

# O método de radar de penetração no solo (GPR) na caracterização do Mosteiro da Batalha

## The ground-penetrating radar (GPR) method in the characterization of the Monastery of Batalha

NUNO BARRACA<sup>1,\*</sup>   
 MANUEL MATIAS<sup>2</sup>   
 FERNANDO ALMEIDA<sup>2</sup> 

1. Morph Lda., Rua Aníbal de Lima, n.º 170, 3000-030 Coimbra, Portugal

2. GeoBioTec, Dep. Geociências, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal

\* [nunobarraca@gmail.com](mailto:nunobarraca@gmail.com)

### Resumo

A caracterização do Mosteiro da Batalha incluiu o método de prospeção geofísica de radar de penetração no solo (GPR). Este método, não destrutivo e indireto, permite obter imagens 2D/3D de elevada resolução das estruturas investigadas. Devido à natureza do estudo, foram utilizadas grelhas de medida e parâmetros de aquisição adequados, elevada precisão da localização dos pontos de leitura e processamento de dados adaptado. O GPR clarificou questões relacionadas com a construção e o estado de conservação do Mosteiro. São apresentados resultados da investigação do terreno sob o Mosteiro, localizando infraestruturas recentes e antigas, fundações de colunas e estruturas de interesse histórico-arqueológico. A caracterização de elementos construtivos justificou a utilização do GPR na superfície das paredes do claustro de D. João I, permitindo propor uma estrutura interna do aparelho construtivo das paredes. O GPR provou ser eficaz e expedito e permitiu obter informação indispensável para contribuir para a preservação, recuperação e reabilitação do monumento.

### PALAVRAS-CHAVE

Mosteiro  
 Batalha  
 Georadar  
 Caracterização  
 Paredes  
 Fundações  
 Infraestruturas

### Abstract

The characterization of the Monastery of Batalha included the use of the geophysical method of ground-penetrating radar (GPR), a non-destructive and indirect method that provides high-resolution 2D/3D images of the structures to investigate. Owing to the nature and aims of the survey, appropriate measurement grids, acquisition parameters and adapted data processing techniques were used. The GPR survey provided important information about the Monastery foundations, construction and conservation. GPR high-resolution images allowed to locate recent and ancient infrastructures, columns foundations and structures of historical-archaeological interest. The characterization of the Monastery walls was also carried out using GPR on the surface of walls of the Cloister of D. João I and of the Church. These results contribute for the proposal of an inner structure model of the walls. GPR proved to be an efficient and expeditious method that allowed obtaining information to be used in the preservation, recovery and rehabilitation of the Monument.

### KEYWORDS

Monastery  
 Batalha  
 Georadar  
 Characterization  
 Walls  
 Foundations  
 Infrastructure

## Introdução

A preservação, manutenção e restauro de património histórico, edificado, artístico e cultural tem sido preocupação de especialistas e organismos internacionais originando a elaboração das Cartas Patrimoniais de Atenas [1], Burra [2], Cracóvia 2000 [3] e Lisboa [4].

A intervenção de reabilitação e restauro em monumentos classificados e outro parque edificado de interesse histórico-cultural, tem por objetivo preservar o património construído e, atualmente, recorre a técnicas muito diversificadas que permitem, não só uma correta visualização e imagem dos edifícios, mas também a elaboração de um diagnóstico do seu estado conservação para o planeamento de um conjunto de intervenções destinadas a garantir a sua preservação.

Um projeto de reabilitação necessita de toda a informação sobre técnicas e fases de construção, eventuais modificações estruturais, materiais de construção utilizados, infraestruturas enterradas, patologias, fundações e natureza do solo subjacente. Estes dados podem ser difíceis de encontrar, pois os registos escritos e históricos são frequentemente escassos, por vezes imprecisos, insuficientes ou mesmo inexistentes. No entanto, a informação necessária para o diagnóstico e planeamento pode ser obtida em edifícios semelhantes e contemporâneos aos que estão a ser intervencionados. A reabilitação e restauro de monumentos inclui conhecimentos e visão de diversas áreas, sendo uma tarefa claramente multidisciplinar [5-6].

Na ausência deste tipo de informação pode-se recorrer a pesquisas preliminares usando métodos invasivos/destrutivos, como amostragem com remoção física de materiais e sondagens. No entanto, esta abordagem é dispendiosa e pode conduzir a danos patrimoniais irreversíveis. Por isso, os métodos a considerar não devem causar impactos negativos ao património edificado e deve recorrer-se a técnicas de imagiologia e caracterização não destrutivas [7].

Os métodos de prospeção geofísica são técnicas não destrutivas que têm sido utilizados com sucesso para obtenção de imagens do subsolo e caracterização de estruturas naturais ou antrópicas soterradas. Mais recentemente, estes métodos foram propostos para a caracterização de património edificado e de obras de arte, e proporcionaram valiosas informações em aspetos tão diversos como a caracterização de fundações, a identificação de patologias, e a caracterização de fases construtivas e de materiais de construção [8-11].

O Mosteiro da Santa Maria da Vitória, mais conhecido por Mosteiro da Batalha, ao longo dos tempos tem sido objeto de intervenções de restauro [12] e, neste trabalho, demonstra-se a aplicação de métodos de prospeção geofísica de elevada resolução, nomeadamente do radar de penetração no solo (*ground-penetrating radar*, com o acrónimo GPR), na caracterização daquele monumento. Em particular, é abordada a utilização do GPR na investigação do terreno sob o Mosteiro, localização de infraestruturas, fundações e características das paredes.

O trabalho começa por sintetizar a aplicação dos métodos de prospeção geofísica na caracterização do património edificado. De seguida, introduz, de um modo sucinto, o método de prospeção geofísica utilizado, processamento dos dados e, finalmente, apresenta e discute os resultados da caracterização do subsolo e paredes do monumento.

## Métodos de prospeção geofísica na caracterização de património edificado

Os métodos de prospeção geofísica são técnicas, não invasivas e não destrutivas, utilizadas em prospeção mineira, engenharia civil e, mais recentemente, na caracterização de património edificado [13-14]. A adaptação dos métodos geofísicos ao património construído levou ao desenvolvimento da chamada microgeofísica [15]. A microgeofísica usa técnicas geofísicas modificadas e adaptadas para diagnosticar, monitorizar e fornecer informações relevantes para a solução de problemas relacionados aos estudos do Património Histórico, nomeadamente, com vista à caracterização de materiais de construção, identificação de patologias, localização de infraestruturas e continuidade e tipo de elementos de construção em monumentos, edifícios históricos e obras de arte.

Os métodos geofísicos mais populares para investigar edifícios, monumentos históricos ou objetivos patrimoniais, tais como esculturas, gravuras, painéis de pedras ou obras de arte, são a tomografia sísmica 2D e 3D, radar de penetração no solo, tomografia elétrica, tomografia ultrassónica e termografia [15]. Outros métodos, como a microgravimetria [16], sísmica passiva [17] e ressonância magnética nuclear [18], também têm sido considerados.

A escolha e utilização de um método depende da finalidade e características do projeto. Assim, a deteção de fraturas pode utilizar GPR [19] e tomografia de ultrassons [20], enquanto a investigação de patologias, como humidade em paredes, pode recorrer a tomografia elétrica [21-22] que também pode ser usada para a caracterização de terrenos e fundações sob edifícios [23-24].

No entanto, a complexidade dos problemas inerentes à caracterização de património aconselha a utilização de vários métodos e técnicas que proporcionem informação complementar. A estratégia multimétodo tem que considerar os objetivos e característica de cada projeto em si [25-27]. Por exemplo, uma estratégia combinada usando tomografia elétrica e GPR foi proposta por Grangeia e colaboradores para investigar diversas fases de construção romana e medieval [28].

A Tabela 1 sintetiza a utilização dos métodos de prospeção geofísica em estudos de caracterização de património, indicando as principais vantagens e desvantagens de cada um.

## O método de radar de penetração no solo (GPR) na caracterização do Mosteiro da Batalha

**Tabela 1.** Métodos geofísicos na caracterização de património.

<b>Método de prospeção geofísica</b>	<b>Aplicações</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Resistividade elétrica (resistividade elétrica)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Caracterização do solo</li> <li>· Localização de estruturas 2D/3D</li> <li>· Espessura de estruturas</li> <li>· Cavidades</li> <li>· Nível freático</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Modelação 2D/3D</li> <li>· Estimativa de profundidades e espessuras</li> <li>· Boa resolução na deteção do nível freático e rocha base</li> <li>· Boa capacidade de deteção de elementos de natureza antrópica</li> <li>· Alguma definição litoestratigráfica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Necessidade de mão de obra</li> <li>· Necessidade de contacto físico com o meio</li> <li>· Necessidade de meio condutor</li> <li>· Dificuldades logísticas inerentes à operação com cabos elétricos no terreno</li> <li>· Disponibilidade de espaço livre</li> <li>· Baixa resolução</li> <li>· Ambiguidade na interpretação</li> </ul>
GPR (georradar) (permissividade elétrica)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Localização de estruturas e infraestruturas (2D e 3D)</li> <li>· Litoestratigrafia</li> <li>· Objetos metálicos</li> <li>· Espessura de estruturas</li> <li>· Vazios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Alta resolução</li> <li>· Possibilidade de visualização imediata</li> <li>· Rápida obtenção de dados e avaliação de resultados</li> <li>· Aplicabilidade em espaços reduzidos</li> <li>· Reduzida mão de obra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Equipamento caro</li> <li>· Processamento requer operador experiente</li> <li>· Posicionamento preciso das medidas</li> <li>· Suscetível à regularidade da acoplagem entre a antena e terreno</li> <li>· Suscetibilidade dos dados a interferências eletromagnéticas</li> <li>· Necessidade de antenas blindadas</li> </ul>
Indução eletromagnética (condutividade elétrica)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Estruturas 2D e 3D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Equipamento portátil</li> <li>· Pouca mão de obra e rapidez de execução</li> <li>· Facilidade de localização de estruturas condutoras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Equipamento caro</li> <li>· Medidas qualitativas</li> <li>· Modelação difícil</li> <li>· Interferência de ruído eletromagnético ambiental</li> <li>· Baixa resolução</li> </ul>
Refracção sísmica (velocidade de propagação de ondas sísmicas)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Estratigrafia</li> <li>· Nível freático</li> <li>· Caracterização mecânica de meios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Capacidade de estimativa de velocidades de propagação das ondas e de profundidade</li> <li>· Capacidade de deteção da rocha base, nível freático e espessuras de recobrimentos</li> <li>· Obtenção de parâmetros mecânicos dos materiais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Baixa resolução</li> <li>· Mão de obra</li> <li>· Necessidade de espaço livre</li> <li>· Fonte sísmica</li> </ul>
Termografia (temperatura)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Aparelhos construtivos</li> <li>· Infraestruturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Rápida a aquisição de grandes áreas</li> <li>· Medições e visualização em tempo real</li> <li>· Pouca mão de obra</li> <li>· Equipamento barato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Baixa resolução</li> <li>· Medidas qualitativas</li> <li>· Variações diurnas</li> <li>· Ambiguidades na interpretação</li> <li>· Apenas visualiza temperaturas superficiais</li> <li>· Ruído de fonte de calor próximas</li> </ul>
Potencial espontâneo (condutividade elétrica)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Alteração química de materiais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Barato</li> <li>· Fácil implementação e aquisição</li> <li>· Pouco processamento</li> <li>· Pouca mão de obra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Medidas qualitativas</li> <li>· Dificuldade de modelação</li> <li>· Contactos físicos estáveis quimicamente</li> <li>· Necessidade e meios condutores</li> <li>· Presença de cabos elétricos no terreno</li> <li>· Medições superficiais</li> <li>· Baixa resolução</li> <li>· Lenta aquisição</li> </ul>
Gravimetria / microgravimetria (aceleração da gravidade)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Vazios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Deteção de vazios</li> <li>· Facilidade de modelação</li> <li>· Pouca mão de obra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Equipamento caro</li> <li>· Correções aos dados laboriosas</li> <li>· Precisão das medidas</li> <li>· Interferências laterais de construções</li> </ul>
Magnetometria (susceptibilidade magnética)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Objetos metálicos</li> <li>· Cerâmica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Baixo custo</li> <li>· Rapidez de aquisição</li> <li>· Pouca mão de obra</li> <li>· Facilidade de visualização de dados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Suscetibilidade à proximidade de objetos metálicos e interferência de ruído eletromagnético ambiental</li> <li>· Necessidade de correções dos dados</li> <li>· Variação do campo magnético</li> </ul>

A caracterização do Mosteiro da Batalha é uma tarefa complexa, que envolve a necessidade de aplicação de várias técnicas de acordo com o objetivo específico de cada local a investigar. Neste monumento foram efetuadas campanhas de prospeção geofísica utilizando vários métodos (tomografia elétrica 2D e 3D, tomografia sísmica, sísmica de refração, GPR e potencial espontâneo) descritas e discutidas noutros documentos [29-31].

Nas últimas décadas, o desenvolvimento de equipamentos e processamento de dados obtidos na aplicação de GPR permitiu que esta técnica evoluísse de uma mera visualização e inspeção expedita do terreno para a imagiologia de elevada resolução e diagnóstico em deteção de infraestruturas, estudo de edifícios, pavimentos, pontes, túneis, geotecnia e aterros [32].

O GPR tem sido utilizado na caracterização do património edificado como ferramenta de investigação de diversos elementos relevantes à sua reabilitação. Foi demonstrada a sua utilização na deteção e reparação de fraturas [9], e na caracterização de edifícios modernos para informar sobre estrutura interna de paredes, elementos estruturais e infraestruturas, características do solo e fundação, betão armado, alterações ao edificado e patologias [11].

O trabalho aqui apresentado explora a utilização do GPR na caracterização do subsolo e paredes do Mosteiro da Batalha, para clarificar a natureza das fundações e dos terrenos debaixo do mosteiro, bem como a constituição interna das paredes. A escolha deste método justifica-se pelo espaço disponível, rapidez de aquisição de dados sem perturbar a normal utilização do monumento, comprovada aplicação a projetos desta natureza e capacidade de produzir imagens de elevada resolução dos meios investigados.

Atualmente, as técnicas GPR são uma metodologia bem conhecida e devidamente documentada na bibliografia [16-20]. Por isso, o presente trabalho não abordará os princípios teóricos básicos do funcionamento do GPR. Contudo, como o processamento de dados de GPR é complexo e tem de se adaptar aos projetos específicos, este aspeto particular da técnica será abordado com mais detalhe.

### Caracterização do local de estudo

A construção do Mosteiro da Batalha data do final do século XIV (1386-1387). O monumento foi construído em honra de Nossa Senhora da Vitória, para cumprir a promessa efetuada por D. João I aquando da vitória na Batalha de Aljubarrota. Este Mosteiro é um excelente exemplo da arquitetura gótica portuguesa, sendo que apresenta também excelentes trabalhos do estilo Manuelino [33]. A sua construção prolongou-se por 7 reinados (cerca de 150 anos) e posteriormente sofreu obras de restauro, reconstrução e alteração. Em 1795, James Murphy efetuou um estudo exaustivo do monumento e publicou uma planta detalhada que demonstra a dimensão excecional do edificado [34]. Atualmente o monumento apresenta grandes alterações relativamente aquela extensão (Figura 1).

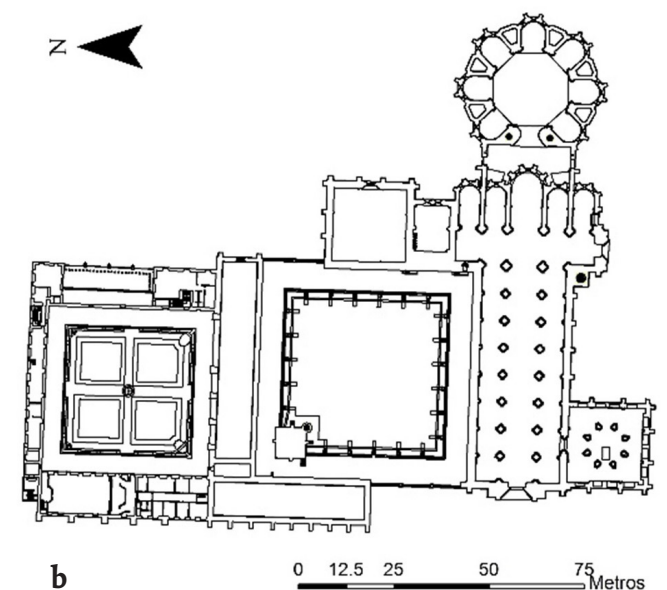
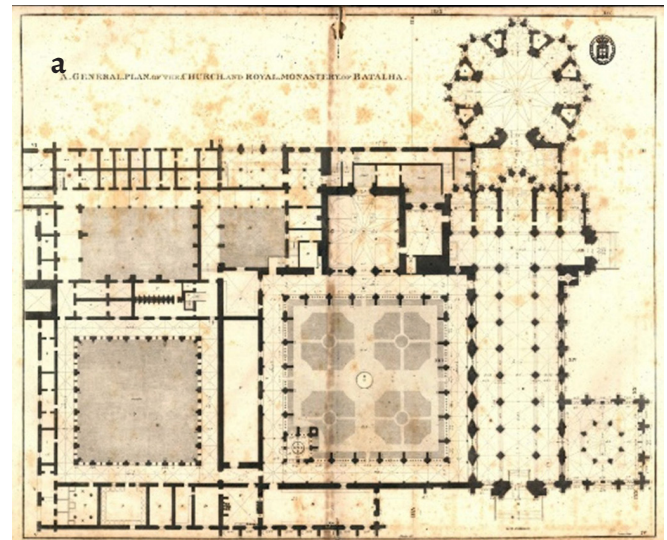
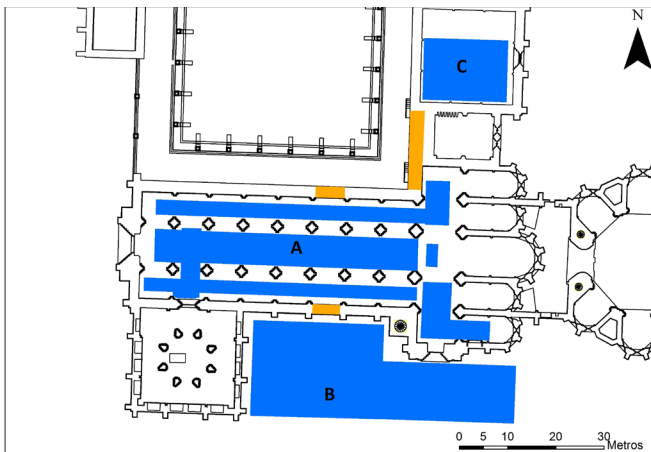


Figura 1. Planta do Mosteiro: a) elaborada em 1795 por James Murphy [34]; b) atual.

O Mosteiro foi inicialmente doado à Ordem de São Domingos, doação esta revogada aquando da extinção das ordens religiosas em Portugal (1834). Em 1907, foi constituído Monumento Nacional e, em 1983, foi classificado Património Mundial pela UNESCO. Mais recentemente, em 2016, o Mosteiro da Batalha foi elevado ao estatuto de Panteão Nacional.

### Aquisição de dados

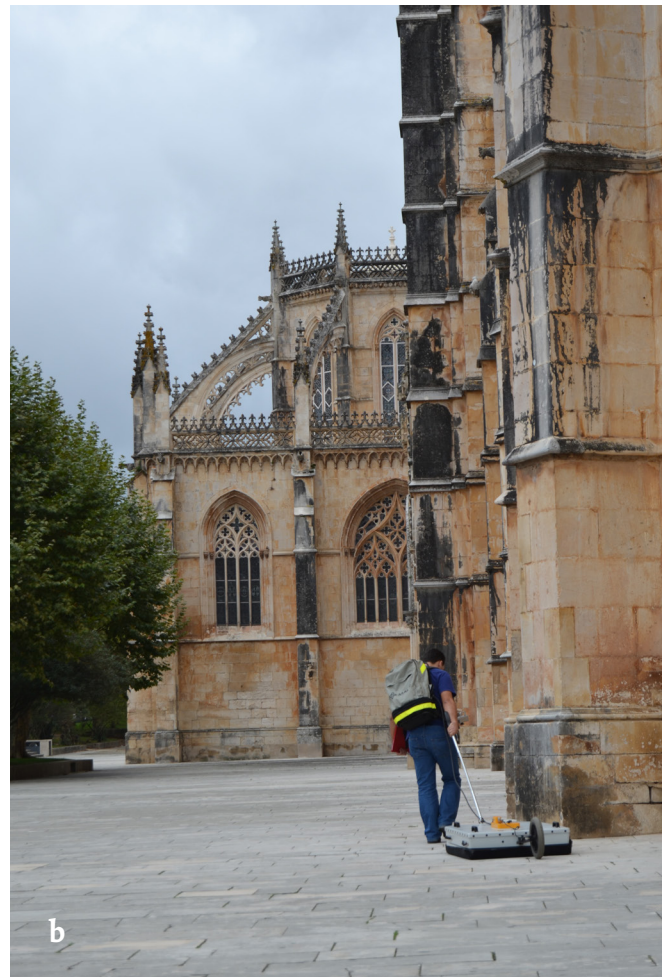
Os dados apresentados neste trabalho referem-se a medições realizadas sobre o chão (espaços assinalados a azul na Figura 2) e a medições realizadas à face de algumas paredes (assinaladas a laranja na Figura 2). As áreas onde se realizaram medições estão limitadas ao espaço disponível e são condicionadas por obstáculos físicos.



**Figura 2.** Áreas de prospeção: no solo (assinaladas a azul); nas paredes (a laranja). Legenda: A – Igreja; B – exterior sul do Mosteiro; C – sala do Capítulo.

Na Figura 3 ilustram-se os locais de aquisição de dados no interior da igreja, no exterior sul do Mosteiro e na sala do Capítulo.

A campanha de GPR foi efetuada com equipamento mono-estático, antenas emissora e recetora a distância constante e instaladas numa só unidade blindada (*MALÁ Professional Explorer – ProEx*). A aquisição de dados em ambientes confinados, isto é, com paredes laterais e teto, impõe a utilização de equipamentos blindados para diminuir, ou mesmo anular, o registo de energia refletida naqueles elementos construtivos. Embora esta energia se propague à velocidade da



**Figura 3.** Locais de aquisição de dados: a) interior da igreja; b) exterior sul do Mosteiro; c) sala do Capítulo.

luz (0,3 m/ns), por isso facilmente detetável, estes eventos podem contribuir para a complexidade das imagens obtidas.

Uma das questões fundamentais na utilização de GPR é a escolha da frequência das antenas. Neste trabalho utilizaram-se as antenas de 500 MHz para investigar o subsolo (áreas a azul na Figura 2). Por outro lado, a constituição interna das paredes foi investigada com antenas de 500 MHz e 800 MHz (locais sinalizados a laranja na Figura 2).

Testes prévios permitiram estimar velocidades de propagação da energia de 0,08 m/ns a 0,09 m/ns nos materiais

constituintes das paredes. A conjugação destes valores com a atenuação verificada *in situ* justifica a utilização da antena de 500 MHz para obter imagens que representem as paredes na totalidade da sua espessura. Todavia, a simples utilização desta antena não permite obter imagens de alta resolução no interior das paredes. Estas imagens só são possíveis com a utilização da antena de 800 MHz que, apesar da sua superior resolução, não consegue atravessar completamente o meio a investigar.

### Aquisição no solo

A aquisição de dados no solo foi efetuada com recurso a antena de 500 MHz e os dados vão ser apresentados em modo 3D, construindo as imagens por interpolação de dados de perfis GPR 2D em modo envolvimento de sinal, tecnicamente conhecida por *envelope* [9].

A qualidade dos dados foi garantida pela realização de perfis paralelos entre si e espaçados de 0,1 m na maior parte da área do monumento. Contudo, devido à necessidade de uma rápida cobertura da área para não interferir com as cerimónias militares do render da guarda do monumento ao Soldado Desconhecido, localizado na Sala do Capítulo, o espaçamento aqui usado foi de 0,3 m.

Em todos os casos, o intervalo de aquisição de dados em cada perfil foi de 0,02 m, garantidos por leitura automática pelo odómetro do equipamento. A gravação do sinal de cada traço obtido foi feita numa janela de tempo de 100 ns, estimada para uma velocidade de propagação da energia no solo de 0,1 m/ns e profundidade de investigação entre 3 m e 4 m. O valor de janela de tempo foi majorado em 30% para garantir o registo de eventos tardios [35]. A frequência de amostragem do traço utilizada foi de 10 vezes a frequência do sinal, garantindo um bom empilhamento e uma boa reprodução do sinal evitando o fenómeno conhecido por *aliasing*.

### Aquisição nas paredes

A aquisição de dados nas paredes foi efetuada em modo 2D. Assim, realizaram-se perfis com medidas a cada 0,02 m, ao longo de cada perfil, com ambas as antenas de 500 MHz e 800 MHz.

Os parâmetros de aquisição dos dados diferem de acordo com a frequência utilizada. No caso dos perfis adquiridos com 500 MHz, foi usada uma janela de tempo de 80 ns, uma vez que a espessura média das paredes varia entre 2 m e 2,5 m, medidas no local. A aquisição dos perfis com antena de 800 MHz foi efetuada com uma janela de tempo de 40 ns, de acordo com os pressupostos anteriores.

Em ambos os casos, a amostragem do sinal foi feita com uma frequência de amostragem do traço 10 vezes a frequência do sinal, mais uma vez, garantindo um bom empilhamento e evitando *aliasing*.

## Processamento de dados

Os dados de GPR foram processados em software dedicado Reflex-Win 7.2 [36]. O processamento dos dados varia com fatores como a frequência utilizada, o ruído eletromagnético local, passo de amostragem e finalidade da aquisição. No entanto, genericamente o processamento consistiu nos seguintes passos: *i)* ajuste do tempo zero; *ii)* filtragem de frequência (passa-banda); *iii)* remoção do ruído de fundo (*background removal*); *iv)* função de ganho; *v)* estimativa de velocidades de propagação; *vi)* conversão tempo-profundidade; e *vii)* migração [37]. Após o processamento, os radargramas obtidos representam uma imagem 2D, em profundidade, referente a cada perfil, tendo sido interpretados individualmente.

A realização de perfis paralelos, e próximos uns dos outros, permite a análise dos dados de GPR em 3D. Para isso, os dados anteriormente processados foram interpolados e analisados para tempos de trajeto definidos, *time slices*, de acordo com a velocidade previamente estimada. Deste modo produziram-se imagens espaciais correspondentes ao tempo de trajeto analisado e profundidade estimada.

## Discussão de resultados

### Estudo do subsolo dentro do Mosteiro

O estudo do subsolo do Mosteiro corresponde aos espaços (A), (B) e (C) ilustrados nas Figuras 2 e 3. Da investigação com GPR efetuada no Mosteiro da Batalha, apresenta-se na Figura 4, a título de exemplo, uma fatia de tempo correspondente a uma profundidade estimada de 0,5 m. Espera-se que o subsolo sob o Mosteiro seja heterogéneo devido às condições naturais do solo e rocha base, bem como à intervenção humana que origina estruturas vulgarmente denominadas por antrópicas, por exemplo, infraestruturas, sepulturas, muros, fundações, etc.

Em termos globais, os resultados interpretados na Figura 4 permitem assinalar: fundações de colunas (1); infraestruturas, quer modernas, quer antigas (2), porventura canalizações de água e rede elétrica moderna; sepulturas (3), umas confirmadas e correspondentes a dados obtidos sobre as lapides, outras propostas de acordo com registos históricos [28]; e outras estruturas antrópicas de origem desconhecida (4).

A definição destas anomalias justifica-se pela análise dos locais onde se verifica um elevado retorno de energia refletida que, pictorialmente, corresponde às áreas e alinhamentos mais escuros, claramente destacados das zonas acinzentadas onde a energia referente de reflexão do sinal é bastante reduzida. No entanto, regiões muito pouco refletoras de geometria definida, como é o caso da anomalia 4 da sala do Capítulo (Figura 4), também têm de ser consideradas para análise devido às suas características geométricas.

A título de exemplo, apresentam-se os casos da pedra tumular de Martim Gonçalves de Macedo (à entrada da Capela do Fundador) e do lado norte do transepto da igreja, ilustrados na Figura 5.

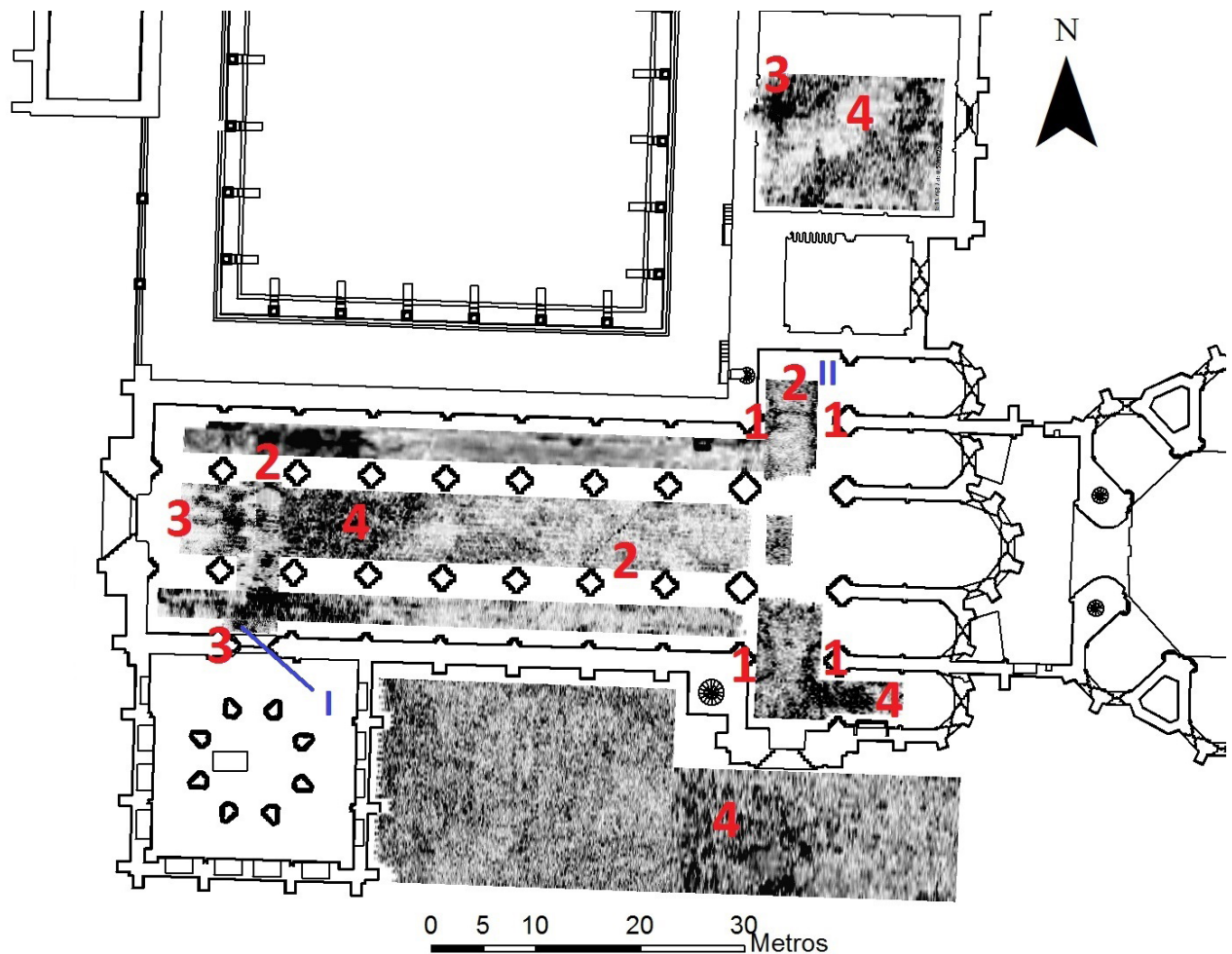


Figura 4. Representação dos dados de GPR correspondentes a uma profundidade interpretada de 0,5 m.

### Lado norte do transepto da igreja

Neste local a aquisição foi executada com uma malha densa o que torna possível representar a progressão dos eventos em profundidade, a partir de fatias de tempo, proporcionando uma leitura tridimensional desta área. Claro que esta estratégia proporciona imagens volumétricas com uma capacidade de resolução muito superior aos tradicionais e convencionais radargramas 2D. Das diferentes fatias de tempo que se poderiam representar, escolheram-se as correspondentes a tempos de 11,01 ns, na Figura 6a, e de 29,16 ns, na Figura 6b, como representativas desta área.

Tal como se apresenta na Figura 6, os resultados da campanha de GPR neste local permitem identificar eventos lineares (2 e 3) e semicirculares (1). Estes eventos correspondem a reflexões muito energéticas em estruturas no subsolo, representadas por anomalias muito escuras que se destacam do fundo acinzentado de baixa energia. A estrutura linear 2 corresponde a uma infraestrutura elétrica muito superficial (0,5 m) moderna e conhecida, que não está presente na Figura 6b. A estrutura linear 3, mais profunda (1,5 m) e ausente da Figura 6a, por isso estratigraficamente mais antiga, de elevada energia, é interpretada como correspondente a uma possível infraestrutura antiga cuja origem tem

de ser investigada. Os eventos energéticos, de forma semi-circular junto à coluna 1 mantêm o seu posicionamento e características energéticas com a profundidade. Por conseguinte, correspondem às fundações da coluna e não a hipotéticas reflexões superficiais diretas originadas pela coluna, e demonstram e enraizamento profundo das colunas.

### Pedra tumular de Martim Gonçalves de Macedo

A prospeção efetuada sobre a pedra tumular de Martim Gonçalves de Macedo pretendia investigar a natureza do subsolo neste local, para clarificar se a lápide à superfície corresponde efetivamente a uma sepultura, ou se seria exemplo, material rochoso e/ou cavidade. Além disso este evento apresenta características geométricas definidas, ou seja, tem uma forma quadrangular com dimensões aproximadas de 1 m por 1 m, o que reforça a interpretação desta estrutura como sendo de origem antrópica. A tracejado negro está marcada a dimensão à superfície da pedra tumular existente e é visível um desalinhamento da pedra tumular com o evento quadrangular registado.

A ser admitida ou interpretada como um monumento funerário, as dimensões reduzidas e aproximadamente quadradas conduzem a uma possível interpretação de uma estrutura tipo *ossário* e não um sepultamento convencional.



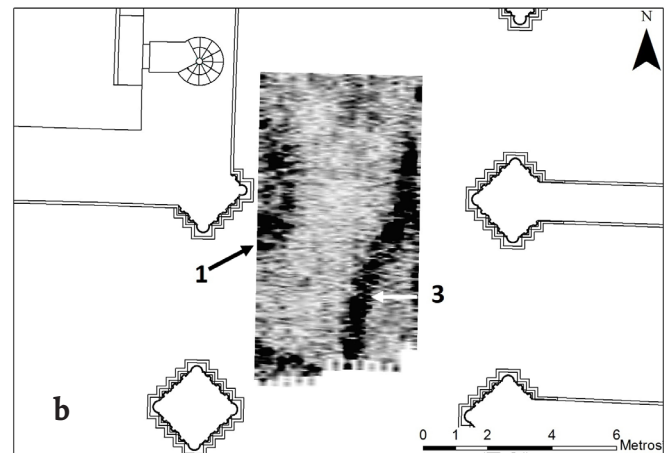
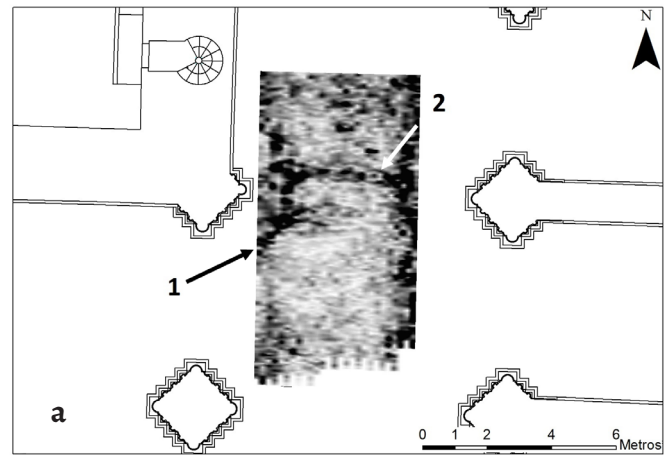
**Figura 5.** Áreas analisadas: a) túmulo de Martim Gonçalves de Macedo; b) transepto da igreja.

### Estudos da composição das paredes

#### *Paredes do lado nascente do claustro de D. João I*

A prospeção efetuada na parede a nascente do claustro de D. João I pretendia investigar a sua estrutura interna e clarificar se o espaço existente entre a sacristia do Mosteiro e o claustro teria sido uma divisão entretanto inutilizada. A estrutura assinalada com o número 2 na Figura 8 está associada à torre principal do Mosteiro e pouco se conhece da sua constituição interna.

As paredes representadas nos locais 1 e 3 da Figura 8 têm



**Figura 6.** a) Fatia de tempo correspondente a 0,55 metros ( $t=11,01$ ns) de profundidade interpretada. b) Fatia de tempo correspondente a 1,5 m ( $t=29,16$  ns) de profundidade.

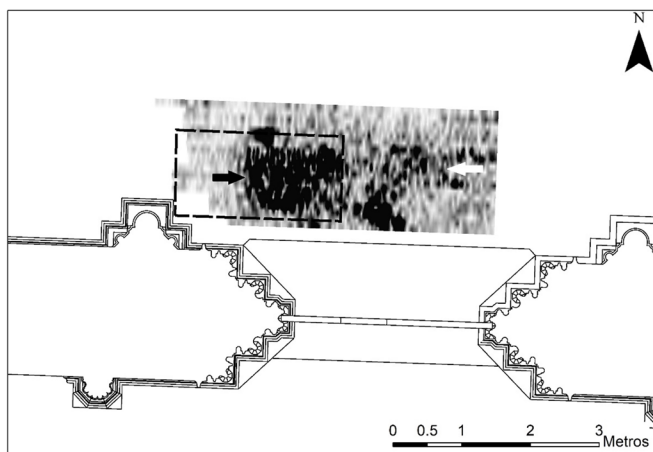
uma espessura aproximada de 0,60 m (valores retirados de levantamento topográfico). Assim, de acordo com as técnicas construtivas então utilizadas, estas paredes devem ser constituídas por uma única alvenaria em pedra sem enchimento.

Como a finalidade destes ensaios é investigar a natureza interna das paredes nestes locais, os dados GPR vão ser apresentados sob a forma de um radargrama convencional 2D. No entanto, efetuaram-se vários radargramas a diferentes alturas das paredes que justificaram a sua homogeneidade vertical e permitiram selecionar um radargrama representativo por local. Os radargramas apresentados correspondem a uma colheita de dados a 1,50 m do chão.

As características físicas dos meios constituintes das paredes não permitiram obter imagens de boa qualidade com a frequência de 500 MHz pelo que, embora com o sacrifício da profundidade de penetração, mas com aumento da resolução, serão discutidos mais detalhadamente os dados obtidos com a antena de 800 MHz e apresentados mais sucintamente os radargramas referentes à frequência de 500 MHz, onde é mais manifesta a dificuldade de interpretação. A Figura 9 ilustra a aquisição de dados GPR numa parede do claustro de D. João I.

O processamento de dados de GPR seguiu o procedimento descrito anteriormente. Contudo aqui assume particular



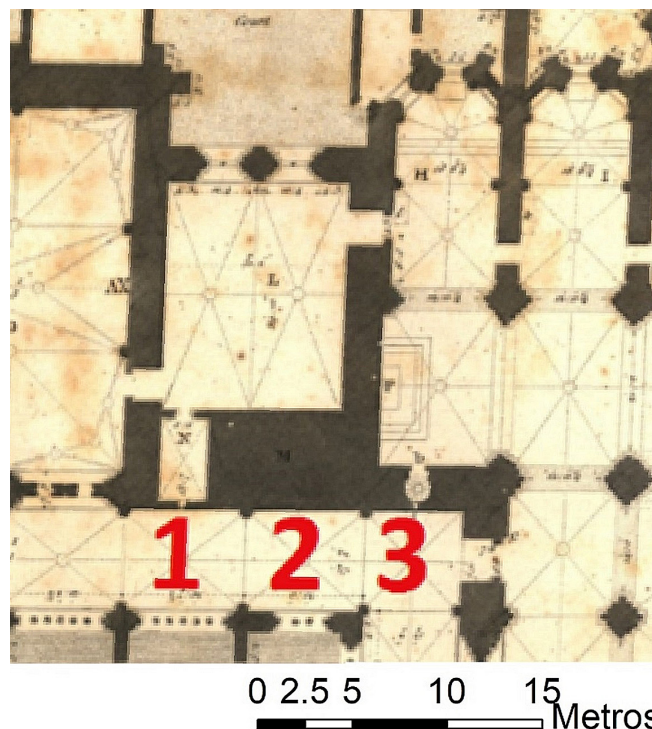


**Figura 7.** Fatia de tempo da prospeção efetuada sobre o túmulo de Martim Gonçalves de Macedo ( $t = 0,71$  ns; profundidade de  $0,71$  m).

relevância a remoção do ruído de fundo para clarificar os diferentes meios no interior das paredes. Neste caso a remoção do ruído de fundo foi efetuada subtraindo a cada traço a média de todos os traços de cada radargrama. Por outro lado, a escolha dos filtros assume particular importância uma vez que a frequência utilizada é a frequência central do equipamento e, na prática, a frequência emitida varia à volta da frequência indicada. Existem várias indicações genéricas em relação à escolha dos filtros a utilizar e, normalmente, fazem-se vários ensaios de processamento de dados utilizando diversas frequências de filtragem. No entanto, a escolha dos filtros deve considerar este último ponto, mas também as características do sinal e, nesse sentido, não promovendo eventuais distorções dos dados. Por isso, após vários testes, a escolha final dos filtros a utilizar baseou-se na análise do espectro do sinal emitido, o que permitiu estabelecer os limites inferior e superior do filtro a aplicar.

Também é de muita importância a utilização de uma velocidade de propagação adequada. Felizmente os radargramas obtidos são ricos em hipérbolas de difração, originados em heterogeneidades no interior das paredes, que permitiram o cálculo e a adoção de um valor de velocidade de propagação representativo dos meios atravessados ( $v = 0,085$  m/ns). Os dados de GPR são apresentados na forma não migrada, por forma a deixar registadas as difrações e assim evidenciar as heterogeneidades no interior das paredes.

A Figura 10 mostra os radargramas assim obtidos. Embora menos pronunciada no radargrama 2, em todos os radargramas é evidente uma fronteira energética no interior das paredes a uma *profundidade* de cerca de  $0,6$  m (setas negras na figura). No caso dos radargramas apresentados nas Figuras 10a e 10c, esta fronteira separa um meio caracterizado por eventos mais energéticos e próximos da superfície doutro meio mais longe da fonte transmissora. Comparando estes dados com dados experimentais em modelo físico [9], pelas suas características, esta fronteira corresponde ao fim, ou seja, à face posterior da parede. Portanto, este evento energético contínuo corresponde ao limite posterior da parede nas Figuras 10a e 10c.



**Figura 8.** Localização das paredes inspecionadas no claustro de D. João I na planta de James Murphy (adaptado de [34]).



**Figura 9.** Aquisição GPR a 800 MHz na parede do claustro de D. João I.

No radargrama apresentado na Figura 10a, as difrações, indicadas na figura com setas brancas até à fronteira definida pelas setas a negro, correspondem à heterogeneidade da parede, diferentes blocos de calcário, interfaces entre eles, etc. Do outro lado da parede, para além dos seus limites, aparecem localmente difrações bastante energéticas. A presença destes eventos seria problemática se não fosse a resposta a paredes perpendiculares à parede original do claustro, devidamente construídas na década de 50 do século XX e, entretanto, mapeadas.

Numa primeira análise, o radargrama da Figura 10c fornece informação semelhante à obtida no radargrama da Figura 10a, ou seja, interface posterior da parede (setas negras) e difrações dentro da parede de origem semelhante. No entanto, além dos limites da parede e junto a esta interface ocorrem eventos muito energéticos (seta branca) que correspondem a reflexões do sinal na escada de pedra em caracol que existe no espaço posterior à parede, que se encontra mapeada na Figura 8. Se estes eventos forem interpretados como difrações, correspondem a uma velocidade de sinal de 0,15 m/ns, que é incompatível com a velocidade de propagação do sinal nestes meios (0,085 m/ns). De facto, para tempos de trajeto superiores aos eventos registados, as hipérbolas de difração permitem calcular valores de velocidade, que variam entre 0,07 m/ns e 0,09 m/ns, que correspondem a difrações no interior dos elementos construtivos da escada.

Assim, os radargramas das Figuras 10a e 10c revelam paredes com cerca de 0,60 m de espessura, constituídas por blocos calcários. Nas regiões abrangidas pelos radargramas não se encontram registos de difrações suscetíveis de ser atribuídas a vazios no interior das paredes.

O radargrama da Figura 10b corresponde aos dados colhidos na parede adjacente à torre principal. Neste caso, pouco se conhece sobre a constituição e geometria dos meios atravessados. No radargrama da Figura 10b o comportamento até cerca de 0,60 m (setas a preto na figura) é semelhante ao dos radargramas apresentados nas Figuras 10a e 10c, ou seja, abundância de difrações originadas pelos diferentes blocos de calcário, heterogeneidades e interfaces entre os blocos. No entanto, além desta interface, o comportamento é distinto do dos referidos radargramas. De facto, não se atingiu o limite da estrutura construída e continuam a verificar-se difrações (setas a cinza) que se mantêm até outro alinhamento contínuo (seta laranja) a uma profundidade interpretada de 0,90 m. Estas hipérbolas devem corresponder a heterogeneidades do interior da estrutura entre profundidades interpretadas de 0,60 m e 0,95 m. Para além desta interface, ainda se registam algumas difrações, porventura correspondentes a heterogeneidades mais profundas na estrutura. Para profundidades interpretadas maiores não se conseguem distinguir eventos coerentes.

Como não existem informações sobre a natureza e constituição do interior da parede, a correspondência das duas interfaces a elementos estruturais não é possível de fazer, mas as difrações devem ser atribuídas a heterogeneidades

no interior do edificado. Contudo, pode adiantar-se que a parede é constituída por um primeiro pano de blocos calcários, com cerca de 0,60 m de espessura.

Numa tentativa de investigar mais fundo este local, a Figura 11 apresenta o radargrama correspondente a uma frequência de 500 MHz. Neste caso perde-se discriminação, mas ganha-se alguma profundidade de investigação.

Assim, a Figura 11 apresenta um radargrama processado de modo a obter a melhor imagem possível, mas mantendo os princípios de processamento de dados de GPR. Com base no alinhamento e coerência do sinal de GPR, é possível observar duas interfaces (assinaladas com tracejado na figura), a profundidades de cerca de 0,60 m e 1,20 m, e um conjunto de hipérbolas referentes a difrações dentro da estrutura. Embora a primeira interface, a cerca de 0,60 m de profundidade, deva corresponder à interface já registada no radargrama apresentado na Figura 10b, as interfaces propostas devem ser tomadas com precaução, tanto mais que a segunda pode ser um múltiplo da primeira.

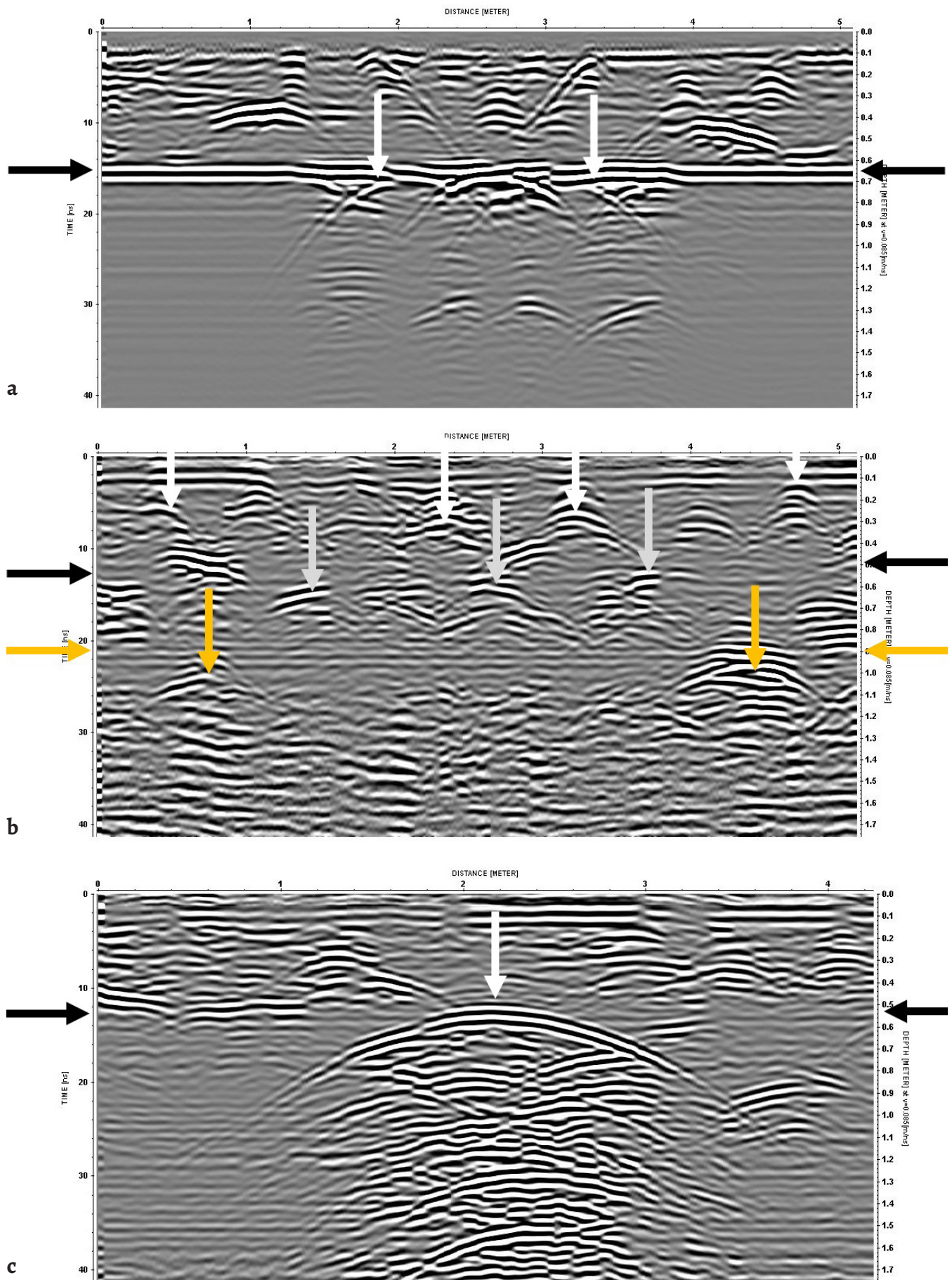
#### ***Parede norte da Igreja***

A aquisição de dados de GPR na parede norte da Igreja, teve como objetivo o estudo da composição interna desta parede (Figura 12) que, por medidas topográficas e plantas locais, tem espessura total de cerca de 2,30 m.

Neste caso, uma vez que se pretendia uma penetração máxima do sinal, utilizou-se uma antena de frequência de 500 MHz. Na Figura 13 apresenta-se o radargrama obtido.

De um modo semelhante ao radargrama da Figura 11, podem interpretar-se três interfaces pela continuidade lateral, alinhamento e coerência dos dados de GPR. A modelação destes dados com a velocidade obtida a partir das hipérbolas no radargrama permite estimar profundidades para as interfaces sugeridas. Por isso, a interpretação do radargrama da Figura 13 sugere que a seta 1 marcaria o fim da alvenaria de calcário com uma espessura de 0,5 m. A seta 2 poderá ser interpretada como o início da alvenaria em calcário, do outro lado da parede, tendo esta uma espessura estimada de cerca de 1,3 m para o enchimento da parede. De facto, a região do radargrama entre as setas 1 e 2 mostra hipérbolas de difração que deverão corresponder à heterogeneidade do enchimento. Finalmente, observou-se uma interface correspondente a uma mudança distinta do radargrama (seta 3), consistente com o final da parede, pela semelhança do comportamento obtido em modelos físicos [9]. Assim sendo, estima-se uma espessura de alvenaria em calcário de 0,5 m do lado oposto da parede.

Com a finalidade de obter uma melhor resolução do interior da parede, realizaram-se perfis com uma antena de 800 MHz, cujos resultados se apresentam na Figura 14. Neste radargrama, também com dificuldade, a seta negra corresponde ao fim da alvenaria em calcário (espessura de 0,5 m) de um lado da parede. As difrações obtidas antes desta interface correspondem aos blocos de calcário e outras heterogeneidades constituintes da parede. Após esta interface (seta



**Figura 10.** Radargramas correspondentes às aquisições efetuadas nas paredes este do claustro de D. João I: *a)* parede da sala da prata; *b)* parede adjacente à torre principal; *c)* parede com escada de acesso.

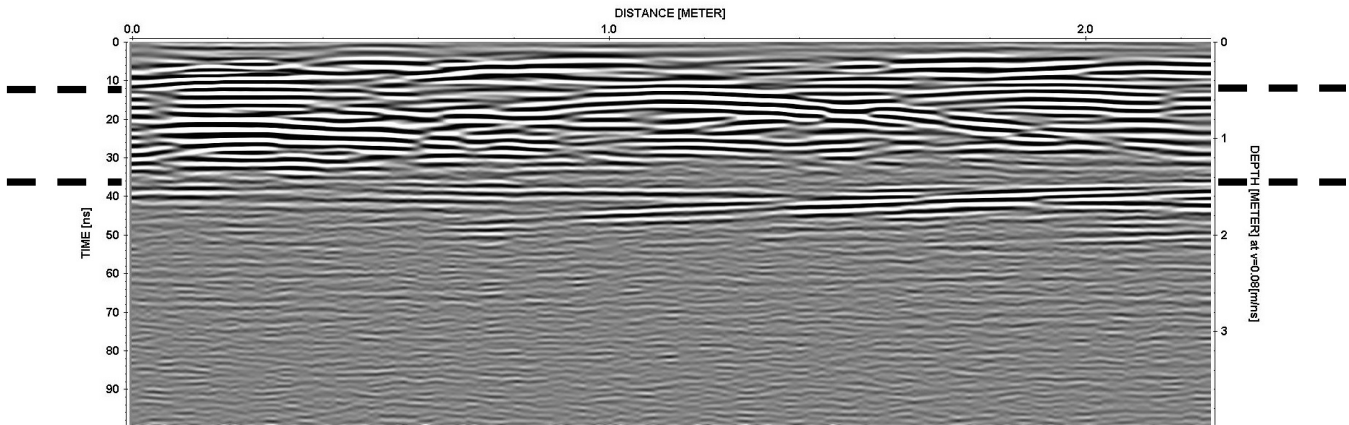


Figura 11. Radargrama (não migrado) de 500 MHz, correspondente à parede adjacente à torre principal.



Figura 12. Aspeto da parede estudada: a) vista do lado claustro de D. João I; b) vista do interior da igreja.

negra), registam-se inúmeras hipérbolas de difração provocadas pela heterogeneidade do enchimento.

Como era expectável, o aumento da resolução provocado pela utilização da frequência de 800 MHz implicou uma redução significativa da profundidade de penetração do sinal. Assim, a frequência aqui utilizada não permite esclarecer o lado oposto da parede.

Assim, neste caso, o modelo interpretado para a parede compreende dois panos exteriores de cerca de 0,50 m e um enchimento entre os panos de cerca de 1,30 m. No radargrama da Figura 13, verifica-se uma mudança do sinal de GPR, consistente com o observado em modelos físicos [9], a uma profundidade estimada de 2,30 m, o que está de acordo com os dados topográficos locais e as plantas do Mosteiro. Na região a que se refere este radargrama não foram identificadas difrações suscetíveis de ser interpretadas como vazios ou ocos no interior da parede. No entanto, é evidente a heterogeneidade do enchimento das mesmas.

### Conclusões

O método do GPR permitiu, de uma forma rápida, não invasiva (i.e., sem infligir quaisquer danos ao meio) e com redu-

zida perturbação ao normal funcionamento do Mosteiro, obter imagens importantes para o conhecimento do Mosteiro da Batalha.

Assim, os resultados aqui apresentados e discutidos permitiram:

- mapear diversos elementos sob o Mosteiro da Batalha, tais como infraestruturas, fundações, sepulturas, e outras áreas anómalas presentemente de origem desconhecida;
- investigar a estrutura interna das paredes do Mosteiro, obtendo-se informação valiosa sobre os modos e materiais de construção das paredes.

Este trabalho tem de ser entendido como um caso de estudo que comprova que a metodologia experimental aqui descrita pode e deve ser facilmente usada e adaptada a qualquer monumento ou edifício classificado para investigar a sua estrutura interna e esclarecer a natureza dos seus elementos construtivos.

### Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao Dr. Miguel Almeida, da Dryas, todo o apoio proporcionado, ao Diretor do Mosteiro da Batalha, Dr. Joaquim Ruivo, ao Município da Batalha e à Fundação da Ciência e Tecnologia (projeto GeoBioTec PEst-OE/CTE/UI4035/2014).

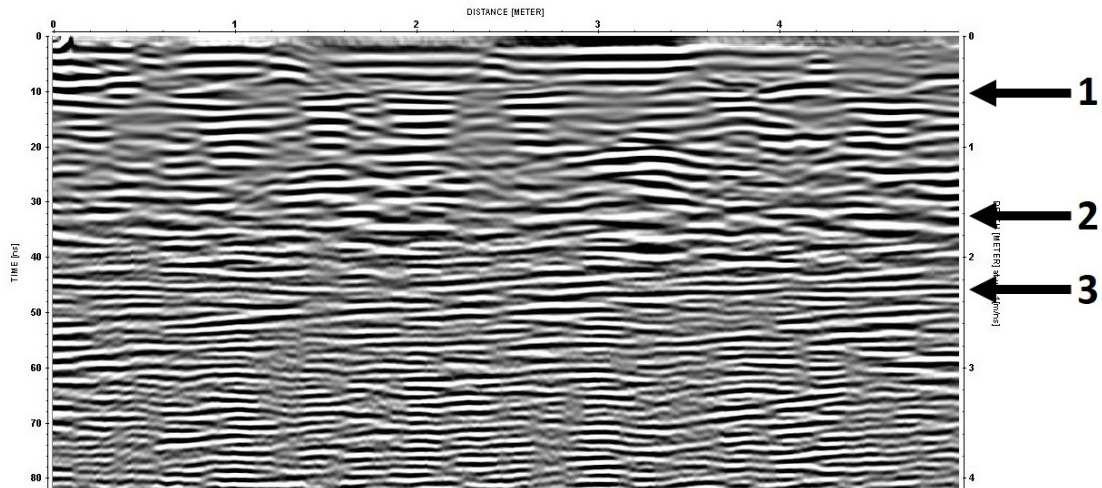


Figura 13. Radargrama da frequência de 500 MHz, obtido na parede norte da igreja.

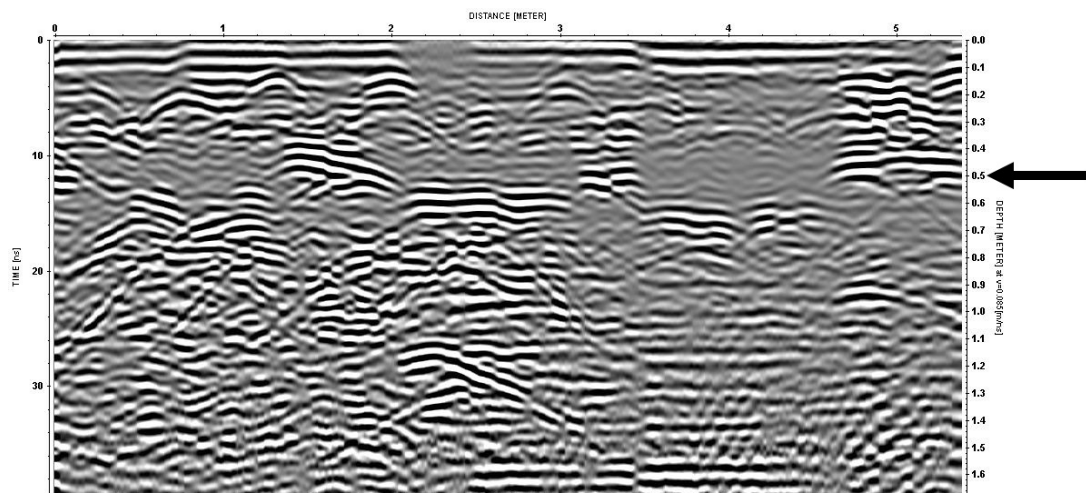


Figura 14. Radargrama obtido na parede norte da igreja para a frequência de 800 MHz.

## REFERÊNCIAS

1. Corbusier, Le; Eardley, A., *The Athens Charter*. Grossman Publishers, New York (1973).
2. ICOMOS Australia, *The Burra Charter: The Australia ICOMOS Charter for Places of Cultural Significance*, Australia ICOMOS, Burwood (1999).
3. 'Cracow Charter 2000', in *International Conference on Conservation Krakow 2000*, Krakow (2000) 191-193.
4. 'Carta de Lisboa sobre reabilitação urbana integrada 1995', [https://www.culturante.pt/fotos/editor2/1995\\_\\_carta\\_de\\_lisboa\\_sobre\\_a\\_reabilitacao\\_urbana\\_integrada-1%C2%BA\\_encontro\\_luso-brasileiro\\_de\\_reabilitacao\\_urbana.pdf](https://www.culturante.pt/fotos/editor2/1995__carta_de_lisboa_sobre_a_reabilitacao_urbana_integrada-1%C2%BA_encontro_luso-brasileiro_de_reabilitacao_urbana.pdf) (acesso em 2019-1-8).
5. Feilden, B., *Conservation of Historic Buildings*, 3rd ed., Architectural Press, Oxford (2003).
6. Aguiar, J., 'Património cultural e os paradigmas da conservação e da reabilitação: ontem!', documento, Ordem dos Arquitetos, Lisboa (2008).
7. Barraca, N.; Almeida, N.; Varum, H.; Almeida, F.; Matias, M., 'A case study of the use of GPR for rehabilitation of a classified Art Deco building: The InovaDomus house', *Journal of Applied Geophysics* **127** (2016) 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.02.002>.
8. Nazarian, S.; Xiong, Y.; Rosenblad, B. (eds.), *Innovative Applications of Geophysics in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, Denver (2007), <https://doi.org/10.1061/9780784409084>.
9. Tareco, H.; Grangeia, C.; Varum, H.; Matias, M. S., 'A high resolution GPR experiment to characterize the internal structure of a damaged adobe wall', *First Break*, **27**(8), (2009) 79-84.
10. Coutinho, R. Q.; Mayne, P. W. (eds.), *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, CRC Press, Boca Raton (2012), <https://doi.org/10.1201/b13251>.
11. Barraca, N.; Almeida, M.; Varum, H.; Matias, M. S., 'The use of GPR in the rehabilitation of built heritage', in *Near Surface Geoscience 2014 – 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Athens (2014), <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20141998>.
12. Neto, M., *James Murphy e o Restauro do Mosteiro de Santa Maria da Vitória no Século XIX*, Editorial Estampa, Lisboa (1997).
13. Cosentino, P. L.; Deganello, S., 'High-resolution microgeophysics: a fascinating challenge. I. Detection of thin patinas', *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata* **44**(3-4) (2003) 169-179.

14. Piro, S.; Negri, S.; Quarta, T. A. M.; Pipan, M.; Forte, E.; Ciminale, M.; Capizzi, P.; Sambuelli, L., 'Geophysics and cultural heritage: a living field of research for Italian geophysicists', *First Break* **33**(8) (2015) 43-54.
15. Cosentino, P. L.; Capizzi, P.; Martorana, R.; Messina, P.; & Schiavone, S., 'From geophysics to microgeophysics for engineering and cultural heritage', *International Journal of Geophysics* (2011) 428412, <https://doi.org/10.1155/2011/428412>.
16. Panisova, J.; Fraštia, M.; Wunderlich, T.; Pašteka, R.; Kušnirák, D., 'Microgravity and ground penetrating radar investigations of subsurface features at the St Catherine's Monastery, Slovakia', *Archaeological Prospection* **20**(3) (2013) 163-174 <https://doi.org/10.1002/arp.1450>.
17. Castellaro, S.; Imposa, S.; Barone, F.; Chiavetta, F.; Gresta, S., Mulargia, F., 'Georadar and passive seismic survey in the Roman amphitheatre of Catania (Sicily)', *Journal of Cultural Heritage* **9**(4) (2008) 357-366, <https://doi.org/10.1016/j.cul-her.2008.03.004>.
18. Capitani, D.; Di Tullio, V.; Proietti, N., 'Nuclear magnetic resonance to characterize and monitor cultural heritage', *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* **64** (2012) 29-69, <https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2011.11.001>.
19. Leucci, G.; Persico, R.; Soldovieri, F., 'Detection of fractures from GPR data: the case history of the Cathedral of Otranto', *Journal of Geophysics and Engineering* **4**(4) (2007) 452, <https://doi.org/10.1088/1742-2132/4/4/011>.
20. Bavusi, M.; Soldovieri, F.; Piscitelli, S.; Loperte, A.; Vallianatos, F.; Soupios, P., 'Ground-penetrating radar and microwave tomography to evaluate the crack and joint geometry in historical buildings: some examples from Chania, Crete, Greece', *Near Surface Geophysics* **8**(5) (2010) 377-387, <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2010039>.
21. Sass, O.; Viles, H. A., 'How wet are these walls? Testing a novel technique for measuring moisture in ruined walls', *Journal of Cultural Heritage* **7**(4) (2006) 257-263, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.08.001>.
22. Sass, O.; Viles H. A., 'Wetting and drying of masonry walls: 2D-resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK', *Journal of Applied Geophysics* **70**(1) (2010) 72-83, <https://doi.org/10.1016/j.jap-geo.2009.11.006>.
23. Chávez, R. E.; Tejero, A.; Cifuentes, G.; Hernández, E.; Aguilar, D., 'Imaging fractures beneath a residential complex using novel 3-D electrical resistivity arrays', *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* **20**(2) (2015) 219-233, <https://doi.org/10.2113/JEEG20.3.219>.
24. Almeida, F.; Barraca, N.; Moura, R.; Matias, M., 'Odd-even pole-pole array and 3D resistivity surveys in urban and historical areas', in *Near Surface Geoscience 2016-22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* (2016), <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201601965>.
25. Cataldo, R.; De Donno, A.; De Nunzio, G.; Leucci, G.; Nuzzo, L.; Siviero, S., 'Integrated methods for analysis of deterioration of cultural heritage: the Crypt of Cattedrale di Otranto', *Journal of Cultural Heritage* **6**(1) (2005) 29-38, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2004.05.004>.
26. Faella, G.; Frunzio, G.; Guadagnuolo, M.; Donadio, A.; Ferri, L., 'The church of the Nativity in Bethlehem: Non-destructive tests for the structural knowledge', *Journal of Cultural Heritage* **13**(4) (2012) e27-e41, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.10.014>.
27. Martinho, E.; Dionísio, A., 'Main geophysical techniques used for non-destructive evaluation in cultural built heritage: a review', *Journal of Geophysics and Engineering* **11**(5) (2014) <https://doi.org/10.1088/1742-2132/11/5/053001>.
28. Grangeia, C.; Matias, M.; Figueiredo, F.; Hermozilha, H.; Carvalho, P.; Silva, R., 'A multi-method high-resolution geophysical survey in the Machado de Castro museum, central Portugal', *Journal of Geophysics and Engineering* **8**(2) (2011) 351-365, <https://doi.org/10.1088/1742-2132/8/2/020>.
29. Matias, M. S.; Almeida, F.; Barraca, N., *Integrated High Resolution Geophysical Investigation of a Monastery*, Lambert Academic Publishing, Beau Bassin (2017).
30. Matias, M. S.; Almeida, F.; Ribeiro, J.; Moura, R.; Ruivo, J.; Barraca, N., *Anatomia de um Mosteiro – Estudo Geofísico do Mosteiro da Batalha*, Câmara Municipal da Batalha, Batalha (2017).
31. Almeida, F.; Moura, R.; Barraca, N.; Costa, C.; Terroso, D.; Matias, M., 'Caracterização multidisciplinar de eflorescências salinas no Mosteiro da Batalha', comunicação, *Congresso da Reabilitação do Património*, Universidade de Aveiro, Aveiro (2017).
32. Lai, W. W. L.; Dérobert, X.; Annan, P., 'A review of ground penetrating radar application in civil engineering: A 30-year journey from locating and testing to imaging and diagnosis', *NDT & E International* **96** (2017) 58-78, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.04.002>.
33. Almeida, C. A. F. D.; Barroca, M. J., *História da Arte em Portugal. O Gótico*, Editorial Presença, Lisboa (2002).
34. Murphy, J., *Plans Elevations Sections and Views of the Church of Batalha, in the province of Estremadura in Portugal*, London (1795).
35. Annan, A. P.; Cosway, S. W., 'Ground penetrating radar survey design', in *5th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEE'92*, Oak Brook (1992) 329-352, <https://doi.org/10.4133/1.2921946.36>.
36. Sandmeier, K. J., *ReflexW 2D GPR Data Analysis Module Manual*. Sandmeier Geophysical Software Research (2010).
37. Daniels, J. J., 'Ground penetrating radar fundamentals', Prepared as an appendix to a Report to the US EPA, Region V, (2000) 1-21.

RECEBIDO: 2018.11.9

REVISTO: 2019.1.8

ACEITE: 2019.1.29

ONLINE: 2019.3.18



Licenciado sob uma Licença Creative Commons

Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional.

Para ver uma cópia desta licença, visite

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.pt>