de inspección.

El modelo de georradar utilizado es pequeño, manejable para inspecciones in-situ y tiene una resolución suficiente para elementos habituales de hormigón armado en edificación. Elementos de hormigón de gran canto o mayores dimensiones requerirían aparatos georradar mayores para alcanzar mayor profundidad.

El procedimiento de inspección, tanto en la inspección en laboratorio como de las losas “in situ”, ha consistido en realizar sucesivas pasadas del aparato sobre las losas en la dirección perpendicular a las armaduras, desplazando cada una de ellas 5 cm respecto de la anterior.

Las imágenes de la Figura 3 muestran tres de las distintas opciones, con distinta gama de colores e información, que el equipo de georradar C-Thrue ofrece del “radargrama” obtenido para la sección de la losa en la que se ha realizado la pasada. Para el presente trabajo, se ha decidido utilizar la gama en blanco y negro por mostrar la información con un alto contraste, lo que permite la detección de elementos más tenues.

3. RESULTADOS

3.1. Resultados de la inspección en laboratorio

3.1.1. Tratamiento de la información obtenida

La inspección realizada ha dado como resultado 13 recorridos del georradar por cada cara de cada losa. Cada pasada, a su vez, otorga dos imágenes, correspondientes a las dos antenas del georradar (superficial y profunda), siendo una mejor para detectar elementos superficiales y la otra para los profundos. En total se obtienen 52 imágenes que han sido analizadas por grupos, dependiendo de la losa y su orientación.



Figura 2. a) Aparato empleado y b) Inspección por georradar de una de las losas del estudio

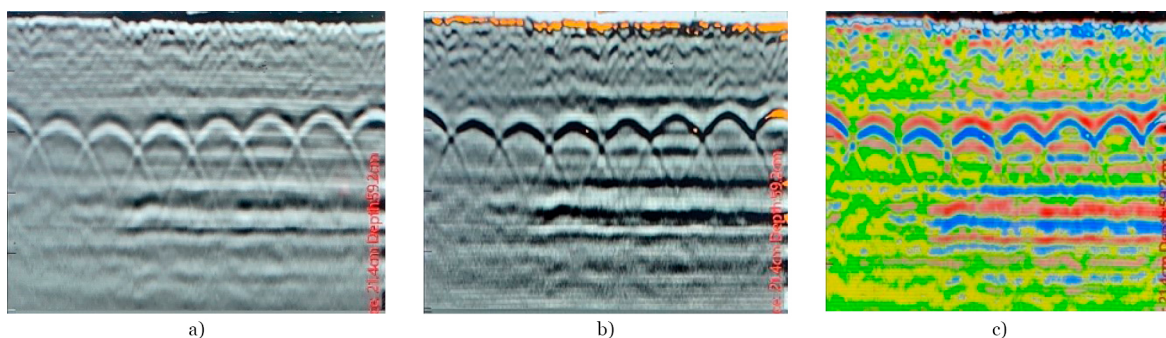


Figura 3. a) Radargrama BlackWhite, b) Radargrama PValue y c) Radargrama Jet 4. Fuente: Elaboración propia

Las distintas imágenes procedentes de la inspección con georradar (“radargramas”) se han introducido en un software de CAD 3d (Rhinceros 8), ubicándolas en la posición que les corresponde dentro de un modelo 3D que reproduce cada losa. Tras colocar las imágenes, se han analizado, identificando la señal en forma de hipérbola generada por la presencia de las distintas armaduras. Dichas hipérbolas se han representado gráficamente mediante Rhinceros 8 (Figura 4.a). No ha sido objeto del presente trabajo obtener un software que realice de forma automática el tratamiento de los resultados. No obstante, dado que el procedimiento seguido es un conjunto ordenado de tareas, cabe la posibilidad de automatizarlo mediante rutinas que combinen programas de dibujo con software de reconocimiento de imágenes Rhinceros 8 (en este caso, para la detección de las hipérbolas).

Como se ha indicado, en los modelos 3D realizados (uno por cada losa) se ha superpuesto la representación gráfica del conjunto de hipérbolas obtenidas en la inspección con georradar (Figura 4.a) con el de las barras de armado realmente dispuestas (Figura 4.b). Esto permite estudiar la mayor o menor capacidad del georradar para detectar las distintas armaduras. Las imágenes de la Figura 5 muestran de forma gráfica los resultados obtenidos en la inspección de las losas.

Se considera que una barra ha sido detectada por el georradar cuando, coincidiendo con la posición conocida de la armadura, es posible observar una señal en forma de hipérbola en el radargrama. En cambio, cuando en la posición de la barra lo que se observa es una señal plana o amorfa, la armadura no se considera que haya sido detectada. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 3 y 4.

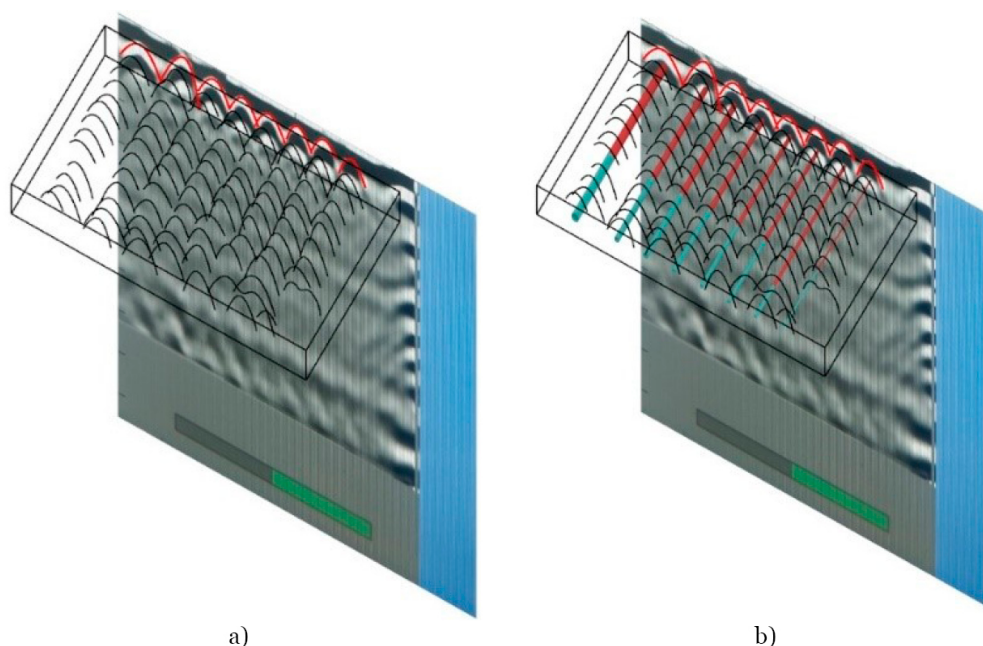


Figura 4. Procesado de imágenes de la Losa 1: a) Representación en el modelo de las hipérbolas obtenidas en la inspección y b) Superposición del esquema de armado de la losa. Fuente: Elaboración propia

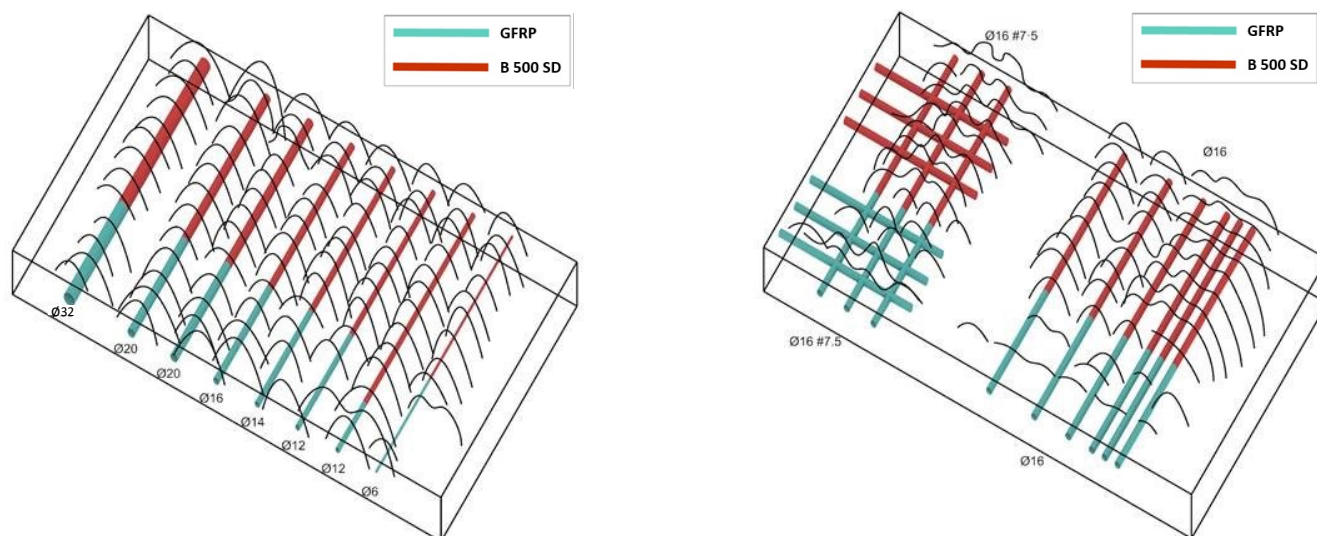


Figura 5. Perspectiva isométrica con la representación de las hipérbolas obtenidas en la inspección con georradar y el armado de cada losa: a) Losa 1 y b) Losa 2 Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Resultados inspecciones georradar en la Losa 1

PARÁMETRO	BARRA 1		BARRA 2		BARRA 3		BARRA 4		BARRA 5		BARRA 6		BARRA 7		BARRA 8	
DIÁMETRO mm	6		12		14		14		16		20		20		32	
MATERIAL	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP
DETECCIÓN A 25 mm	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DETECCIÓN A PROFUNDIDAD MAYOR	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 4. Resultados inspecciones georradar en la Losa 2

PARÁMETRO	BARRA 1		BARRA 2		BARRA 3		BARRA 4		BARRA 5		BARRA 6		EMPARRILLADO 7	
DIÁMETRO mm	16												Ø16 #7.5	
MATERIAL	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP	B 500 SD	GFRP
DETECCIÓN A 25 mm	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DETECCIÓN A PROFUNDIDAD MAYOR	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗

3.1.2. Análisis de los resultados de las inspecciones en laboratorio

A continuación, se recoge el análisis de los resultados presentados en el punto anterior.

Losa 1

En la Losa 1 se comprueba que las armaduras longitudinales de acero B 500 SD son detectadas por el georradar, para cualquier diámetro y desde ambas caras de inspección (ambas profundidades de inspección).

Sin embargo, sólo las armaduras de GFRP de diámetro 16 o mayores son detectadas en ambas profundidades. Las barras de GFRP de diámetro 12 y 14 son detectadas cuando están próximas a la superficie de inspección (recubrimiento de 25 mm), pero no a mayor profundidad. Las barras de diámetro 6 de GFRP no han sido detectadas en ninguna de las dos profundidades de inspección.

Losa 2

Como en el caso anterior, las armaduras de acero B 500 SD son detectadas de forma individual en ambas profundidades de inspección, independientemente de cual sea la separación entre ellas. Sin embargo, la parrilla de acero Ø16 # 7,5 sólo se detecta correctamente cuando se sitúa próxima al plano de inspección (recubrimiento de 25 mm). A mayor profundidad la imagen obtenida con el georradar no permite discriminar las barras individuales de dicha parrilla.

Por otra parte, las barras Ø16 de GFRP, que en la Losa 1 se identifican claramente a ambas profundidades de inspección, cuando se reduce la distancia entre barras ya no pueden ser

discriminadas individualmente en la imagen del georradar. Así, cuando la separación es de 20 mm, en ninguna de las dos profundidades de inspección es posible discriminarlas.

En cuanto a la parrilla Ø16 # 7,5 de redondos de GFRP, la imagen obtenida mediante el georradar permite discriminar las barras individualmente cuando la inspección se realiza desde la superficie más próxima al armado (recubrimiento de 25 mm), pero no es posible dicha discriminación cuando la profundidad es mayor (similar a lo que ocurre con la parrilla de acero B 500 SD).

3.2. Resultados de la inspección “in situ”

3.2.1. Tratamiento de la información obtenida

Al igual que en el laboratorio, los radargramas obtenidos fueron analizados para detectar señales en forma de hipérbolas, indicativas de la existencia de barras de armado de la losa.

Además, y como se detalla en el siguiente apartado, para la inspección del armado de fibra de vidrio en la losa del puerto de Vinaròs se utilizó otra de las posibilidades de inspección del aparato de georradar empleado, en la que el equipo ofrece una representación en retícula del armado detectado.

3.2.2. Análisis de los resultados de inspecciones “in situ”

Además de la investigación llevada a cabo en el laboratorio, se han inspeccionado “in situ” dos losas empleando el mismo aparato C-THRUE de IDS GeoRadar Srl y Leica Geosystems. En concreto, se ha inspeccionado una losa de solera en la obra del Puerto de Burriana armada con barras de acero y una losa de solera en la obra del Puerto de Vinaròs armada con barras de GFRP. A continuación, se recogen los resultados obtenidos.

Obra de la losa de amarre del puerto de Burriana.

Al tratarse de una losa con armadura de acero, las hipérbolas obtenidas de la inspección con georradar son muy claras, Figura 6. En este caso, las reglas que la salida del aparato facilita permiten deducir que las armaduras están colocadas entre 15 y 17 cm de profundidad. Así mismo, se puede ver también que están colocadas cada 15 cm en ambos sentidos, por lo que se trataría de un armado en forma de parrilla regular de 15 cm $\times$ 15 cm. Se confirma con la empresa encargada de la ejecución de la obra (Vialobra, S.L.) que se trata de una losa armada con una parrilla de 15 cm $\times$ 15 cm.

La inspección in situ corroboró los resultados de sensibilidad del equipo para detectar armaduras de acero embebidas en el hormigón y la posibilidad de identificar, de manera no destructiva, la disposición del armado de acero dentro de la losa.

Obra del puerto de amarre del puerto de Vinaròs.

Además del análisis directo de los radargramas, en la visita al puerto de Vinaròs se realizó otro análisis “en cuadrícula” de una losa de hormigón armada con barras de GFRP. Se trata de una de las opciones de inspección que ofrece el aparato de

georradar empleado. Consiste en realizar pasadas perpendiculares siguiendo unas reglas para obtener una imagen del plano horizontal que se está inspeccionando.

Primer análisis:

Al tratarse de una losa con armadura de GFRP, las hipérbolas obtenidas de la inspección con georradar son menos claras, Figura 7. No obstante, en el análisis directo de los radargramas pueden apreciarse, en cada dirección de la losa y a una profundidad de 15 cm, hipérbolas con distinto intervalo de separación.

Segundo análisis:

Este análisis “en cuadrícula” se realizó inspeccionando una zona de 80 cm $\times$ 80 cm, obteniendo así una imagen cuadrada. En la Figura 8 se recoge el radargrama obtenido (con dos opciones de representación en colores) en el que se refleja la existencia de un armado en retícula regular de unos 30 cm $\times$ 15 cm. Estas imágenes se generan empleando la antena de profundidad del georradar ya que la antena superior no otorgaba la información suficiente como para identificar las armaduras.

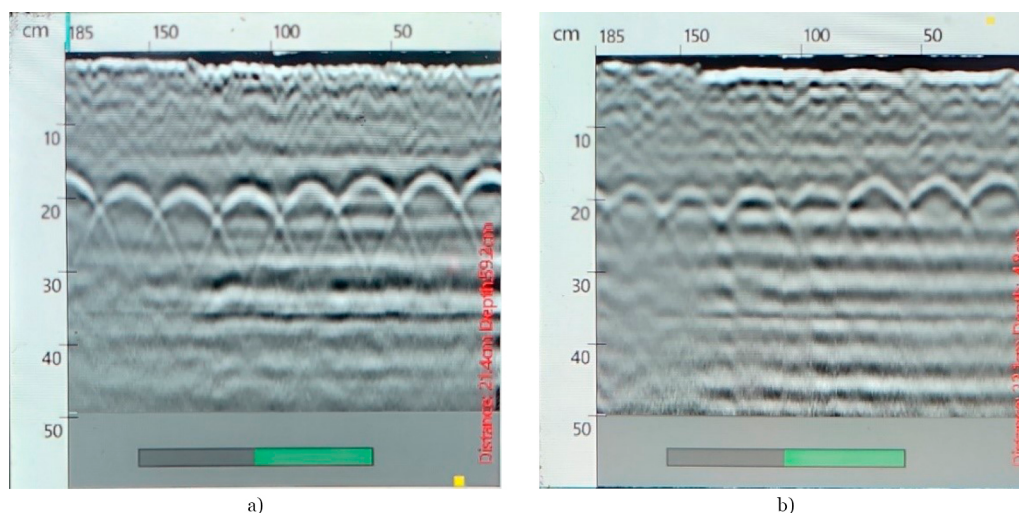


Figura 6. Radargramas obtenidos de la inspección de una losa de hormigón en el puerto de Burriana: a) en la dirección perpendicular a la línea de costa y b) en la dirección paralela la línea de costa. Fuente: Elaboración propia

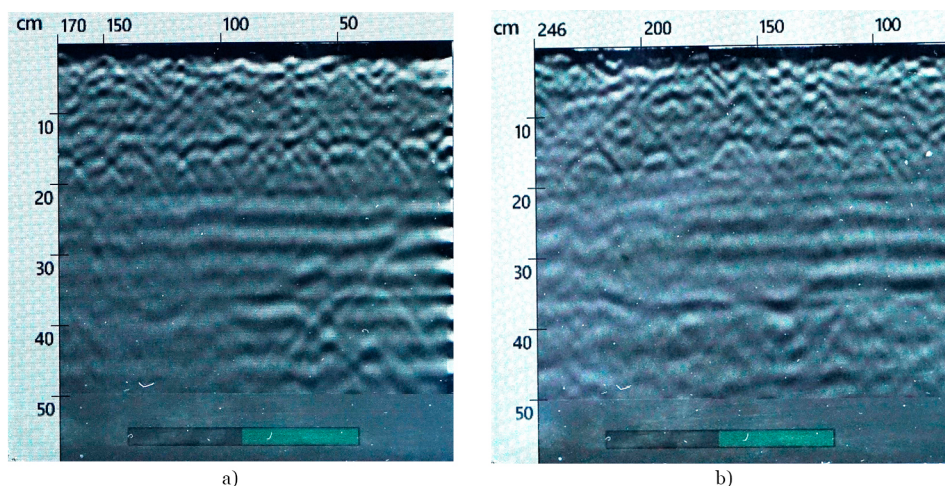


Figura 7. Radargrama de la inspección de una zona de 80 $\times$ 80 cm de la losa en el puerto de Vinaròs: a) en la dirección en la que las barras están separadas 15 cm y b) en la dirección en la que las barras están separadas 30 cm, ambos a una profundidad de 15 cm. Fuente: Elaboración propia

Tercer análisis:

Una vez hecho el primer análisis se observó que las armaduras perpendiculares a la línea de costa estaban más separadas que las paralelas. Es por ello por lo que se decidió ampliar a 120 cm la zona de inspección en este sentido para poder observar más armaduras.

Como se puede observar en las imágenes de la Figura 9, el georradar es capaz de detectar la retícula de armadura de GFRP de la losa de hormigón y, gracias a las reglas que el aparato de georradar utilizado facilita, se puede estimar que se trata de un armado en cuadrícula de unos 15 cm $\times$ 30 cm. La empresa encargada de la ejecución de la obra (Vialobra, S.L.) confirmó que la losa se había armado con una parrilla de armadura longitudinal de $\varnothing 16$ cada 15 cm y transversal de $\varnothing 12$ cada 30 cm.

Frente a los resultados obtenidos en el laboratorio, en los que no se obtenía señal clara que permitiese identificar la posición de barras de diámetro 12 mm a una profundidad de 25 mm pero sí para diámetro 16 mm, en la inspección in-situ en el muelle de Vinaròs se obtuvieron señales claras de la presencia de armaduras de diámetros 16 mm y 12 mm, estando estas armaduras situadas a una profundidad de 150 mm. En definitiva, este resultado ha sido más favorable que la

inspección de las losas de laboratorio. Ello podría ser debido a distintas propiedades del hormigón, cuya influencia no se ha podido valorar en este estudio.

4. CONCLUSIONES

Del trabajo expuesto, tanto en laboratorio como “in situ”, para estudiar la viabilidad de la técnica de inspección con georradar para estructuras de hormigón con barras de GFRP pueden extraerse las siguientes conclusiones del estudio realizado:

- 1) La técnica de inspección con georradar empleando un aparato portátil (modelo C-THRUE de IDS GeoRadar Srl y Leica Geosystems) es muy útil para detectar armaduras de acero embebidas en hormigón debido a las propiedades electromagnéticas del acero. Se han podido detectar barras longitudinales de acero B 500 SD de diámetro comprendido entre 6 y 32 mm, separadas entre sí a distintas distancias y embebidas en un hormigón de resistencia 36 MPa con recubrimientos de 25 mm y $\approx$ 150 mm. Si el armado de acero se dispone en emparrillado $\varnothing 16$ # 7,5, se detecta bien con recubrimiento de 25 mm, pero no a mayor profundidad.
- 2) Aunque con una señal menos clara que para barras de acero, la inspección con georradar en el laboratorio ha permitido

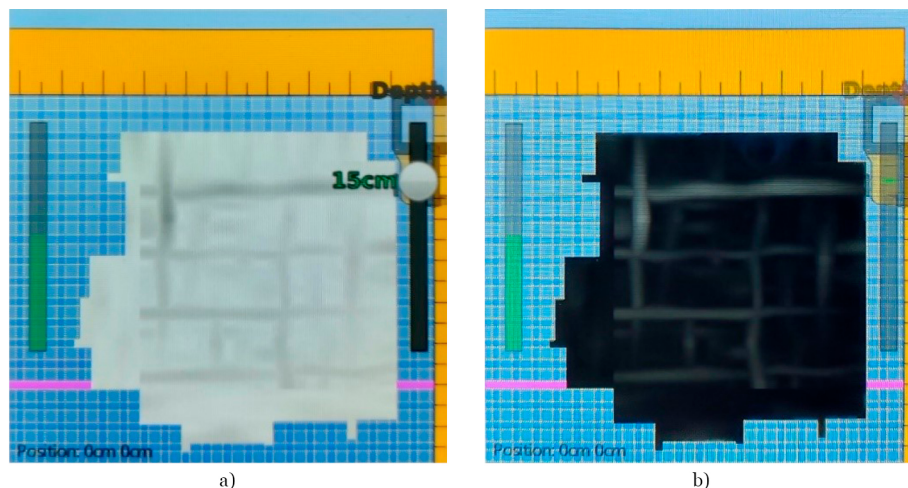


Figura 8. Radargrama obtenido de la inspección “en cuadrícula” de una zona de 80 $\times$ 80 cm de una losa en el puerto de Vinaròs: a) imagen en negro sobre blanco y b) imagen en blanco sobre negro. Fuente: Elaboración propia

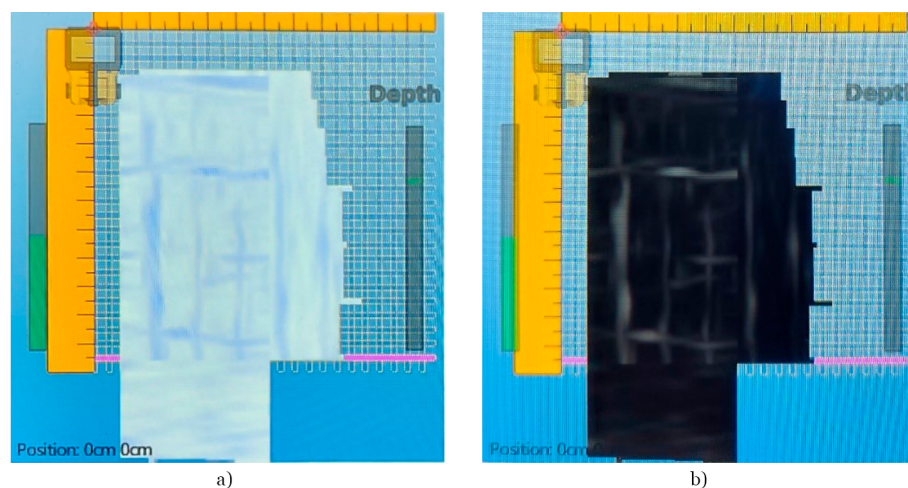


Figura 9. Radargrama obtenido de la inspección “en cuadrícula” de una zona de 80 $\times$ 120 cm de una losa en el puerto de Vinaròs: a) imagen en azul sobre blanco y b) imagen en blanco sobre negro. Fuente: Elaboración propia

detectar barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP) embebidas en hormigón. En el estudio realizado se ha detectado la mayor parte de las barras longitudinales de GFRP de diámetro igual o mayor que 14 mm cuando el recubrimiento de hormigón es de 25 mm.

- 3) En ambos casos (acero y polímeros con fibra de vidrio), la inspección con georradar con el aparato portátil empleado en el estudio permite detectar, de forma no invasiva o destructiva, la presencia de armaduras. Sin embargo, no permite conocer con exactitud el diámetro de la barra. Una posible línea de investigación futura consistiría en estudiar los principales parámetros de las hipérbolas obtenidas en la inspección (focos, semiejes) en relación con la profundidad y diámetro de la barra inspeccionada.
- 4) Se han realizado dos trabajos de campo que corroboran la utilidad de la técnica de inspección con georradar para la detección, de forma no invasiva o destructiva, de armaduras de acero y de GFRP.
- 5) El empleo de losas de hormigón armado “patrón” (es decir, con armado conocido) como las fabricadas para el presente trabajo sería de gran utilidad para calibrar la respuesta del aparato portátil previo a la realización de inspecciones en obra.

AGRADECIMIENTOS

La investigación expuesta ha sido realizada durante una estancia para el desarrollo de un TFG de la UPM en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC-IETec).

Los trabajos se han realizado dentro del marco del Proyecto Intramural PIE 202060E267 “Evaluación de sistemas constructivos y estructurales mediante técnicas experimentales y ensayos físico mecánicos” financiado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Los autores agradecen la colaboración de la empresa Vialobra, S.L. que ha facilitado la información de las obras ejecutadas con armados de GFRP y el acceso a la obra del Puerto de Burriana para realizar la inspección. En particular a D. Rafael Ybarra por su disponibilidad.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los/as autores/as de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Alberto Piñeiro: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción – borrador original.

Sonia Martínez: Análisis formal, Investigación, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Rafael Piñeiro: Análisis formal, Investigación, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Eduardo Lahoz: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración de proyecto.

REFERENCIAS

- (1) Ruiz-Espiga, A. G., Bell, L. A., & Severino, M. J. S. (2023). Applications of ground penetration radar geophysical technology together with infrared thermography, ground electromagnetic survey and other complementary

technologies, in construction. Limitations and possibilities. Informes de la Construcción, 75(569), e476. <https://doi.org/10.3989/ic.89444>

- (2) Martínez-Sala, R., Mené-Aparicio, J., & Rodríguez-Abad, I. (2017). Aplicación de la técnica del georradar en ingeniería civil: evaluación de la variación del contenido de agua en el hormigón. Hormigón y Acero, 68(283), 251-262. <https://doi.org/10.1016/j.hya.2017.05.004>
- (3) Sossa Arancibia, V. A. (2021). Inspección no destructiva de estructuras mediante georradar: análisis de daños por corrosión y por otras patologías. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/369849>
- (4) González Roura, N. (2014). Comparación de técnicas no destructivas en la inspección del hormigón armado: Georradar versus tomografía ultrasónica. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/35633/proyecto%20final%20master.pdf?sequence=1>
- (5) Almerich Chulia, A. I. (2011). Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València). <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/9744/tesisUPV3447.pdf>
- (6) Nanni, A. (1993). Flexural Behavior and Design of RC Members Using FRP Reinforcement. Journal of Structural Engineering, 119(11), 3344–3359. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1993\)119:11\(3344\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:11(3344))
- (7) Sheikh, S., Kharal, Z. (2018). GFRP-Reinforced Concrete Columns Subjected to Seismic Loads. ACI Symposium Publication, 326, 56.1–56.10.
- (8) Robert, M., Cousin, P., Benmokrane, B. (2009). Behaviour of GFRP reinforcing bars subjected to extreme temperatures. Journal of composites for construction, 2010. 14(4), 1587–1596. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000092](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000092)
- (9) Sirimontree, S., Keawsawasvong, S., & Thongchom, C. (2021). Flexural behavior of concrete beam reinforced with GFRP bars compared to concrete beam reinforced with conventional steel reinforcements. Journal of Applied Science and Engineering, 24(6), 883-890.
- (10) Liang, X., Peng, J., & Ren, R. (2023). A state-of-the-art review: Shear performance of the concrete beams reinforced with FRP bars. Construction and Building Materials, 364, 129996. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129996>
- (11) American Concrete Institute (ACI). ACI Committee 440. (2012). Guide tests Methods for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures (ACI 440.3R-12), American Concrete Institute.
- (12) ISO 10406-1. (2015). Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test Methods, Part 1: FRP bars and grids.
- (13) A.C.I. (ACI) ACI Committee 440. (2015). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP Bars). ACI440.1R-15. Farmington Hills, Michigan, USA.
- (14) fib T.G. 9.3, Bulletin 40. FRP reinforcement in RC structures. Lausanne, Switzerland, 2007.
- (15) CNR-DT 203/2006. (2006). Guide for design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars, Rome, Italy.
- (16) Oller, E., Torres, L., de Diego, A. (2023). Embedded Fibre Reinforced Polymers (FRP) reinforcement in concrete structures according to the new version of Eurocode 2. Hormigón y Acero, 74(299-300), 199-210. <https://doi.org/10.33586/hya.2022.3098>
- (17) Malla, P., Khedmatgozar Dolati, S. S., Ortiz, J. D., Mehrabi, A. B., Nanni, A., & Dinh, K. (2023). Feasibility of conventional non-destructive testing methods in detecting embedded FRP reinforcements. applied sciences, 13(7), 4399. <https://doi.org/10.3390/app13074399>

