

**APLICAÇÃO DO GEORADAR NO ESTUDO DE ESTRUTURAS E DE
ELEMENTOS DECORATIVOS DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS. DIFICULDADES
E EXEMPLOS DE SUCESSO**
**GPR SURVEYING OF STRUCTURAL AND DECORATIVE FEATURES IN
HERITAGE BUILDINGS: CHALLENGES AND CASE STUDIES**

Mota, Rogério, *LNEC, Lisboa, Portugal, rmota@lnec.pt**

Pereira, Marília, *LNEC, Lisboa, Portugal, marilia@lnec.pt*

Costa, Dória, *LNEC, Lisboa, Portugal, drcosta@lnec.pt*

Coelho, Maria João, *LNEC, Lisboa, Portugal, marjoao@lnec.pt*

Senos, Nuno, *Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, nuno.senos@gmail.com*

Pais, Alexandre, *Museus e Monumentos de Portugal, Lisboa, Portugal*

Mimoso, João, *LNEC, Lisboa, Portugal, joao.mimoso@gmail.com*

**autor para correspondência*

RESUMO

O radar de penetração no solo (georadar) é uma tecnologia consolidada em áreas como geotecnia, ambiente e arqueologia. O presente trabalho explora a versatilidade desta técnica não invasiva na avaliação de elementos do património edificado, expandindo a sua aplicação para além do subsolo. São apresentados casos de estudo focados na análise de estruturas complexas, incluindo paredes de alvenaria de tijolo, de tabique e de adobe; e em elementos estruturais revestidos por camadas decorativas, como azulejos. Adicionalmente, discutem-se cenários que resultaram em leituras inconclusivas, identificando-se os principais fatores limitantes. Conclui-se que o georadar constitui uma ferramenta complementar para o diagnóstico e preservação do património construído, embora a eficácia da sua atuação dependa estritamente das condições materiais e contextuais do objeto de estudo.

ABSTRACT

Ground-Penetrating Radar (GPR) is a well-established technology in fields such as geotechnics, environment, and archaeology. This paper explores the versatility of this non-invasive technique in the assessment of built heritage elements, extending its application beyond the subsurface. Case studies are presented focusing on the analysis of complex structures, including brick masonry, wattle and daub (tabique), and adobe walls; and structural elements covered by decorative layers, such as ceramic tiles. Additionally, scenarios that yielded inconclusive readings are discussed, identifying the primary limiting factors. It is concluded that GPR constitutes a complementary tool for the diagnosis and preservation of built heritage, although its effectiveness is strictly dependent on the material and contextual conditions of the object of study.

1. INTRODUÇÃO

O radar de prospeção (georadar) é uma técnica geofísica que começou a consolidar-se na geotecnia a partir de finais da década de 1970 para determinação, por exemplo, da espessura de terrenos de cobertura (Annan e Davis, 1977; Davis e Annan, 1989) ou na identificação de vazios (e.g. Oliveira, et al, 1992; Oliveira e Rodrigues, 1994).

A expansão desta técnica para outros domínios aliada à evolução tecnológica das antenas, marcada pela sua compactação e pelo aumento da sua frequência central e, consequentemente, pela resolução do método, permitiu a aplicação a problemas ambientais (Wang et al., 2015), à engenharia civil (Oliveira et al., 2003; Lombardi et al., 2021) e na arqueologia (Tohge et al., 1998; Meyer, et al., 2007; Leucci et al., 2021).

Mais recentemente, tem vindo a ser aplicada para a identificação de alvos mais superficiais e de espessura reduzida (Ortega-Ramírez, et al., 2021).

Nessa sequência, esta comunicação apresenta, entre outros, os resultados de um projeto de investigação que avaliou a eficácia do georadar no estudo de superfícies cobertas com azulejos, ou com outros materiais decorativos e na caracterização estrutural de paredes, discutindo os sucessos e as limitações observadas nos resultados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O georadar é uma técnica baseada na propagação de ondas eletromagnéticas cuja velocidade depende da constante dielétrica (k) do meio de propagação, e que permite identificar alvos ou heterogeneidades cuja constante dielétrica seja diferente da do meio envolvente, até uma profundidade que depende da frequência das antenas utilizadas (emissora e recetora) e, também, da atenuação do meio. Quanto mais elevada for a frequência, maior é a resolução da resposta e mais reduzida a profundidade de investigação.

A profundidade de investigação típica de uma antena com uma frequência central de 2600 MHz é de aproximadamente 0,30 m, enquanto a de uma antena com uma frequência central de 400 MHz é de cerca de 3 m.

Para estimar espessuras de materiais/alvos ou profundidades a que se encontram determinados alvos cujas reflexões sejam identificadas no registo de georadar (radargrama), é necessário conhecer ou estimar os valores da constante dielétrica no(s) meio(s) de propagação.

Como a profundidade (d) a um determinado refletor é função da velocidade de propagação (v) das ondas eletromagnéticas no meio em estudo e do tempo (t) de ida e volta, temos:

$$d = \frac{v t}{2} \quad (1)$$

A velocidade de propagação depende da constante dielétrica do meio, k , de acordo com a seguinte expressão (Davis e Annan, 1989):

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (2)$$

Sendo c a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vazio ($c=3 \times 10^8$ m/s=0,3 m/ns).

Ou seja, a estimativa da profundidade depende do conhecimento da velocidade no meio a qual, por sua vez, depende do conhecimento da sua constante dielétrica. Conjugando (1) com (2), obtemos:

$$k = \left(\frac{c}{\frac{2d}{t}} \right)^2 \quad (3)$$

Deste modo, a espessura d (m) do material atravessado pelas ondas eletromagnéticas pode ser determinada com base na seguinte expressão (com t em ns), em função da sua constante dielétrica:

$$d = \frac{0,3 t}{2\sqrt{k}} \quad (4)$$

A resolução vertical (L) depende da relação entre o comprimento de onda (λ) e a dimensão do alvo, considerando-se que este deve ter, pelo menos, $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda. Sendo $\lambda = v/f$, com recurso à equação (2), temos:

$$L > \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4f} = \frac{c}{4f\sqrt{k}} \quad (5)$$

Considerando um meio calcário ($7 < k < 9$) e uma antena de elevada frequência central (2600 MHz), temos uma resolução de 0,0096 m, ou seja, ~ 1 cm (com $k=9$).

Existem, contudo, fatores que podem limitar a propagação do sinal eletromagnético, nomeadamente a presença de humidade/água e materiais argilosos, elementos que possuem elevada condutividade elétrica e que atenuam o sinal do georadar.

Nas aplicações que se apresentam de seguida foi utilizado o equipamento SIR 4000, fabricado pela GSSI, equipado com antenas de frequência 400 MHz, 1600 MHz e 2600 MHz.

3. CASOS DE ESTUDO

3.1. Parede de adobe

A Figura 1 ilustra os resultados obtidos numa parede de adobe com 1,57 m de espessura, com recurso a uma antena de 400 MHz.

O refletor presente a cerca de 25 ns corresponde a uma profundidade de 1,5 m, considerando $k = 4$ (argila seca), ou seja, será o tardo da parede. Um outro refletor situado a cerca de 0,7 m de profundidade, entre 1,4 m e 2,05 m de distância, é atribuível à presença de um material mais rígido/estrutural uma vez que esta zona corresponde a uma das extremidades do vão.

A reflexão hiperbólica assinalada a cerca de 1,2 m de distância será devida à presença do tubo e correspondente cabo elétrico para a tomada de eletricidade visível na fotografia.

Destaca-se a elevada atenuação do sinal abaixo de cerca de 0,7 m, o que se atribui a um maior teor de argila do material constituinte da parede.

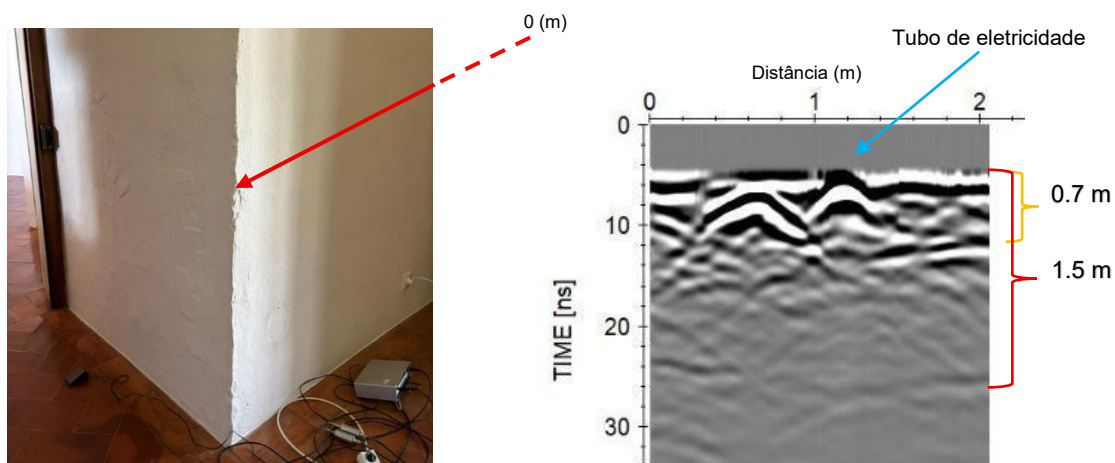


Figura 1 – Esquerda - Parede de adobe; direita – radargrama obtido com antena de 400 MHz

3.2. Parede de tabique

Numa parede de tabique (Figura 2), com espessura inferior a 10 cm, foram realizados perfis verticais, i.e., ortogonais à disposição dos diferentes materiais que a constituem. Esses perfis foram executados em ambas as faces da parede, utilizando antenas de 1600MHz e de 2600 MHz. Em nenhum dos perfis foi possível identificar claras transições entre os elementos constituintes do tabique, transversais ao sentido do perfil. Apenas foi possível reconhecer alguma heterogeneidade do meio (com a antena de maior resolução 2600 MHz); a interface oposta (tardoz) e as diversas camadas que compõem a estrutura da parede na sua espessura, bem como o tubo de eletricidade entre os apliques.

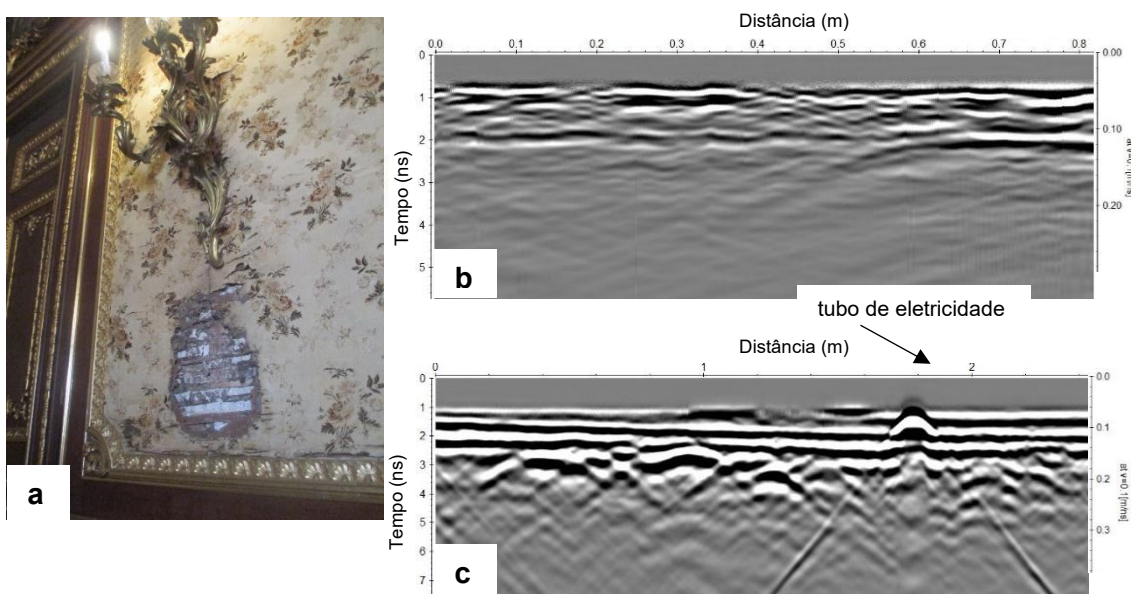


Figura 2 – Parede em tabique, revestida a seda numa das faces (a); radargrama obtido com antena de 2600 MHz, na face visível na fotografia (b); radargrama obtido com antena de 1600 MHz, na face do tardoz da parede (c)

3.3. Bancos de jardim revestidos a azulejo

Nos jardins do Palácio da Bacalhôa existem dois bancos revestidos a azulejo, um com azulejos do século XVII e, o outro, uma réplica executada no séc. XX com azulejos também do séc. XX (Figura 3 (a)). Os azulejos do banco original (Figura 3 (b)) encontram-se degradados, tendo perdido a camada de vidro, tornando-se permeáveis à absorção de água. Foram executados perfis de georadar com antena de 2600 MHz, segundo as orientações indicadas nas Figuras 3a e 3b. Nos perfis executados sobre os azulejos mais antigos destaca-se a atenuação do sinal de georadar, que se atribui à elevada humidade do material. Na réplica são claramente identificáveis todas as juntas entre azulejos, a espessura da estrutura do assento e da parede frontal. No banco original não é identificável qualquer interface tanto no assento como na parede frontal, pelo que se considera que o banco deverá ser maciço.

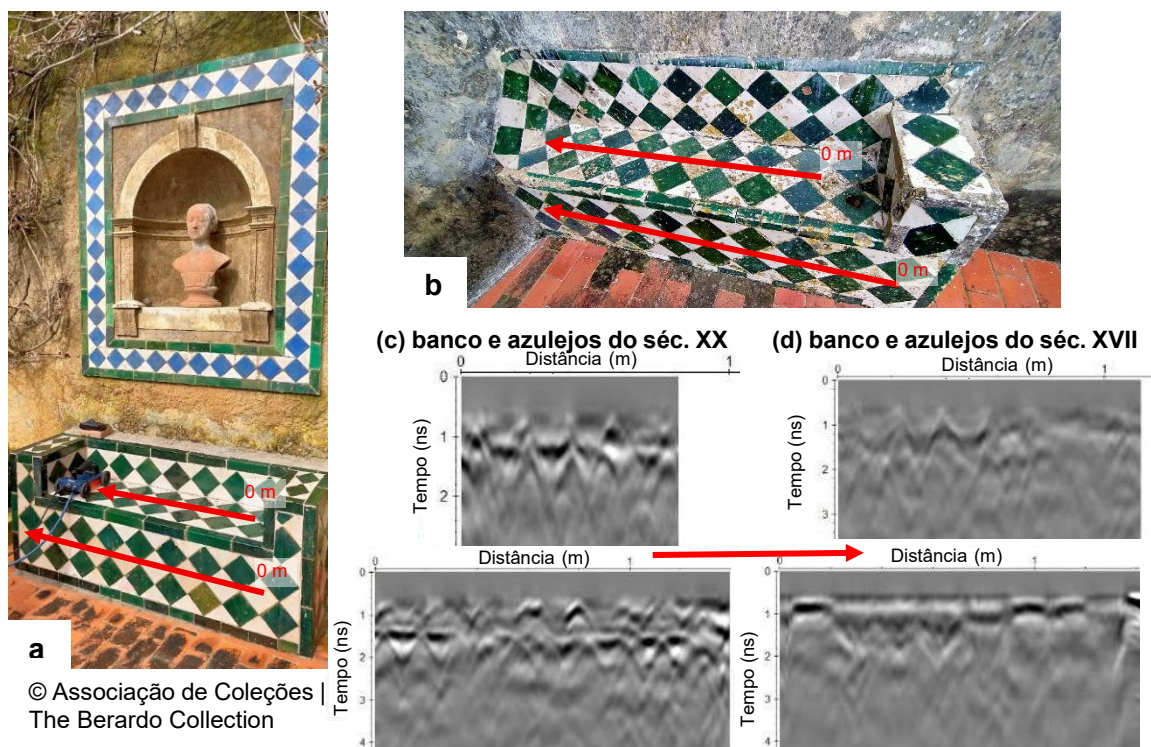


Figura 3 – Dois bancos revestidos com azulejos (as setas vermelhas indicam a direção de execução dos perfis); (a) réplica do séc. XX; (b) banco original, do séc. XVII; (c) radargramas obtidos na réplica com antena de 2600 MHz (superior – assento; inferior – face frontal inferior); (d) radargramas obtidos no banco antigo (superior – assento; inferior – face frontal inferior)

A Figura 4 ilustra os resultados obtidos na réplica com duas taxas de amostragem diferentes, com recurso à mesma antena. Com uma taxa de amostragem mais elevada foi possível identificar a armadura de ferro da estrutura do banco. A menor taxa de amostragem não conseguiu discriminar suficientemente os varões de ferro.

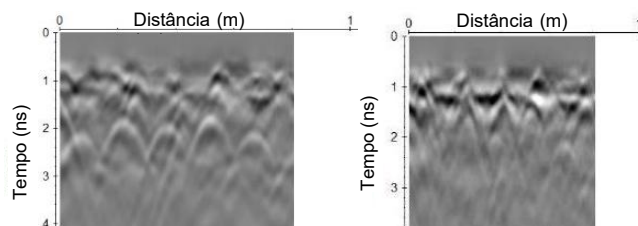


Figura 4 – Radargramas obtidos na réplica do banco. Esquerda: taxa de amostragem de 400 amostras/m; direita: taxa de amostragem de 300 amostras/m

3.4. Igreja de São Roque – cripta(?)

No pavimento da sacristia da igreja de São Roque, em Lisboa, que corresponderá à entrada da anterior igreja, menor e com outra orientação geográfica (Simões, 2015), existe uma pedra diferente das restantes e com ranhuras (Figura 5). Executaram-se perfis de georadaar, com antena de 400 MHz, ao longo da maior dimensão do espaço e ortogonalmente à pedra. Os resultados obtidos apontam para a existência de um vazio transversal aos perfis, detetável até cerca de $\frac{3}{4}$ da largura da sacristia, com maior expressão no perfil 4 (Figura 6), atribuível a uma eventual antiga cripta.

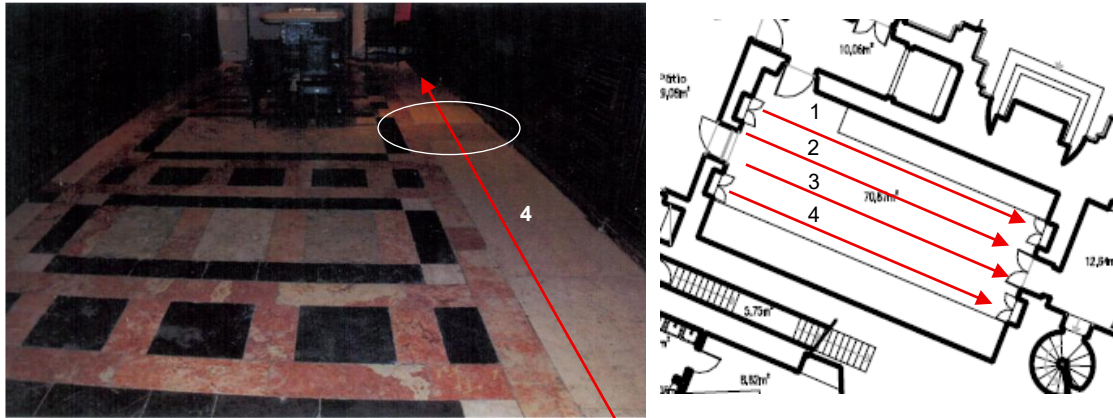


Figura 5 – Perfis executados no pavimento da sacristia. A elipse branca assinala a posição da pedra diferente das restantes

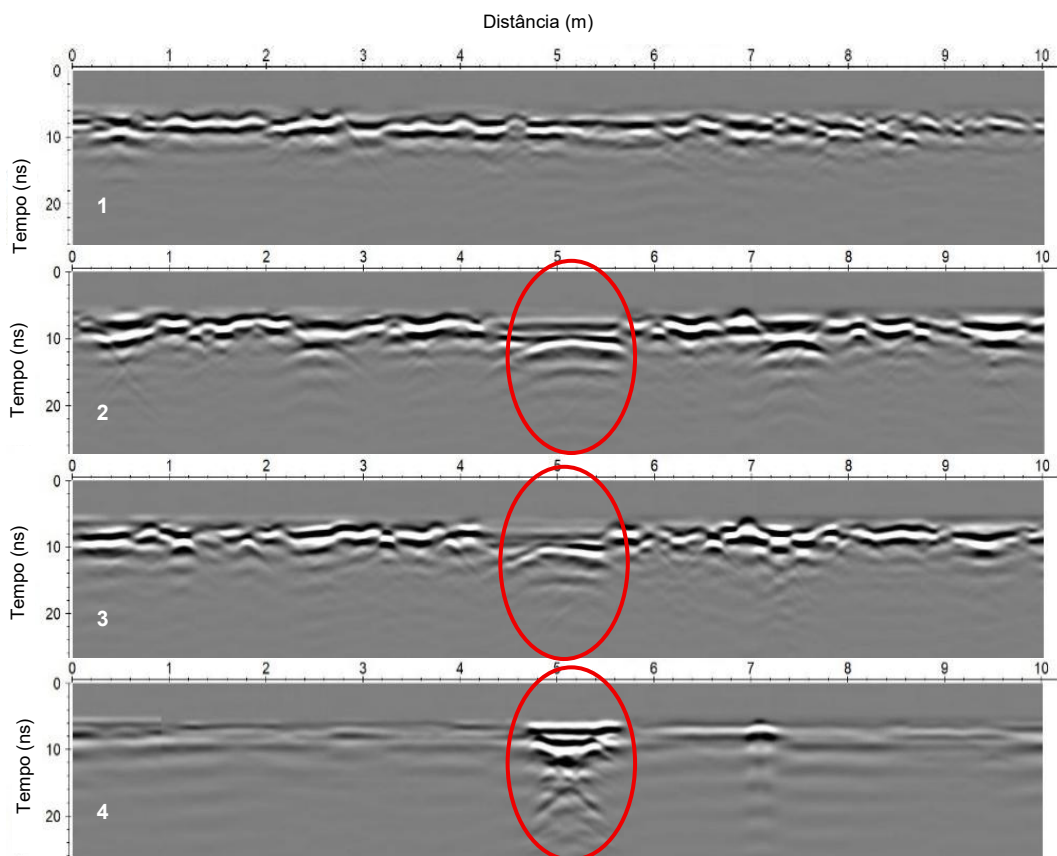


Figura 6 – Radargramas obtidos na sacristia. As elipses de cor vermelha destacam as anomalias correlacionáveis com um vazio sob o pavimento

3.5. Paredes de alvenaria de pedra revestidas a azulejo

Numa parede de alvenaria de pedra na igreja de São Roque, em Lisboa, revestida com azulejo, foi executado um perfil de georadar (com antena de 2600MHz) na vertical, até cerca de 2,5 m de altura. Até cerca de 2,0 m os azulejos são do séc. XVII, e, a partir daí, do séc. XIX (Figura 7).

No radargrama, a interface azulejo/argamassa é interpretada como o refletor verde (linhas tracejadas a branco).

A secção correspondente ao séc. XVII apresenta um maior tempo (cerca de 0,40 ns) do que a mais recente (cerca de 0,30–0,35 ns); estas diferenças indicam a presença de azulejos com diferentes espessuras. De facto, amostras de azulejos desses períodos apresentam espessuras de $\approx 15\text{--}17\text{ mm}$ (séc. XVII) e $10\text{--}12\text{ mm}$ (séc. XIX).

É, ainda, observável um refletor uniforme, contínuo e mais intenso (avermelhado) subjacente aos azulejos do séc. XIX, o qual é atribuído a uma argamassa mais resistente e homogénea do que a mais antiga, presente sob os azulejos do séc. XVII.

No lado esquerdo do radargrama, próximo do pavimento (o perfil teve início 0,28 m acima do solo), é claramente visível um padrão atribuível a uma antiga tubagem, centrado a cerca de 0,12 m do início do perfil (aproximadamente 0,40 m acima do solo).

Tendo em conta os tempos obtidos e as espessuras dos azulejos, a constante dielétrica para o material constituinte dos azulejos pode ser estimada entre 14 e 19.

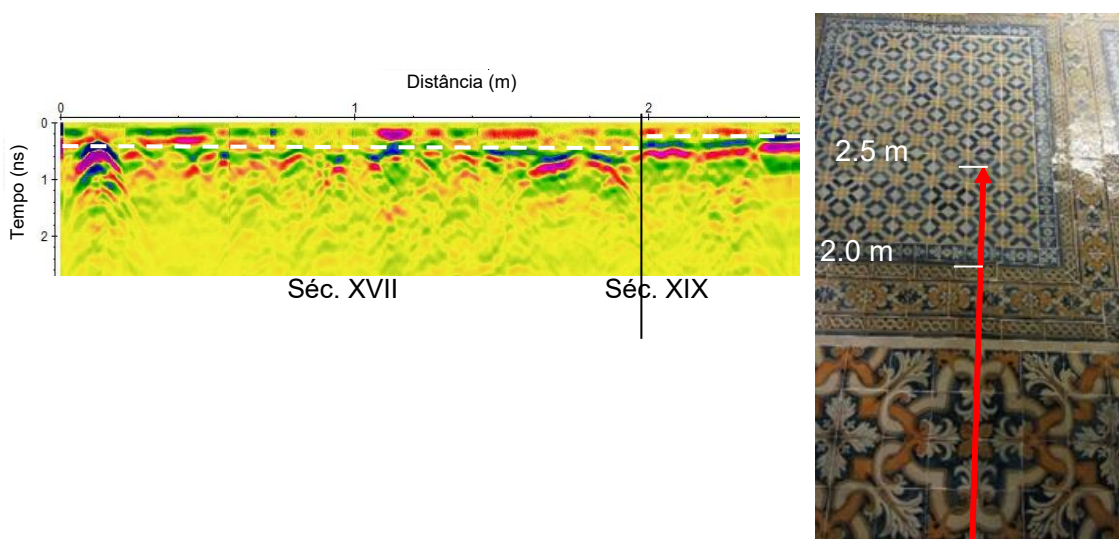


Figura 7 – Radargrama obtido numa parede revestida com dois painéis de azulejos, um produzido no séc. XVII (até cerca de 2 m acima do chão) e, acima, o segundo, produzido no séc. XIX (a seta vermelha indica a direção do perfil executado)

Num perfil executado igualmente com antenas de 2600MHz, sobre uma parede de alvenaria de pedra do Palácio da Bacalhôa, revestida com azulejos do séc. XVI, são identificáveis as juntas entre os azulejos, a sua espessura ($t=0,70\text{ ns}$; $d\approx 25\text{ mm}$; $K\approx 18$) e a inerente heterogeneidade da parede.

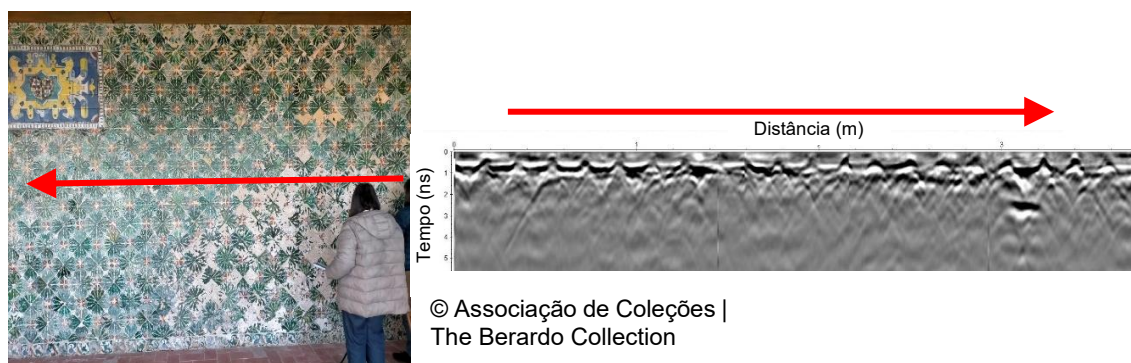


Figura 8 – Radargrama obtido numa parede revestida com azulejos do séc. XVI

3.6. Painel decorativo em alabastro

Para definir a melhor forma de remover de uma parede um painel decorativo em alabastro de elevado valor patrimonial, mantendo a sua integridade, era necessário estimar as espessuras médias do painel e da argamassa de assentamento do mesmo. Para obter estas estimativas foram executados vários perfis de georadar com antena de 2600 MHz. A Figura 9 ilustra o radargrama obtido num desses perfis com a correspondente interpretação.

Para estimativa da espessura dos materiais considerou-se, com base em valores tabelados (por exemplo, Davis e Annan, 1989), os seguintes valores para k : $k=6$ para o alabastro e $k=7$, para a argamassa de assentamento. Assim, com recurso à equação (4), obtiveram-se espessuras médias de 5,5 cm, para o alabastro, e 4,9 cm, para a argamassa. No decurso dos trabalhos de remoção do painel foi possível confirmar a validade destas espessuras estimadas, o que, por sua vez, confirma a validade dos valores de k assumidos *a priori* para estes materiais.

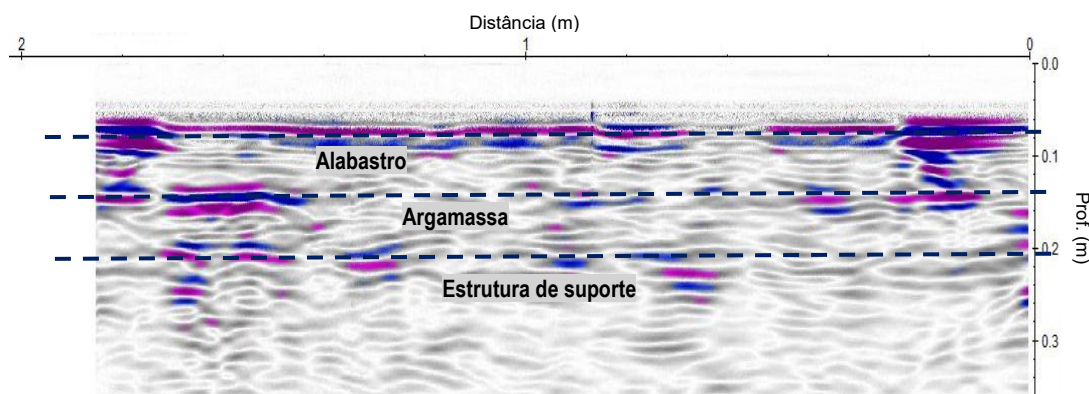


Figura 9 – Radargrama com a correspondente interpretação de materiais

3.7. Paredes em alvenaria de tijolo

Nas paredes de alvenaria de tijolo, os radargramas dependem da direção em que o perfil de georadar é executado e podem apresentar diferentes padrões e reflexões, em função do preenchimento dos espaços vazios (canudos dos tijolos) e da orientação dos perfis face à disposição dos canudos, i.e se os perfis são executados paralelamente ou ortogonalmente aos canudos. As Figuras 10 e 11 ilustram estas diferenças entre perfis horizontais e verticais efetuados com antena de 2600 MHz.

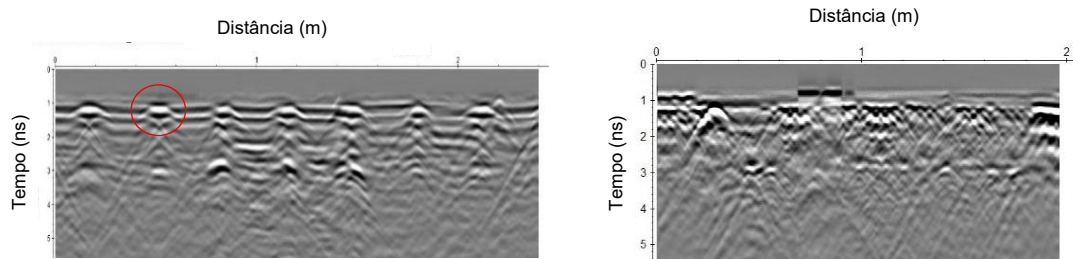


Figura 10 – Esquerda: radargrama resultante de um perfil executado na horizontal (o círculo vermelho destaca uma junta entre tijolos); direita: radargrama resultante de um perfil executado na vertical

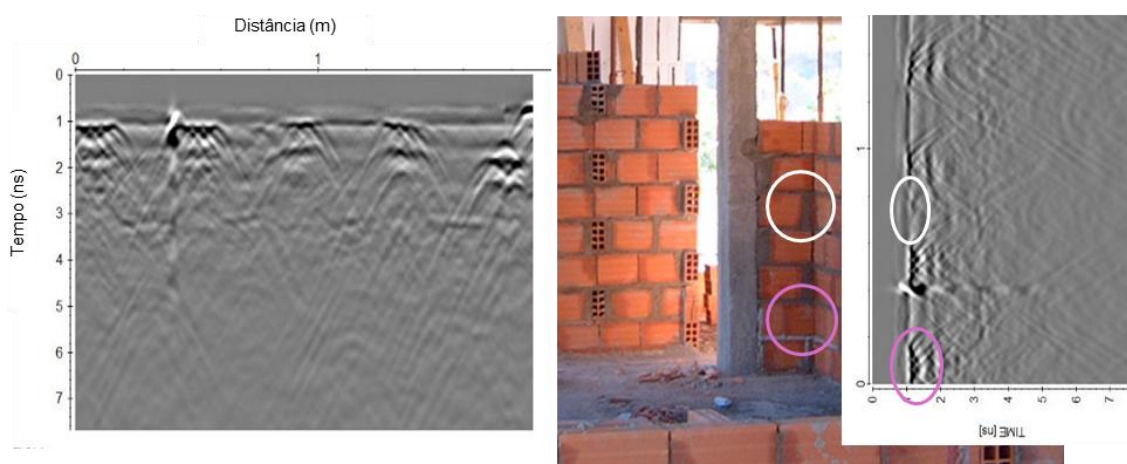


Figura 11 – Radargrama resultante de um perfil executado sobre a esquina de uma parede de alvenaria de tijolo, na vertical; a elipse de cor violeta destaca o sinal das regiões vazadas do tijolo, enquanto a elipse branca destaca o sinal do topo do tijolo instalado ortogonalmente, preenchido com argamassa

A Figura 12 ilustra os radargramas obtidos com antena de 2600 MHz numa parede cuja natureza estrutural se desconhecia *a priori* (poderia ser de alvenaria de tijolo ou em betão armado), revestida, na parte inferior, com azulejos, e na parte superior, com estuque. Os radargramas, sobretudo quando comparados com os apresentados nas Figuras 10 e 11, indiciam que a estrutura da parede é constituída por alvenaria de tijolo.

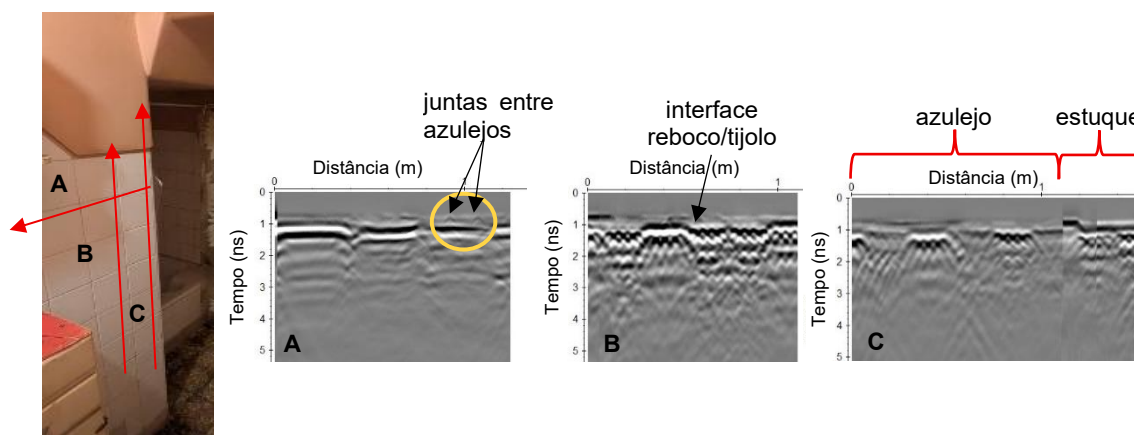


Figura 12 – Radargramas obtidos sobre parede de alvenaria de tijolo revestida a azulejos e a estuque, de meados do séc. XX

Tal como nos exemplos das Figuras 10 e 11, observa-se que as reflexões são dependentes da geometria do perfil de aquisição dos registos de georadar, apresentando padrões diferenciados em função da orientação do perfil. São identificáveis nos radargramas os seguintes elementos: algumas juntas entre azulejos; a interface entre o reboco de regularização e os tijolos; a diferenciação entre a superfície em azulejo e em estuque, e os canudos dos tijolos, não sendo perceptível o tardo da parede.

4. Conclusões

Com base nos ensaios não destrutivos realizados com recurso ao georadar em diferentes elementos construtivos e patrimoniais, conclui-se que:

- **Eficácia na caracterização estrutural:** O método demonstrou ser eficaz na determinação de espessuras e na identificação da estratigrafia interna de elementos históricos. No painel de alabastro, a estimativa baseada em constantes dielétricas tabeladas ($k=6$ para alabastro e $k=7$ para argamassa) apresentou elevada precisão, sendo validada posteriormente durante a remoção física do elemento.
- **Identificação de elementos ocultos e vazios:** A técnica permitiu a deteção de infraestruturas modernas embutidas (tubos e vazios) e anomalias correlacionáveis com estruturas históricas ocultas, como a possível cripta na Igreja de São Roque, identificada por reflexões características de vazios sob o pavimento.
- **Influência da composição e da humidade:** A natureza dos materiais condiciona significativamente a propagação do sinal. Observou-se elevada atenuação em paredes de adobe (alto teor de argila) e em azulejos degradados devido à absorção de humidade, o que limita a visibilidade de interfaces profundas e pode indicar estados de conservação precários.
- **Resolução versus amostragem:** A seleção da antena e da taxa de amostragem é crítica para a interpretação dos resultados. Enquanto antenas de maior frequência (2600 MHz) permitiram observar heterogeneidades em paredes delgadas (tabique) e identificar juntas de azulejos, a variação na taxa de amostragem revelou-se determinante para a discriminação de elementos de pequena dimensão, como a armadura de ferro em estruturas de betão/pedra.
- **Anisotropia e geometria de aquisição:** Em alvenarias de tijolo, a assinatura eletromagnética é fortemente dependente da direção do perfil em relação à orientação dos furos (canudos) e juntas, exigindo aquisições ortogonais para uma interpretação fidedigna da tipologia construtiva.
- **Diferenciação cronológica:** A análise dos tempos de reflexão em painéis de azulejos permitiu distinguir materiais de diferentes épocas (Séc. XVII vs. Séc. XIX) através da variação de espessura e da intensidade da reflexão da argamassa de assentamento, demonstrando o potencial do georadar como ferramenta de apoio à arqueologia da arquitetura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Palácio Nacional da Ajuda, à Fundação Berardo e à Santa Casa da Misericórdia de Lisboa o apoio concedido e a autorização para publicação dos

resultados obtidos. O estudo teve o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, através do projeto com a referência PTDC/HAR-HIS/5288/2020.

REFERÊNCIAS

- Annan, A.P., Davis, J.L. (1977). *Radar range analysis for geological materials*. Report of Activities, Geological Survey of Canada, Paper 77-1B, 117-124.
- Davis, J.L., Annan, A.P. (1989). *Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy*. Geophysical Prospecting, 37:531-551. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>.
- Leucci, G., De Giorgi, L., Ditaranto, I., Miccoli, I., Scardozzi, G., (2021) Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography surveys at the Cerrate Abbey (Lecce, Italy). Exploration geophysics. <https://doi.org/10.1080/08123985.2021.2006574>
- Lombardi, F., Lualdi, M., Garavaglia, E., (2021). Masonry texture reconstruction for building seismic assessment: Practical evaluation and potentials of Ground Penetrating Radar methodology. Construction and Building Materials 299 (2021) 124189. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124189>
- Meyer, C., Ullrich, B., Barlieb, C.D.M. (2007). *Archaeological Questions and Geophysical Solutions: Ground-Penetrating Radar and Induced Polarization Investigations in Munigua, Spain*. Archaeol. Prospect. 14, 202–212
- Oliveira, M., Rodrigues, L., Coelho, M. (1992). *Prospecção por georadar. Detecção de condutas*. Revista Indústria da Água, setembro de 1992, Lisboa. Nº5, pág. 15 - 17.
- Oliveira, M., Rodrigues, L. (1994). Application of ground penetrating radar in engineering geology – Detection of cavities. *Proc. 7th International Congress of International Association of Engineering Geology*, 5 – 9 setembro 1994, Lisboa. *Proceedings*, Vol. 1, pág. 205 - 211.
- Oliveira, M., Mun, M., Genin, S. (2003). *Prospecção por radar sobre as abóbadas da igreja do Mosteiro dos Jerónimos. 3º ENCORE - Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*, 26 – 30 maio 2003, Lisboa. *Actas*, Vol 1, pág. 327 - 336.
- Ortega-Ramírez, J., Bano, M., Villa Alvarado, L.A., Medellín Martínez, D., Rivero-Chong, R., Motolinía-Temol, C.L. (2021). *High-resolution 3-D GPR applied in the diagnostic of the detachment and cracks in pre-Hispanic mural paintings at “Templo Rojo”, Cacaxtla, Tlaxcala, Mexico*, Journal of Cultural Heritage, 50, 61-72 <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.06.008>
- Simões, J.M. (2015). As duas igrejas jesuíticas de São Roque. Os projectos, as discussões e as opções à luz de novos documentos, *Artis*, 2.ª série, n.º 3, pp. 42-49
- Tohge, M., Karube, F., Kobayashi, M., Tanaka, A., Ishii, K. (1998). *The use of ground penetrating radar to map an ancient village buried by volcanic eruptions*. J. Appl. Geophys., 40, 49–58.
- Wang, T.P., Chen, C.C., Tong, L.T., Chang, P.Y., Chen, Y.C., Dong, T.H., Liu, H.C., Lin, C.P., Yang, K.H., Ho, C.J., Cheng, S.N. (2015). *Applying FDEM, ERT and GPR at a site with soil contamination: A case study*. Journal of Applied Geophysics, 121, 21–30