

# Los métodos geofísicos en los estudios previos del terreno para la rehabilitación de edificios. La iglesia del Monasterio de Santa María de Moreruela (Zamora)

*Application of Geophysical methods in the preliminary studies of the ground for building rehabilitation. The church of Santa Maria de Moreruela Monastery (Zamora)*

J.L. Campano-Calvo<sup>(\*)</sup>, M. del Río<sup>(\*\*)</sup>, A. Farfán<sup>(\*)</sup>, J.L. Campano-Aguirre<sup>(\*\*\*)</sup>

## RESUMEN

El artículo trata de exponer las ventajas de algunos métodos geofísicos en los estudios previos realizados para la rehabilitación de edificios, como herramientas complementarias a las utilizadas tradicionalmente en los estudios geotécnicos para la determinación de las características del terreno. Estos estudios, no intrusivos, permiten determinar de forma sencilla posibles alteraciones en el terreno.

Por último se resumen los trabajos realizados, con estas técnicas, en el Monasterio de Santa María de Moreruela (Zamora), en concreto en el terreno sobre el que se asienta la Iglesia.

## SUMMARY

*The article attempts to explain the advantages of some geophysical methods in previous studies for the rehabilitation of buildings, as complementary tools for the traditional use in geotechnical studies identifying terrain features. These studies, non-intrusive, determine, easily, possible changes in the terrain.*

*Finally, we summarize the work, with these techniques, in the Monastery of Saint Mary of Moreruela (Zamora), particularly in the terrain the church sits on.*

480-6

**Palabras clave:** Métodos geofísicos; rehabilitación; estudios previos; Monasterio de Moreruela; rehabilitación del patrimonio.

**Keywords:** Geophysical methods; rehabilitation; previous studies; Moreruela Monastery; heritage rehabilitation.

<sup>(\*)</sup> Universidad de Salamanca (España).

<sup>(\*\*)</sup> Universidad Politécnica de Madrid (España).

<sup>(\*\*\*)</sup> Arquitecto, Zamora (España).

Persona de contacto/Corresponding author: jlcam@usal.es

## 1. INTRODUCCIÓN

Para poder acometer la rehabilitación de un edificio, con garantía suficiente, es necesario conocer en profundidad el estado en que se encuentra dicho edificio. Este conocimiento se consigue a través de los denominados "Estudios previos a la rehabilitación" (1).

Estos estudios previos constituyen la fase del conocimiento preliminar, anterior a la intervención, y su importancia radica en la necesidad de considerar el edificio y su entorno como un sistema integral, en el que interactúan diversas acciones. El objeto de los mismos será identificar la realidad constructiva del edificio, así como los procesos patológicos que ha sufrido y las lesiones consiguientes, sus causas y su evolución, además de evaluar su funcionalidad y sus valores históricos y artísticos (en el caso de edificios históricos), para servir de base sobre la que se sustente la naturaleza y alcance de la intervención a acometer.

A partir de los mismos se estará en situación de recomendar el estudio y aplicación de los materiales y técnicas adecuadas en las actuaciones de reparación, rehabilitación, restauración y mantenimiento, con la finalidad de asegurar la detención de los procesos de deterioro o su reversibilidad.

Considerando lo anterior, el conocimiento del estado actual de un edificio y de sus deficiencias requiere un posible doble diagnóstico: constructivo y cultural. Este doble diagnóstico constituye el fundamento de los "Estudios previos" (2).

El diagnóstico constructivo engloba el conocimiento de:

- Las actuaciones realizadas desde el inicio de su construcción y a lo largo de su existencia sobre él mismo y su entorno.
- Los distintos tipos de materiales que lo definen y la compatibilidad entre ellos.
- Los agentes externos, biológicos, físico-químicos, medioambientales, etc. que han puesto en acción los distintos procesos patológicos.
- La localización espacio-temporal de las lesiones en los distintos sistemas constructivos y partes del edificio.

El diagnóstico cultural, será necesario si el edificio a rehabilitar tiene un relevante significado histórico, cultural, documental o paisajístico. En alguno de esos casos, el estudio deberá completarse con los aspectos históricos, de forma que conduzca a un diagnóstico que permita adoptar una intervención responsable.

Como el objetivo del artículo son los estudios previos sobre el terreno, y estos son parte del diagnóstico constructivo, nos centraremos en ellos.

Un desarrollo correcto del diagnóstico constructivo debe llevarse a cabo en dos fases claras:

1. Caracterización constructiva del edificio y sus partes.
2. Estudio patológico del mismo.

En la primera fase, se procederá a la observación y a la toma de los datos (organolépticos y físico-químicos) sobre el edificio, que nos permita, por una parte, la confirmación del tipo de lesión y, por otra, las pautas de la evolución del proceso y su importancia. En la segunda, identificadas las lesiones, se hace necesario entender los procesos patológicos que las producen.

Por otra parte, para que el diagnóstico constructivo sea lo más preciso posible, los técnicos utilizan diversos métodos instrumentales de auscultación y de monitorización para caracterizar los materiales y sistemas, y cuantificar los daños. Además, en muchas ocasiones, los equipos técnicos reúnen profesionales de diversas disciplinas: Arquitectura, historia, bellas artes, ingeniería geotécnica y estructural, expertos en materiales, especialistas de laboratorios de ensayos, etc (3) (4).

### 1.1. Estudios previos sobre el terreno

En el caso concreto de los estudios previos sobre el terreno, incluidos en el diagnóstico constructivo, se realizan, habitualmente, a través del denominado "Estudio o reconocimiento geotécnico del terreno". Los objetivos de este Estudio son:

- La caracterización del terreno, a través de la definición de los estratos que lo conforman (espesores, profundidad, etc), así como caracterización de la naturaleza de los mismos.
- La determinación de posibles problemas relacionados con el agua: existencia y en su caso profundidad del nivel freático; fluctuaciones en el mismo que dieran lugar a riesgos debidos a filtraciones, arrastres, erosiones internas, etc.

Para el reconocimiento geotécnico del terreno pueden utilizarse desde la básica inspección visual, hasta técnicas de campo como:

- Prospecciones manuales o mecánicas, con o sin obtención de muestras: catas o sondeos.
- Ensayos de laboratorio sobre las muestras obtenidas.

- Ensayos *in situ*, como las pruebas de penetración o el ensayo de carga con placa.

En el ámbito de la arqueología y la ingeniería civil es frecuente complementar el estudio geotécnico con métodos geofísicos. Estos métodos provienen de la geofísica. La geofísica, engloba técnicas encaminadas a deducir las condiciones del subsuelo a través de la observación de fenómenos físicos, bien sean naturales o artificiales, directa o indirectamente relacionándolos con la estructura geológica del terreno (5) (6) (7) (8).

Aunque estos métodos no se utilizan prácticamente en la edificación, el Código Técnico de la Edificación, en el documento básico Seguridad Estructural-Cimientos [SE-C], los recomienda como complemento a las técnicas más utilizadas en los estudios geotécnicos (9).

Por ello, el objeto de este artículo es la presentación de algunos de estos métodos como complemento a los estudios previos que sobre el terreno se realizan en edificación, así como la aplicación de algunos de ellos en el conocimiento del terreno sobre el que se asienta el Monasterio de Santa María de Moreruela.

## 1.2. Los métodos geofísicos

Los métodos geofísicos no son destructivos y se pueden utilizar en terrenos escarpados o de difícil acceso en los que la geotecnia no tiene cabida para utilizarlos conjuntamente con los sondeos geotécnicos o bien en solitario.

Los métodos geofísicos pueden ser: eléctricos, sísmicos, magnéticos y electromagnéticos (10) (11) (12) (13).

### 1.2.1. Métodos eléctricos

Los métodos eléctricos son los métodos geofísicos más antiguos, empleándose en ingeniería geológica, minería, obras públicas, arqueología y medioambiente.

Consisten en la exploración del subsuelo a partir de las mediciones de resistividad eléctrica del mismo. Se hace pasar por el subsuelo una corriente eléctrica y se determina el potencial que produce entre dos puntos de la superficie del terreno.

Dentro de estos métodos los ensayos más comunes son: calicatas eléctricas; sondeos eléctricos verticales (SEV); tomografías eléctricas y ensayos de sondeo de pozo.

Estos ensayos podrían posibilitar en el ámbito de la rehabilitación de edificios: la

localización de niveles freáticos, la detección y modelación de cavidades e incluso la caracterización de estructuras Geológicas.

### 1.2.2. Métodos sísmicos

Los métodos sísmicos estudian la respuesta del terreno cuando se propaga a través de él una onda de compresión producida por medios mecánicos en la superficie. El parámetro físico que se analiza es la velocidad de propagación de la onda a través de los materiales del subsuelo en función de la compacidad de los mismos. Tal parámetro aporta información de las características geomecánicas de la zona en que se apliquen.

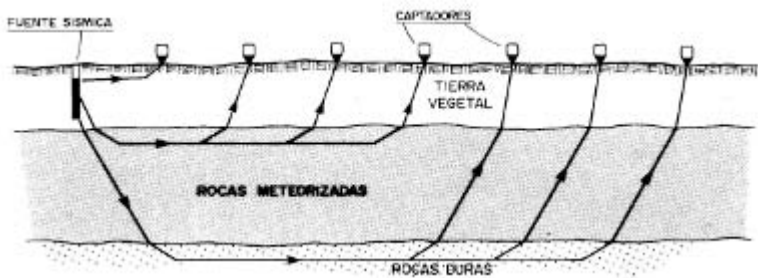
Dentro de estos métodos los ensayos más comunes son: Perfiles de Sísmica de Refracción ( $V_s$  y  $V_p$ ); Perfiles de Sísmica de Reflexión; Tomografías Sísmica; Sísmica Pasiva y Ensayos en sondeo de pozo (*down-hole*, *cross-hole*). Los más destacados son la Sísmica de Refracción y Reflexión, tanto en superficie, como en pozo.

Aunque estos métodos son muy utilizados en la ingeniería civil, tendrían aplicaciones en la rehabilitación de edificios para determinar la estratigrafía del terreno; localizar el nivel freático; modelizar estructuras geológicas o testificación de pilotes.

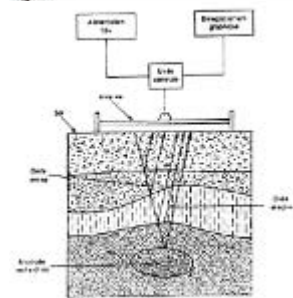
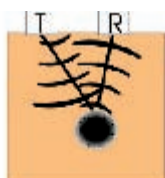
A continuación se describe el método de Sísmica de Refracción, por ser éste uno de los utilizados en el reconocimiento del terreno de la Iglesia del Monasterio.

Esta técnica de análisis consta de una fuente de energía mecánica, si se generan impactos, situada en un punto de la superficie del terreno. Sobre dicha superficie, se coloca una alineación de geófonos capaces de detectar los movimientos producidos por las ondas sísmicas. Normalmente, estos captadores se disponen sobre la componente vertical.

La energía liberada de un modo brusco por la fuente sísmica se propaga en forma de ondas longitudinales y transversales en diferentes direcciones radiales desde dicho punto. Las ondas de mayor velocidad son las longitudinales, que pueden llegar a los geófonos de dos maneras: primero, directamente desde la fuente sísmica y a través de la capa superficial del terreno con velocidad ( $V_1$ ) y segundo, como rayos refractados, pues las ondas se propagan en todas las direcciones y algunas de ellas se refractan y penetran en la segunda capa transmitiéndose a una velocidad mayor ( $V_2$ ). Cada punto de la superficie de separación se comporta como una nueva fuente sísmica.



1



2

1. Esquema de funcionamiento del ensayo de sismica de refracción.

2. Reflexión de las señales emitidas por una antena de Geo-Rádar (14).

mica dando lugar a los rayos incidentes, de acuerdo con la Ley de Snell. Como una parte del recorrido de esos rayos se efectúa por la capa 2, a una mayor velocidad, a partir de una distancia dada, denominada distancia crítica  $X_c$ , las ondas refractadas alcanzan los geófonos antes que las ondas directas (Figura 1).

La representación gráfica de los tiempos de llegada (ordenadas) a los diferentes puntos de registro (abscisas), que se conoce como domocrona u hodógrafo, permite definir, en los macizos constituidos por varias capas o niveles y a partir de la magnitud de la distancia crítica y las velocidades características de cada capa que se obtiene, como el inverso de la pendiente de cada tramo rectilíneo, los espesores o potencias de dichas capas.

Para llevar a cabo un perfil sísmico se necesita una unidad de registro o sismógrafo y un cierto número de captadores (geófonos), normalmente superior a 10, que se clavan en el terreno a unos 7 cm, conectados al equipo a través de un cable principal y dispuesto en una línea recta. En cuanto a la capacidad de resolución en profundidad, depende de muchos factores, pero normalmente oscila entre 1/3 y 1/4 de la penetración de la onda total en el terreno.

En sismica de refracción los diferentes refractores detectados obedecen fundamentalmente a cambios en el grado de compactación del terreno, que en muchos casos van acompañados de cambios litológicos.

### 1.2.3. Métodos magnéticos y electromagnéticos

Los métodos magnéticos se utilizan frecuentemente para explorar de un modo rápido y económico grandes zonas. El magnetómetro mide desviaciones producidas por el campo magnético de la tierra. Los métodos electromagnéticos miden desviaciones producidas por el paso de una corriente generada por nosotros mismos.

Estos métodos sirven para el barrido de grandes áreas y la localización de cavidades.; la valoración de yacimientos minerales y los estudios arqueológicos. En el caso

de la rehabilitación de edificios podrían utilizarse para la detección de estructuras geológicas y restos arqueológicos.

Dentro de los posibles ensayos realizados con este método destaca la utilización del Geo-Rádar, técnica utilizada en el Monasterio, por lo que se describe a continuación de manera sucinta.

Los equipos de Geo-Rádar generan impulsos electromagnéticos que al interceptar un objeto o una superficie de discontinuidad, son reflejados y detectados por la antena receptora. De toda la energía que llega al objetivo, sólo se reflejará una parte de ella (mayor o menor dependiendo de las propiedades eléctricas del objetivo) y el resto continúa su camino reflejándose en nuevos objetivos hasta su total amortiguación (Figura 2).

La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en un medio depende de las características eléctricas de éste; en especial de la permeabilidad magnética, de la constante dieléctrica y de la resistividad (o conductividad). En un medio homogéneo e isótropo esta velocidad sería constante (por ejemplo, en el aire es de 30 cm/s) pero en un medio estratificado esta velocidad varía dependiendo de cada capa atravesada y sufriendo la onda una serie de modificaciones que, como se verá más adelante, determinan su penetración y resolución.

El Geo-Rádar trabaja en una banda de emisión entre 10 MHz y 2 GHz emitiendo unos 50.000 impulsos por segundo. Estos impulsos son los que llegan al objetivo y se reflejan, siendo captados por la antena receptora. Como el receptor no es capaz de registrar tan alto número de impulsos, lo que hace es un muestreo tomando un punto de cada impulso, desplazándolos ligeramente en el tiempo, con lo que realiza un barrido de la señal y se reconstruye ésta en función del tiempo. El equipo puede elegir entre 1.000 y 30.000 impulsos lo que da lugar a entre 2 y 50 trazas/s.

“La llegada de las distintas reflexiones indica el tiempo invertido por la señal en recorrer el camino de ida hasta el reflector y de vuelta hasta la antena, por lo cual la profundidad a la que se encuentra el objeto viene dada por la expresión [1]:

$$[1] \quad H = v \cdot t / 2$$

La velocidad de propagación en un medio distinto del aire, como se ha indicado, viene condicionada por la conductividad y la constante dieléctrica del medio, esto es [2]:

$$[2] \quad V = F(\sigma \epsilon)$$

A efectos prácticos, en materiales poco conductores, la velocidad se puede aproximar por la expresión [3]:

$$[3] \quad H = c \sqrt{\epsilon_r}$$

Donde  $c$  es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío (30 cm/s) y  $\epsilon$  la constante dieléctrica del material que puede adoptar valores comprendidos entre 1 y 81" (14).

Por tanto es necesario conocer la constante dieléctrica del material para poder evaluar la profundidad del reflector. Este conocimiento se puede adquirir bien a través de ensayos de laboratorio, o bien calibrando sobre un objeto conocido.

Los datos obtenidos en el campo se almacenan en soporte magnético y su tratamiento se realiza con métodos específicos a la finalización del estudio de campo, con programas informáticos adecuados con los que se obtienen las secciones donde se muestran las discontinuidades de las capas del subsuelo y las anomalías que se hallan en él (cavidades, cambios litológicos, objetos diversos, etc.).

## 2. EL MONASTERIO DE SANTA MARÍA DE MORERUELA. LA IGLESIA

El Monasterio de Santa María de Moreruela se encuentra situado no lejos de la vía romana de la Plata, en la finca de la Guadaña cerca del río Esla, enclavada en el término Municipal de la Granja de Moreruela (Zamora). El valle dónde se encuentra ubicado el Monasterio en otros tiempos era fértil con gran abundancia de agua, al estar próximo al río, y los terrenos que lo circundaban eran pantanosos.

El Monasterio fue construido en la segunda década del Siglo XII, hacia el año 1131, cuando llegaron a la zona los monjes cistercienses Sancho y Pedro, quienes inician el gran desarrollo económico, espiritual y administrativo de un importante dominio territorial de las tierras castellanas.

Como en otros monasterios fundados por la Orden, los monjes blancos se establecen en tierras poco accesibles que consiguen transformar en aptas, para ser utilizadas.

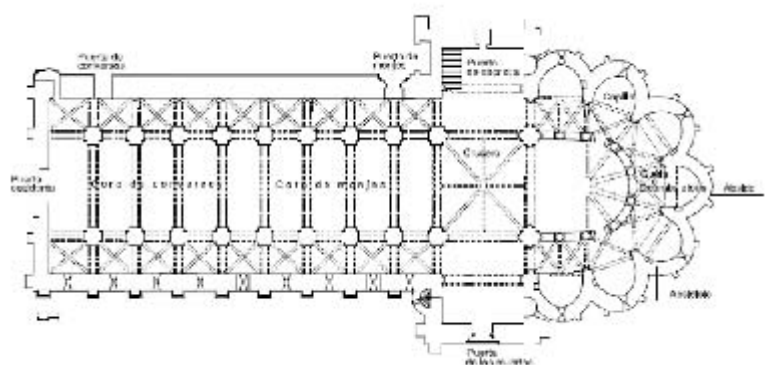
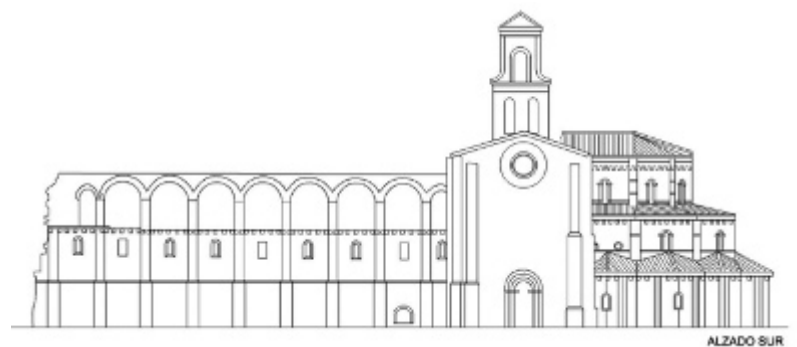
La iglesia del Monasterio (Figura 3) conserva, en el lado norte del transepto, una parte de la bóveda de medio cañón. A él, abren los extremos del altar central del templo con un arco de medio punto doblado; todo ello articulado en torno a dos pilastras de sección cruciforme con semicolumnas adosadas y columnas en sus ángulos para

el volteo de las nervaduras del tramo central del transepto.

El altar central está compuesto de dos tramos bien definidos: un presbiterio recto, cubierto con una bóveda de medio cañón y otro curvo o cilindro absidal que se cubre con un cuarto de esfera reforzado por seis nervaduras de perfil triple, que convergen en la clave y apean a media altura en ménsulas del tipo *cul de lamp*. El tramo recto y curvo está formado por ocho pilastras circulares que se alzan sobre bancada corrida, que se interrumpe para dejar y dar paso al deambulatorio. En ellas apean otros tantos arquillos que son de medio punto en la parte recta, y apuntados en el cilindro absidal; el paramento construido encima de las pilastras circulares, se continúa en altura, tras una línea de imposta en la que arrancan las nervaduras de la bóveda.

Tras la fila de columnas discurre el deambulatorio. A él abren siete absidiolos y entre cada dos los separan una semicolumna adosada, que sirve de apeo a la estructura de la bóveda corrida del mismo. Se cubre el deambulatorio con una sucesión de bóvedas de arista, cuadradas en los presbiterios rectos y trapezoidales en el cilindro, reforzadas con nervaduras de triple sección. Los huecos de paso que abren al deambulatorio, son de medio punto y de realización muy sencilla, sin más decoración que la imposta con dobladura del arco de acceso en unos o la sola existencia de un fajón apeado en ménsulas en otros.

3. Alzado y planta de la Iglesia.



3

#### 4. Estado actual de la cabecera de la Iglesia.

Los dos absidiolos de los extremos abren a la nave del transepto y sus embocaduras son dobladas y apuntadas.

La portada de medio punto del lado norte de la nave del transepto permite el acceso a lo que fuera claustro monástico, la del lado sur, da acceso al cementerio.

La decoración luce en capiteles y basas. Por los restos que aún perduran fue pictórica, con alusiones a la consagración y advocación a los Santos y a la Virgen.

En la actualidad, la iglesia del Monasterio se encuentra prácticamente en ruina (Figura 4).

##### 2.1. Antecedentes de los trabajos realizados

El solar donde se ubica el Monasterio de Santa María de Moreruela es sensiblemente plano, sin presentar prácticamente desniveles. Este estudio se limita a la zona de la iglesia, que tiene una forma rectangular plana con una superficie total aproximada de 1.500 m<sup>2</sup>.

En la búsqueda bibliográfica y documental, realizada para conocer la existencia de trabajos previos sobre el terreno del Monasterio, se han encontrado estudios realizados sobre la zona por el Instituto Geológico Minero de España (15) (16) y estudios arqueológicos, en los terrenos de la Iglesia, llevados a cabo por la Junta de Castilla y León (17).

De los primeros, destacar que la zona del estudio se enmarca sobre materiales de época del cuaternario, y en concreto sobre terrazas fluviales del río Esla Q1 T8 y que el solar del monasterio se enclava en la época del cuaternario-pleistoceno, y se corresponde con arenas con cantos cuarcíticos.

De los resultados del análisis arqueológico llevado a cabo por la Junta de Castilla y León, a través de catas, en diferentes puntos del interior de la iglesia, localizadas sobre el muro Norte del cerramiento, se destacan los siguientes resultados:

La estratigrafía que se encontró en el subsuelo distingue dos niveles:

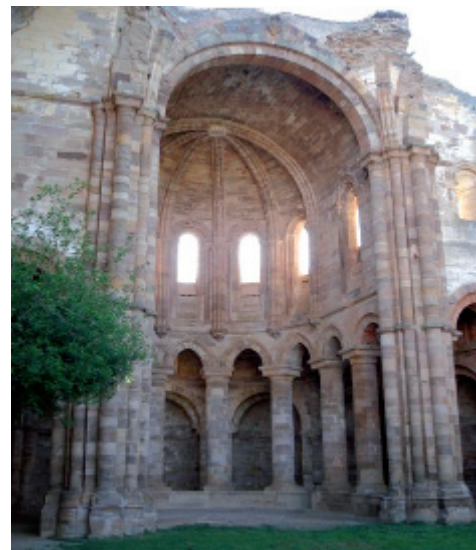
1. El primero lo constituyen estratos posteriores o contemporáneos a la construcción del edificio, cortados por las fosas de enterramientos del momento más moderno de la necrópolis.
2. El segundo lo forman los niveles inferiores de las catas, donde se localizan los enterramientos más antiguos.

Entre los niveles que se han considerado dentro del primer grupo se encuentra:

- Nivel vegetal de escasa potencia.
- Preparado arenoso de color anaranjado.
- Echadizos más o menos arenosos, de consistencia suelta, con abundantes piedras y tejas, así como restos óseos.
- Nivel de ocupación de características muy especiales formado por tres estratos superpuestos que afloran indistintamente según las zonas. El superior consiste en tierra arcillosa muy compactada, el segundo arena fina de color amarillo y el tercero parece tratarse de pizarra disgregada de color rosa.
- Nivel de argamasa muy compactada y argamasa muy disgregada.
- Nivel de escombros que pueden estar relacionados con las últimas reformas del muro de los pies.

Los niveles encontrados dentro de segundo grupo son muy homogéneos y se reducen a:

- Echadizo arcilloso de color oscuro con algunas piedras y restos óseos, de gran humedad.



- Echadizo arcilloso extremadamente húmedo en el que se localizan grandes piedras, muchas de ellas cantos rodados que se han considerado que tienen función drenante del terreno, dada la proximidad de los niveles freáticos.

### 3. TRABAJOS REALIZADOS EN EL TERRENO DE LA IGLESIA DEL MONASTERIO

En este apartado se resumen los trabajos realizados para confirmar los resultados obtenidos en los trabajos geotécnicos desarrollados por la Junta de Castilla y León

Estos trabajos han comprendido: una prospección geofísica mediante sísmica de refracción, así como la aplicación del Georádar.

Además, a fin de identificar los distintos materiales en profundidad, se realizaron dos calicatas: una en el lateral Sur del solar, identificándose los materiales de terreno vegetal y relleno y una segunda calicata en el perímetro del vallado de la construcción que detectó la presencia de las gravas con arcillas (Figura 7). Las calicatas realizadas, se realizaron con una barrena helicoidal motorizada (un sinfín) de diámetro 200 mm., perforando hasta la profundidad de -3,50 m. para posteriormente, introducir un tomamuestras, y recoger terreno inalterado del fondo, para utilizarlo en las pruebas Lambe llevadas a cabo.

Tras la identificación mediante las calicata de la grava con arcillas de carácter fluvial Q1T8, se tomó una muestra para su identificación en laboratorio, realizando en el mismo los siguientes ensayos: Granulometría de suelos por tamizado; Límites de Atterberg y Clasificación de suelos según Casagrande, ensayo Lambe de expansividad y pruebas edométricas.

#### 3.1. Ensayo mediante sísmica de refracción

La técnica empleada ha consistido en generar ondas sísmicas en superficie por medio de un martillo, que golpea sobre una placa metálica en determinados puntos de disparo. La perturbación provocada por el impacto genera ondas que se transmiten por el subsuelo y que son recogidas por cada geófono.

El equipo utilizado (P.A.S.I.-16S12) incorpora un ordenador y un Software (SEISMO-SOFT) que dirige el funcionamiento del sismógrafo, elabora los datos adquiridos y prevé un buen soporte para interpretarlos.

El estudio se ha realizado disponiendo de un perfil de medida, compuesto de una línea sísmica dispuesta de forma consecutiva.

La línea sísmica abarca 60 m. y consta de 12 geófonos de recepción y tres puntos de disparo. La separación entre geófonos se realizó a 5,00 m y los puntos de disparo se han situado de la siguiente manera:

- Disparo N.º A. Situado a 2,50 metros del geófono 1.
- Disparo N.º B. Situado entre los geófonos 6 y 7.
- Disparo N.º C. Situado a 2,50 metros del geófono 12.

Los geófonos utilizados son de componente vertical y de una frecuencia de 10 Hz. Éstos se han conectado al sismógrafo mediante un cable de 26 conductores. Para dar las cotas a los geófonos se realizó una nivelación altimétrica obteniéndose las cotas de cada línea por separado, utilizando un taquímetro electrónico con distanciómetro incorporado Wild TC1000. El aparato posee un anteojo coaxial que permite la medición de ángulo y distancia al mismo tiempo.

De los diferentes sismogramas obtenidos, se han sacado los correspondientes tiempos de las primeras llegadas de las ondas longitudinales, y mediante el estudio informático de las mediciones, se han obtenido las velocidades de los diferentes refractores y las profundidades en cada geófono.

La interpretación o procesado de los datos de campo se realizó utilizando los programas Seismo-Soft, Firstpix, Seisrefa y Gremix.

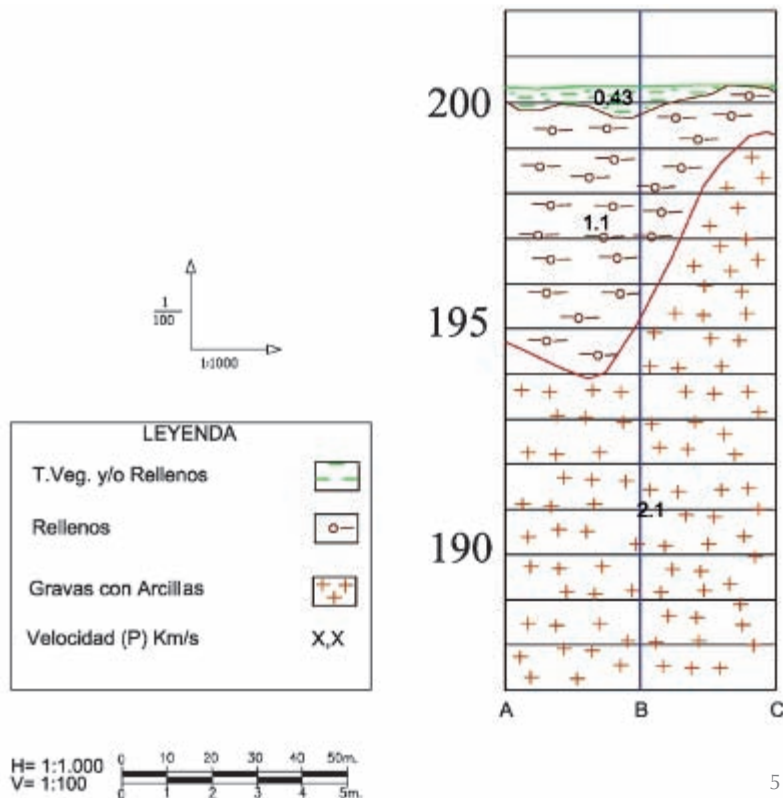
#### 3.1.1. Resultados

Los horizontes geotécnicos detectados mediante el método de Sísmica de Refracción se verifican mediante inspección visual y tras la realización de las calicatas, distinguiéndose tres tipos: I. Terreno vegetal; II. Rellenos; III. Gravas con arcillas (Figura 5).

El terreno vegetal, posee un espesor medio de 0,50 m con velocidad sísmica de 0,43 km/s de tipo ripable.

Los rellenos, poseen un espesor de 5m al principio del perfil, 4,50m en mitad del perfil y de 1,00 m al final del mismo, con velocidad sísmica de 1,10 km/s tipo ripable. Se trata de unos rellenos de material suelto con bolos de distinta litología y cantos angulosos en matriz de tipo arenoso. Por sus características, este material es de carácter drenante por lo que hace que el agua de lluvia penetre fácilmente a su través pasando al estrato más profundo de gravas con arcillas.

Las gravas con arcillas, identificadas así en campo mediante la calicata y coincidente con la clasificación según Casagrande de GC con un pase por el tamiz 200 de 26,3%



5. Perfil estratigráfico (P1).

6. Equipo Noggin-500 de Sensor & Software.

y límite líquido de 48,1 e índice de plasticidad de 21,5, y en profundidad detectada por sísmica de Refracción con clasificación no ripable.

### 3.2. Inspección mediante Geo-Radar

La investigación mediante Geo-Rádar se llevó a cabo en los exteriores del edificio, para localizar los drenajes exteriores situados por el exterior, en paralelo a la fachada Sur de la iglesia del Monasterio de Santa María de Moreruela.

Se utilizó un aparato de la marca Noggin modelo 500 de Sensor & Software (Figura 6) con los siguientes componentes: Unidad Central; Antenas de 500 MHz. (emisora y receptora) y Dispositivo de visualización (monitor o impresora).

La unidad central controla y alimenta las antenas, así como procesa las señales que recibe de la antena receptora. Con esta unidad se elige la ventana de tiempo requerida en cada trabajo concreto, así como el número de muestras por segundo necesari-

as para reconstruir la traza de la señal. Esta unidad dispone de una pequeña pantalla de osciloscopio que permite la visualización de cada traza, así como un conmutador para decidir el número de trazas por segundo que llegan desde la antena con el fin de adecuarlo a la velocidad de desplazamiento de la misma.

Las características de los traductores o antenas más habituales figuran en la Tabla 1.

El dipolo formado por receptor y emisor puede ir montado de forma solidaria (monoestático) o bien separado (biestático) dependiendo del tipo de aplicación.

El dispositivo de visualización puede ser una impresora de papel continuo, o bien un monitor en el que se puede observar la imagen del perfil barrido por las antenas en tiempo real.

El equipo va montado sobre un carro en el que en su parte inferior va la antena y en la parte superior del manillar un ordenador con pantalla.

#### 3.2.1. Resultados

De la aplicación de la técnica del Geo-Rádar, mediante la aplicación de varias pasadas de la plataforma del aparato a nivel del terreno, sobre líneas perpendiculares, previamente marcadas en la zona exterior del muro meridional de la iglesia (Figura 7) y a la vista de los registros efectuados, en cada pasada, y posterior interpretación de los mismos, se reconocen en las imágenes del Geo-radar las siguientes anomalías:

- Perfil n.º 1. En el P-1 a 3,00 m del origen (suelo) un elemento constructivo hundido de unos dos metros de anchura.
- Perfil n.º 2. En el P-2 a 6,30 m del origen (suelo) un elemento constructivo con dintel abovedado de unos dos metros de anchura.

La interpretación de la imagen del Perfil 2 realizada con el Geo-Rádar (Figura 8) confirman la existencia de una galería de drenaje, realizada en fábrica y rematada con una bóveda, semejante a las encontradas en la arqueología llevada a cabo por la Junta de Castilla y León en la zona de la iglesia.

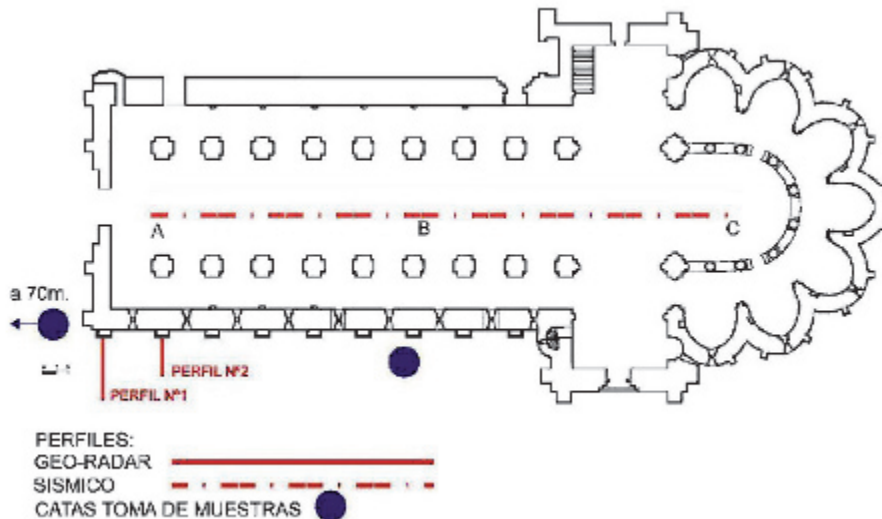
El primero de los perfiles P-1 presenta un derrumbamiento del muro de la galería (Figura 7).

El segundo de los perfiles P-2, está constituido por dos muros hastiales y una bóveda de cierre, encontrándose en perfectas condiciones constructivas para canalizar las aguas subterráneas o de lluvia.

Tabla 1. Características de los traductores o antenas

Frecuencia (MHz)	Resolución (cm)	Penetración (m)
50	30	4-30
100	10	2-18
300	3	1-8
500	2	0,5-4
1	1	0,1-1





7

### 3.3. Ensayos realizados sobre muestras obtenidas *in situ*

Como se ha comentado, a fin de identificar los distintos materiales en profundidad, se realizaron dos calicatas: una en el lateral Sur del solar, identificándose los materiales de terreno vegetal y relleno, y una segunda calicata en el perímetro del vallado de la construcción, que detectó la presencia de las gravas con arcillas.

De esta segunda cata se tomó una muestra para su identificación en laboratorio, realizando en el mismo los siguientes ensayos: Granulometría de suelos por tamizado (Figura 9); Límites de Atterberg y Clasificación de suelos según Casagrande.

#### 3.3.1. Resultados

- Ensayo de límites Atterberg: límite líquido: 48,1; Límite Plástico: 26,6; Índice de Plasticidad: 21,5
- Clasificación según Casagrande: GC.
- Ensayo Lambe realizado conforme a

UNE-103600 sobre la fracción inferior a 2 mm del horizonte geotécnico III de gravas con arcillas: índice de hinchamiento: 0,05 MPa y 0,30 MPa; Cambio Potencial de Volumen: 5,40 y 7,50.

En la gráfica del análisis granulométrico se observa que la fracción inferior a 2 mm es de un 41% en peso del material, con lo que se confirma que este horizonte geotécnico de gravas con arcillas, tiene un potencial de expansividad alto.

### 4. CONCLUSIONES

El perfil del terreno esta constituido por tres estratos: el primero de ellos de 0,50 m de espesor de tierra vegetal, el segundo con espesor variable de 5,00 m al principio del perfil, 4,50 m en mitad del perfil y de 1,00 m al final del mismo, de rellenos de material suelto con bolos de distinta litología y cantos angulosos en matriz de tipo arenoso, y un último estrato de gravas con arcillas, éstas últimas con un potencial de expansividad alto.

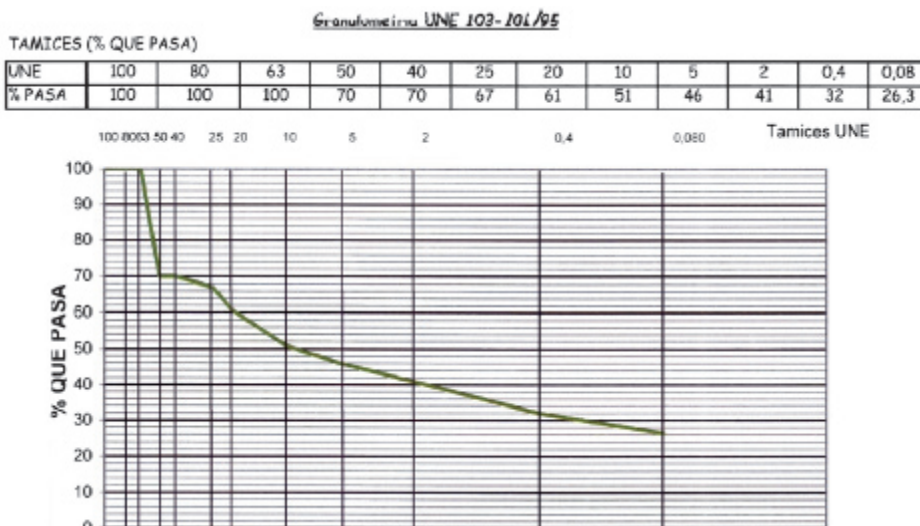


8

7. Localización de los perfiles del Geo-Rádar.

8. Imágenes obtenidas con el Geo-Rádar.

9. Ensayo granulométrico.



9

Dada las características del relleno (alta capacidad drenante), la baja permeabilidad del horizonte de gravas con arcillas y la existencia de nivel freático, es lógico pensar que en el contacto entre ambos niveles aparezca agua freática discurriendo por el contacto.

A través del Geo-Rádar se constata la existencia de restos de una red de drenaje interior a la iglesia, que probablemente recogería el agua del nivel freático del terreno canalizándola hacia fuentes cercanas al Monasterio y exteriores al edificio. Estos drenajes mantuvieron al terreno con un equilibrio de aguas hasta la profundidad de tres metros, durante ochocientos años, impidiendo que las arcillas expansivas situadas a nivel de la cimentación, recibieran las aguas de lluvia procedentes de las cubiertas de la iglesia del monasterio y de las tierras de los alrededores del conjunto monástico.

La constatación con el Geo-Rádar de la rotura y, por tanto, la falta de funcionamiento de los drenajes, justificaría el estado actual de ruina de los muros perimetrales que forman la estructura del crucero y el muro meridional de la Iglesia, al estar ambos muros cimentados en el estrato de las gravas con arcillas. En ambos se aprecian grietas y desplomes que forman procesos patológicos típicos de fenómenos de expansividad.

Por último, los resultados obtenidos en las pruebas y ensayos realizados en los terrenos de la Iglesia del Monasterio permiten concluir que la utilización de técnicas alternativas a las utilizadas en los estudios geotécnicos posibilitan confirmar los resultados de éstos, así como añadir datos a dichos estudios que, en el caso concreto que se presenta, han posibilitado determinar las causas de su ruina.

## REFERENCIAS

- (1) Villegas, L., Lombillo, I. (2007). Los estudios previos en la rehabilitación de construcciones del patrimonio construido. Congreso Construção 2007 -Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.
- (2) Structuralia-UPM. Diagnóstico en rehabilitación de edificios. <http://es.scribd.com/doc/33787175/Diagnostico-en-Rehabilitacion>
- (3) Caballero Zoreda, L., Latorre González-Moro, P. (1995). La importancia del análisis estratigráfico de las construcciones históricas en el debate sobre la restauración monumental. *Informes de la Construcción*, 46(435): 5-18. doi:10.3989/ic.1995.v46.i435.1093.
- (4) Rodríguez Liñán, C., Pérez Gélvez, P., Morales Conde, M.J. (2011). Inspección Mediante Técnicas no Destructivas de un Edificio Histórico: Oratorio San Felipe Neri (Cádiz). *Informes de la Construcción*, 63(521): 13-22. doi:10.3989/ic.10.032.
- (5) Favetto, A., Pomposiello, C., Sainato, C., Dapeña, C., Guida, N. (2005). Estudio geofísico aplicado a la evaluación del recurso geotermal en el sudeste de Entre Ríos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60(1). Buenos Aires.
- (6) Nazarian, S., Diehl, J. (2000). *Use of Geophysical Methods in Construction*. Edit. ASCE.
- (7) Mussett, A., Aftab Khan, M. (2000). *Looking into the Earth. An Introduction to Geological Geophysics*. Cambridge University Press.
- (8) García Yagüe, A. (2003). *Temas de Geología Aplicada a las Obras Públicas*. Editorial Col. ICCiP
- (9) Ministerio de Vivienda. Código Técnico de la Edificación. Documento básico Seguridad Estructural - Cimientos [SE-C] (2006)
- (10) Arandi Rodríguez, M. (2011). *Geofísica aplicada a la obra civil. Método geoelectrico y sísmica de refracción. Casos prácticos*. Edit: Geoconsult.
- (11) <http://tecnicasdelsuelo.ecsocial.com/15935/documentos/presentacintcnicasdelsuelo.pdf>
- (12) [http://www.geozone.es/geofisica\\_magneticos](http://www.geozone.es/geofisica_magneticos)
- (13) <http://www.wideworld.es/estudio-subsuelo-metodos-geofisicos.pdf>
- (14) Carrasco Morillo, P. (2002). Introducción al Geo-Radar y sus aplicaciones. *Teledetección: nociones y aplicaciones*, pp. 85-98. Universidad de Salamanca.
- (15) Instituto Geológico y Minero. Mapa geológico de España.
- (16) <http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp>
- (17) Larrén, H. (2008). *Moreruela. Un Monasterio en la historia del Císter*. Editorial: Junta de Castilla y León.

\* \* \*