

CRITÉRIOS PARA PUBLICAÇÃO DE ARTIGOS TÉCNICOS

Na sequência do posicionamento que a "Ingenium" tem vindo a assumir nos últimos anos, no sentido de se tornar uma revista mais plural e mais eclética, não só em termos de tratamento de temas, como ao nível do perfil das Comunicações de natureza técnica nela publicadas, o Conselho Editorial da "Ingenium" decidiu dirigir um apelo aos autores dos artigos técnicos, que possa resultar em contributos de carácter técnico mais abrangente, com vista a gerar um interesse e uma receptividade ainda superiores por parte do maior número de Colegas, independentemente da sua especialidade de Engenharia.

Não sendo a "Ingenium" uma revista científica, entende o Conselho Editorial e o seu Director, que a assumpção deste posicionamento poderá tornar a revista num meio informativo ainda com maior utilidade para os membros da Ordem dos Engenheiros.

Neste contexto, a "Ingenium" irá privilegiar a publicação de artigos actuais; originais; da autoria de membros da Ordem; com elevado grau de abrangência de especialidades de engenharia; elaborados numa linguagem acessível ao maior

número de engenheiros; com tratamento de matérias não herméticas, por forma a incluir na sua leitura a maioria do público a que se dirige.

Características Técnicas

- Apresentação em língua portuguesa;
- Extensão máxima de 14.000 caracteres (com espaços);
- Inclusão de gráficos / quadros / figuras ilustrativas / fotografias a cores e com qualidade, que contribuam para o aumento da transparência e do ritmo da mensagem;
- Iniciados por um parágrafo de três ou quatro linhas que resuma o conteúdo;
- Alusão expressa ao(s) nome(s) do(s) autor(es), instituição e contactos (e-mail ou tel.);
- Apresentados em formato electrónico (Word);
- Remetidos para o Colégio da Especialidade ou para Dra. Alice Freitas (aafreitas@ordemdosengenheiros.pt; tel.: 21 313 26 00).

Os artigos recebidos serão submetidos à apreciação do Colégio correspondente à especialidade de Engenharia em que se integrem.

ENGENHARIA CIVIL

POSSIBILIDADES DO RADAR DE PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA EM ESTRUTURAS E APLICAÇÕES EM PORTUGAL

FRANCISCO M. FERNANDES

Investigador Pós Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal • Gerente do spin-off académico Tecnowave Unipessoal Lda. (www.tecnowave.com.pt)

PAULO B. LOURENÇO

Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

PAULO J. S. CRUZ

Professor Catedrático, Departamento Autónomo de Arquitectura, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

RESUMO

A inspeção de estruturas em alvenaria e betão armado com recurso ao radar de prospecção geotécnica tem sido aplicada há mais de 30 anos para, de uma forma não destrutiva e não intrusiva, determinar a constituição de elementos estruturais e detectar anomalias. Com um campo de aplicação alargado e de uma utilização relativamente simples, o georadar pode ser utilizado na detecção de armaduras e de bainhas de pré-esforço, na determinação de espessuras e da geometria, bem como na detecção de humidade, fendas e outras anomalias. No entanto, existem limitações e a interpretação dos resultados exige o domínio dos equipamentos e das ferramentas informáticas, bem como conhecimento sobre as estruturas em avaliação.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da actividade na reabilitação de edifícios e de estruturas de engenharia civil em Portugal demonstra que os métodos construtivos, os materiais de construção e as metodologias de análise utilizados são muitas vezes inadequados. Por outro lado, o diagnóstico do estado de conservação e da segurança da estrutura tem recebido pouca importância. Nas últimas décadas, a utilização de ensaios não

destrutivos aumentou de forma significativa na inspecção e diagnóstico de estruturas de engenharia civil. A possibilidade de conhecer o invisível, detectando à distância características e objectos escondidos por trás de superfícies opacas, é fascinante, sendo actualmente possível, com algumas limitações. O radar de prospecção geotécnica, também designado por georadar ou GPR (“Ground Penetrating Radar”), é um método baseado na propagação de radiação electromagnética de elevada frequência. Esta técnica tem sido utilizada nos últimos 30 anos na prospecção geológica e, mais recentemente, na engenharia de estruturas.

Sendo uma técnica relativamente recente, a evolução tecnológica e o desenvolvimento de ferramentas informáticas para um melhor tratamento dos sinais são constantes. Em Portugal, trata-se de uma técnica que tem dado os seus primeiros passos na inspecção de pontes (Cruz *et al.*, 2006), monumentos históricos (Fernandes *et al.*, 2006) e prospecção arqueológica (Grangeia e Matias, 2004). As possibilidades da sua utilização são abrangentes, existindo ainda um desconhecimento desta técnica por parte dos profissionais em Portugal. Este artigo pretende dar a conhecer os princípios de funcionamento e as características e potencialidades do radar de prospecção geotécnica, as suas vantagens e limitações, bem como alguns exemplos recentes de aplicação nacional e da investigação actual.

2. O RADAR DE PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA

2.1. Descrição e modo de funcionamento básico

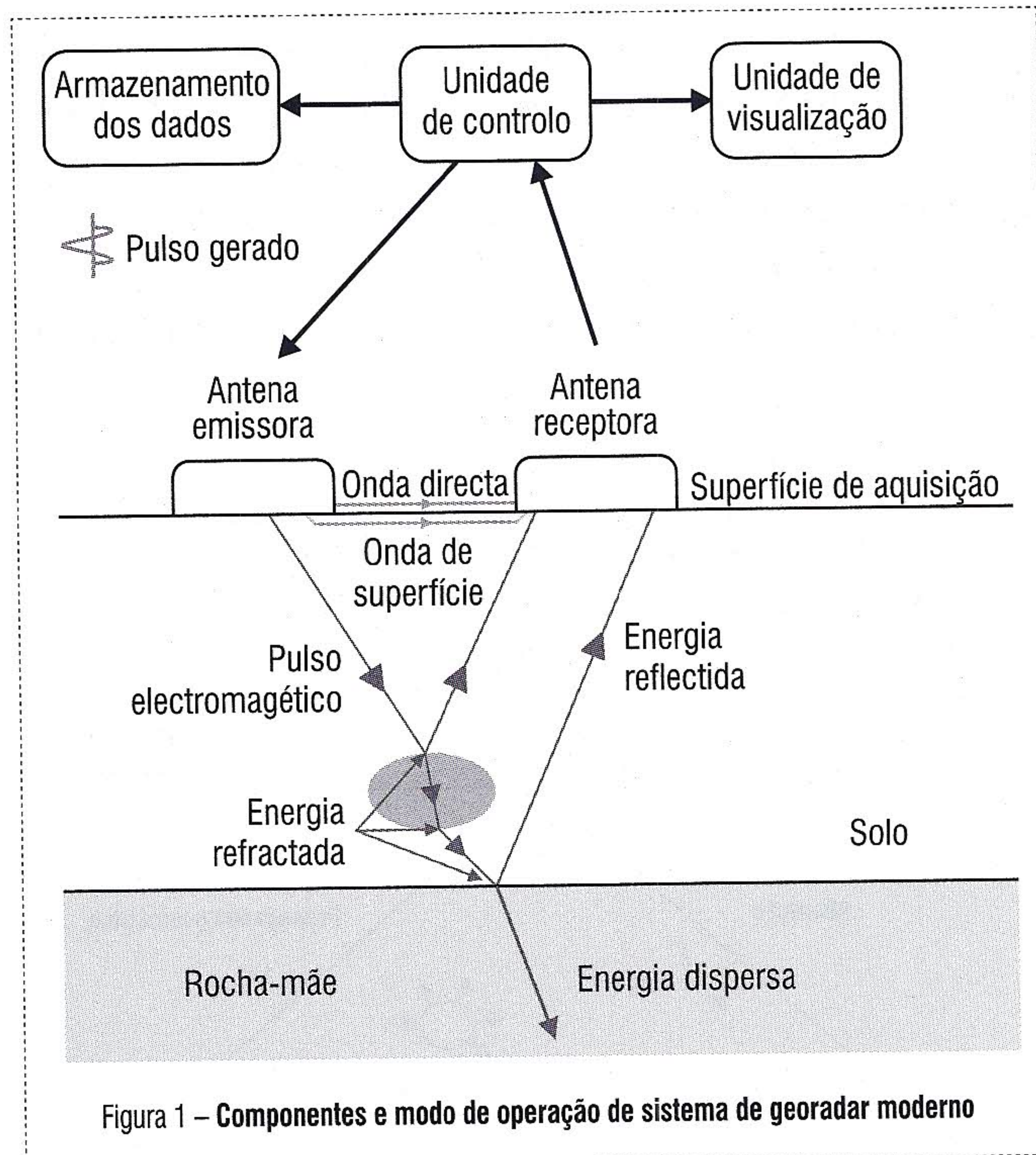


Figura 1 – Componentes e modo de operação de sistema de georadar moderno

Um sistema moderno de georadar é constituído pelos quatro componentes ilustrados na Figura 1: unidade de controlo, antena(s), unidade de visualização e unidade de armazenamento de dados. A unidade de controlo gera e configura o sinal, enquanto as antenas emitem a radiação electromagnética, registam as reflexões e transformam a radiação em informação digital, armazenada em dispositivo próprio para posterior processamento.

As antenas, provavelmente o elemento mais importante de um sistema de georadar, são caracterizadas pela sua frequência central f , seleccionada de um grande intervalo de frequências, de 10 a 2000 MHz. A frequência da antena depende do tipo de aplicação, profundidade e dimensões dos alvos potenciais e das condições ambientais. A Tabela 1 ilustra aplicações, resoluções esperadas e profundidades de penetração típicas de antenas, em condições adequadas de propagação (uma explicação mais detalhada é apresentada mais abaixo).

Tabela 1 – Características típicas das antenas de radar

Frequência	Penetração	Resolução	Aplicações correntes
10 a 50 MHz	10 a 50 m	Baixa	Geologia, geotecnia mineira e ambiente
100 MHz	5 a 20 m		
200 MHz	2 a 7 m	Baixa a média	Geotecnia, ambiente e engenharia
500 MHz	1 a 4 m	Média a alta	Engenharia
1000 MHz	0.5 a 1.5 m	Alta	
> 1500 MHz	0.4 a 0.5 m	Muito alta	

Os sistemas de radar permitem diferentes modos de operação, sendo essencial adoptar técnicas de processamento de sinal e ferramentas de visualização avançadas, de forma a uma adequada compreensão da informação obtida. O modo de operação mais utilizado é o modo de reflexão, em que o emissor irradia o meio em análise com energia electromagnética e o receptor recebe os ecos reflectidos pelas interfaces entre materiais com diferentes características dieléctricas. O emissor e receptor, geralmente fisicamente localizados num mesmo invólucro blindado, são mantidos a uma distância constante e deslocados sobre a superfície a investigar (ver Figura 2). O sistema obtém o tempo que a onda de rádio demora a percorrer a distância entre o emissor, a interface reflectora e o receptor, geralmente designado

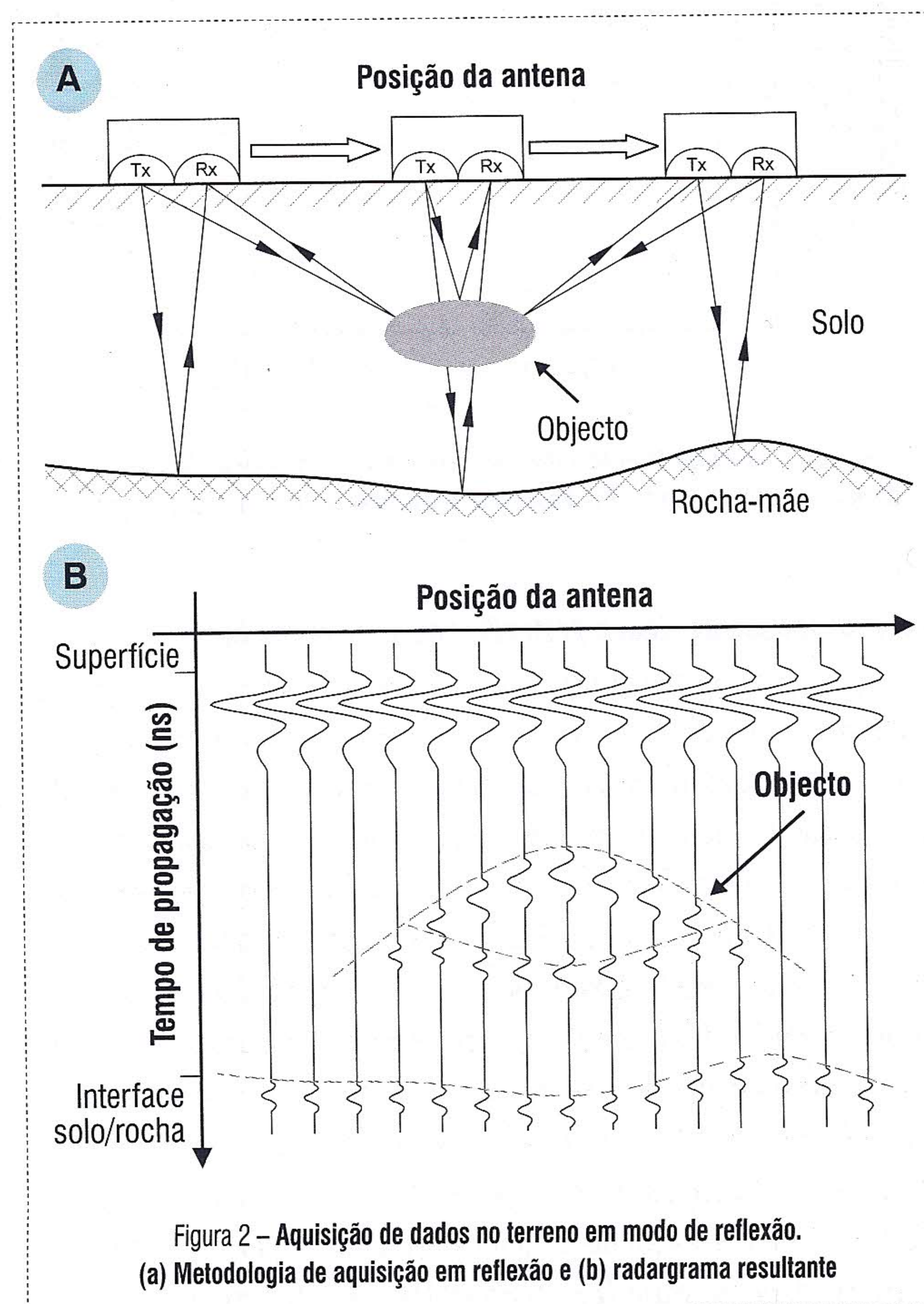


Figura 2 – Aquisição de dados no terreno em modo de reflexão. (a) Metodologia de aquisição em reflexão e (b) radargrama resultante

por tempo de viagem de ida e volta, i.e. "Two-Way Travel-Time", sendo expresso em nanossegundos (ns). Nas diferentes posições de aquisição são obtidos traços, que representam a evolução da amplitude do sinal emitido pela unidade ao longo da profundidade que, quando justapostos, formam um diagrama de radar ou radargrama. Informação adicional sobre sistemas georadar e sobre o seu funcionamento pode ser obtida em Reynolds (1997) e Daniels (2004). Um segundo modo de operação é a tomografia, em que o emissor e o receptor são localizados em posições diferentes, de forma a cobrir completamente a área a investigar com feixes electromagnéticos. Neste modo, para cada posição do emissor, o receptor é deslocado ao longo de diversas posições, permitindo obter as velocidades de propagação para cada localização do par "emissor/receptor" (ver Figura 3). A reconstrução da imagem interna do corpo a investigar é um problema inverso para o qual existem diferentes algoritmos de solução (Hall *et al.*, 1999; Valle *et al.*, 1999). Esta técnica é muito exigente em termos de tempo de aquisição de dados no local e de recursos computacionais, sendo unicamente utilizada para a resolução de problemas particularmente complexos. Existe ainda um terceiro método, designado por CMP (Ponto Médio Comum), que, devido à sua menor utilização, não será abordado neste artigo.

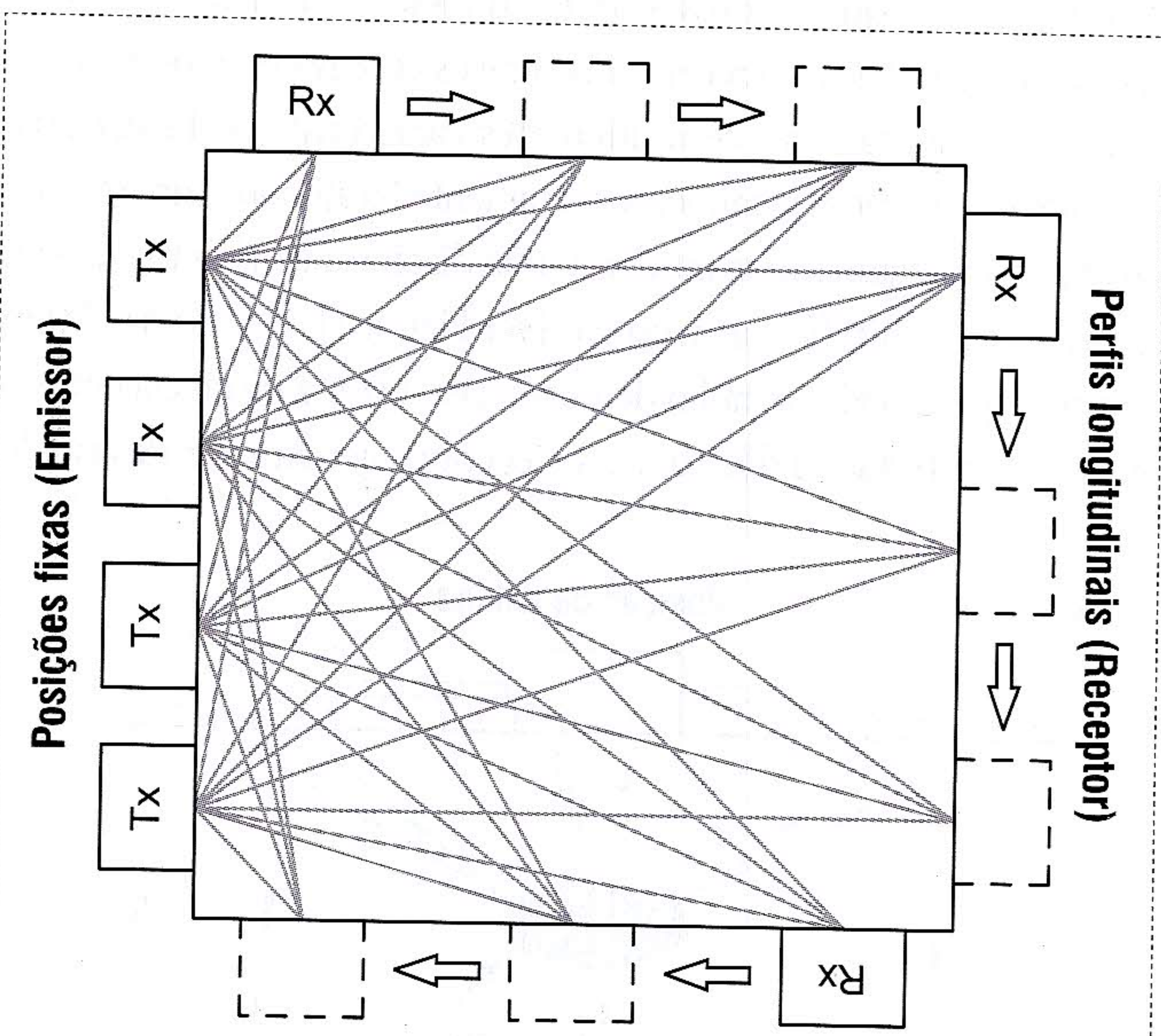


Figura 3 – Aplicação da tomografia num pilar quadrado, indicando a localização do emissor (Tx) e receptor (Rx), bem como a cobertura de feixes electromagnéticos

2.2. Propagação do sinal e profundidade de penetração

A propagação do sinal emitido pelo georadar através do solo ou dos materiais de construção depende das características desse sinal e das propriedades dos materiais, nomeadamente as suas propriedades dieléctricas. O efeito da frequência do sinal na propagação das ondas está apresentado na Tabela 1. Sabe-se ainda que as propriedades dos materiais influenciam a velocidade de propagação do sinal emitido, assim como a precisão dos resultados e a profundidade máxima. As propriedades dos materiais que governam a propagação das ondas electromagnéticas podem ser resumidas às seguintes: permissividade (ϵ), condutividade eléctrica (σ) e permeabilidade magnética (μ). Em geral, os materiais são caracterizados pela sua constante dieléctrica (ϵ_r) que corresponde ao quociente entre a permissividade e a permissividade no vazio ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$). A Figura 4

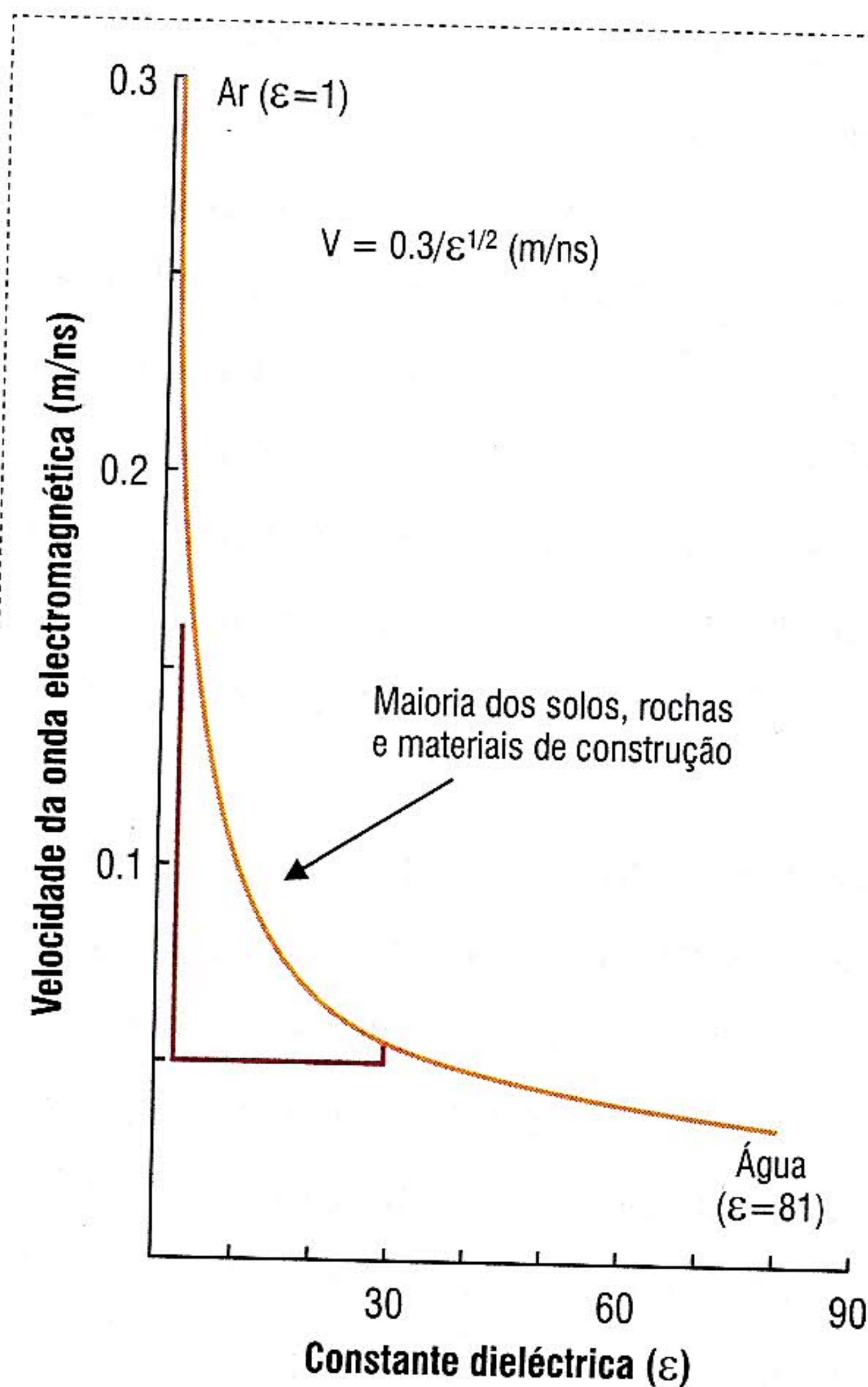


Figura 4 – Diagrama de valores da constante dieléctrica para o ar, água e materiais comuns

ilustra o valor dessa constante para cada tipo de material, onde se verifica que a constante dieléctrica do ar é igual à unidade e a constante dieléctrica da água corresponde a 81, o valor mais elevado. A maioria dos solos, rochas e materiais de construção em estado seco possuem uma constante dieléctrica no intervalo dos 4 aos 30. As propriedades dieléctricas permitem uma maior ou menor velocidade de propagação e reflexão da energia incidente.

O sinal do georadar propaga-se no vazio à velocidade da luz ($c = 30 \text{ cm/ns}$). Nos solos, rochas e materiais de construção, a velocidade de propagação é inferior à velocidade de propagação no vazio, sendo expressa da seguinte forma

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

onde se verifica que a velocidade de propagação da onda depende da permissividade, da condutividade eléctrica e da permeabilidade magnética, o que explica a razão pela qual os sinais de georadar não se propagam por metais, materiais ferrosos ou camadas de solo de elevada condutividade, tais como solos argilosos. Nestas situações, a velocidade tende para zero. Adicionalmente, considerando que

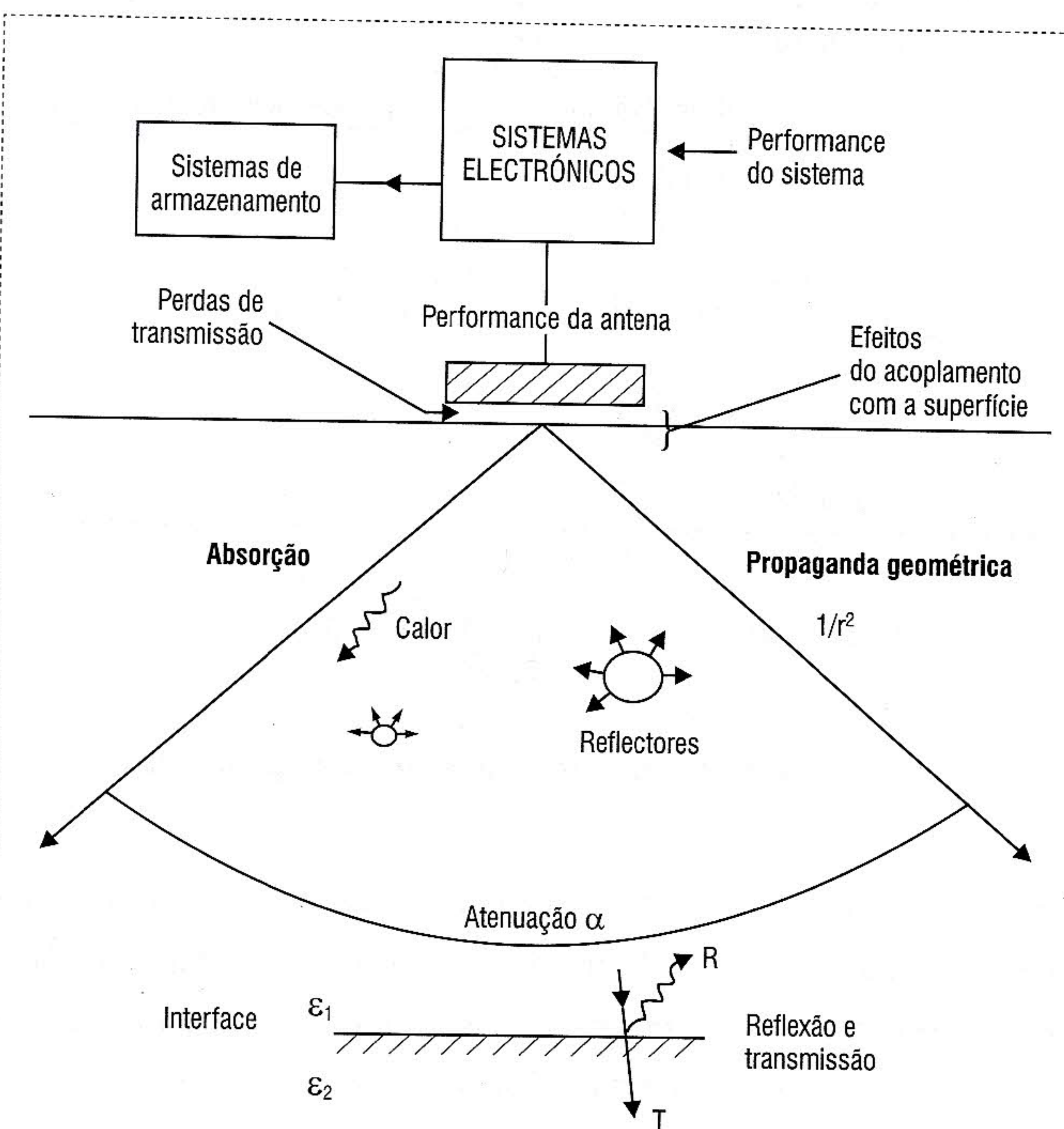


Figura 5 – Esquema representando as perdas de energia do sinal emitido pela antena de georadar durante todo o percurso, desde a emissão à recepção

todos os materiais de construção, solos e rochas em estado seco não são magnéticos ($\mu=1$), nem condutores ($\sigma=0$), a expressão anterior pode ser simplificada, de forma a que a velocidade dependa só da raiz quadrada da constante dielétrica. Uma conclusão imediata é que o sinal de georadar se propaga mais depressa em materiais secos do que em materiais húmidos, uma vez que a constante dielétrica aumenta significativamente com a presença de água.

Adicionalmente, o sinal experimenta uma série de perdas ao longo do percurso que podem limitar a profundidade máxima atingível (ver Figura 5). As perdas são devidas aos seguintes factores: ineficiência dos componentes electrónicos e do acoplamento das antenas ao solo (à entrada e à saída do sinal); diminuição da densidade de potência com a profundidade (atenuação) devido à propagação da energia em forma de cone; absorção do material, orientação e textura dos reflectores; e contraste insuficiente entre materiais.

2.3. Resolução

A precisão dos resultados, ou resolução, depende exclusivamente da frequência central e é considerada directamente proporcional ao comprimento de onda do sinal emitido. A escolha mais apropriada da antena/frequência para uma aplicação depende da dimensão do objecto a detectar e da sua profundidade expectável. Existem três propriedades fundamentais no processo de decisão: a resolução vertical, que corresponde à capacidade do georadar em distinguir dois pontos próximos na vertical, a resolução espacial, que corresponde à capacidade do georadar em distinguir dois pontos à mesma profundidade, e, finalmente, o conceito de *skin depth*, que corresponde à profundidade mínima a partir da qual é possível detectar objectos sem a obstrução do sinal de superfície.

3. APLICAÇÕES EM ESTRUTURAS

O leque de aplicações do GPR em estruturas da engenharia civil é muito amplo, tirando partido das antenas de alta-frequência (> 1000 MHz), e incluem, por exemplo, a verificação da geometria em estruturas, a detecção de armaduras, bainhas de pré-esforço e outros elementos metálicos, a detecção de delaminação e a detecção de humidade. No caso de construções em alvenaria, a combinação de técnicas simples de reflexão 2D com técnicas mais avançadas de reflexão 3D e tomografia permitem detectar vazios, a espessura de panos de paredes, a espessura e forma de abóbadas e arcos, enchimentos em pontes e abóbadas, elementos metálicos (gatos, tirantes e ancoragens) e dano no interior de elementos estruturais, entre outras aplicações. Na Figura 6 ilustram-se aplicações em laboratório e em monumentos de alvenaria de algumas destas possibilidades (Fernandes, 2006).

3.1. Detecção de armadura e bainhas de pré-esforço

Em Portugal, um número significativo de pontes em betão armado e pré-esforçado exibem deterioração das armaduras por corrosão após décadas em serviço sem manutenção. Grande parte dessas pontes está actualmente a ser reparada e reforçada. No entanto, os projectistas enfrentam frequentemente diversos problemas, tais como a falta dos desenhos do projecto original, ou o desconhecimento da posição real das armaduras e das bainhas de pré-esforço, que atra-

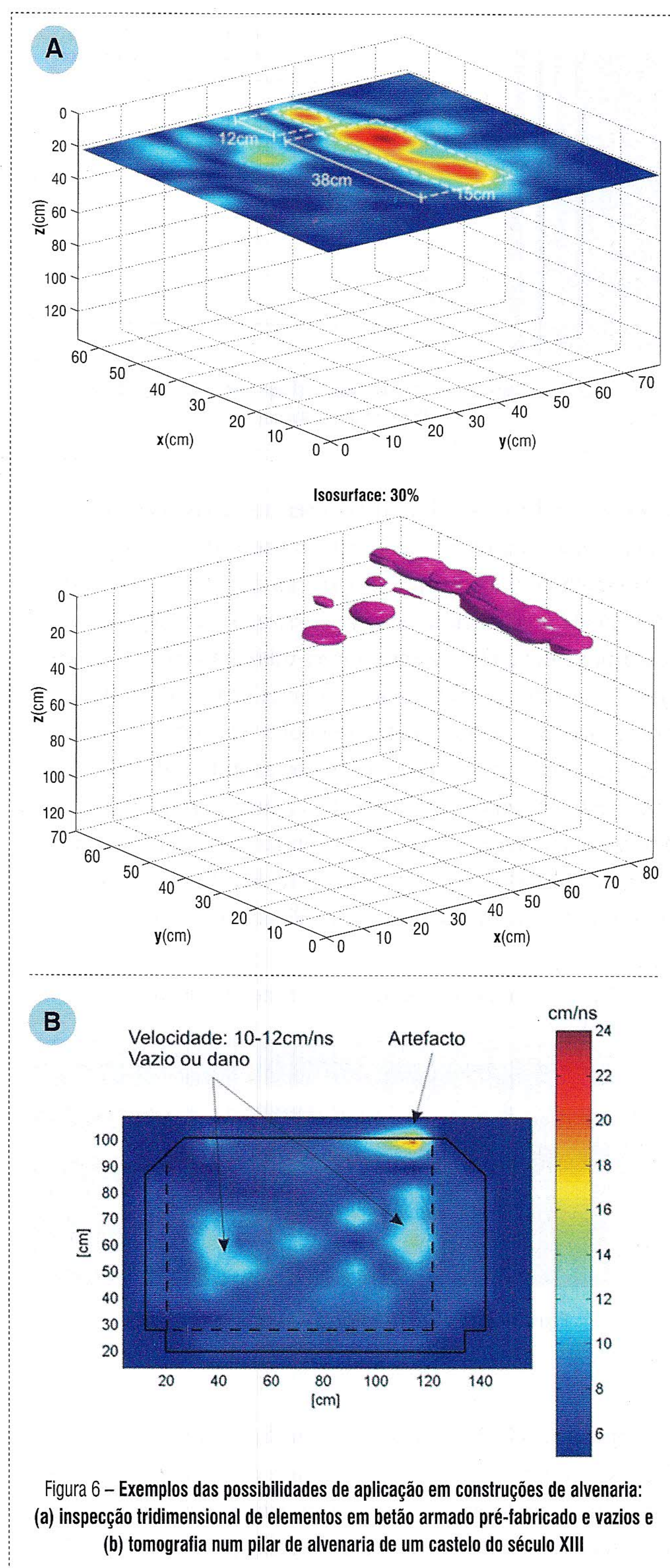


Figura 6 – Exemplos das possibilidades de aplicação em construções de alvenaria: (a) inspeção tridimensional de elementos em betão armado pré-fabricado e vazios e (b) tomografia num pilar de alvenaria de um castelo do século XIII

sam a execução do projecto ou que impedem a sua realização, que, frequentemente, exige estudos adicionais.

O georadar é um método adequado para a detecção de armaduras e cabos/bainhas de pré-esforço (Dérobert *et al.*, 2002; Giannopoulos *et al.*, 2002). Ao contrário de outras técnicas, cuja actuação é relativamente superficial, o georadar possibilita a rápida detecção e localização em profundidade dos elementos citados. A Figura 7 exemplifica a detecção das armaduras e bainha de pré-esforço numa viga longitudinal na Ponte da Barra, em Aveiro (Cruz *et al.*, 2006).

Como foi apresentado anteriormente, a resolução espacial da antena utilizada vai condicionar a sua utilização. No caso da inspeção de estruturas de betão armado, devido à distância entre armaduras ser

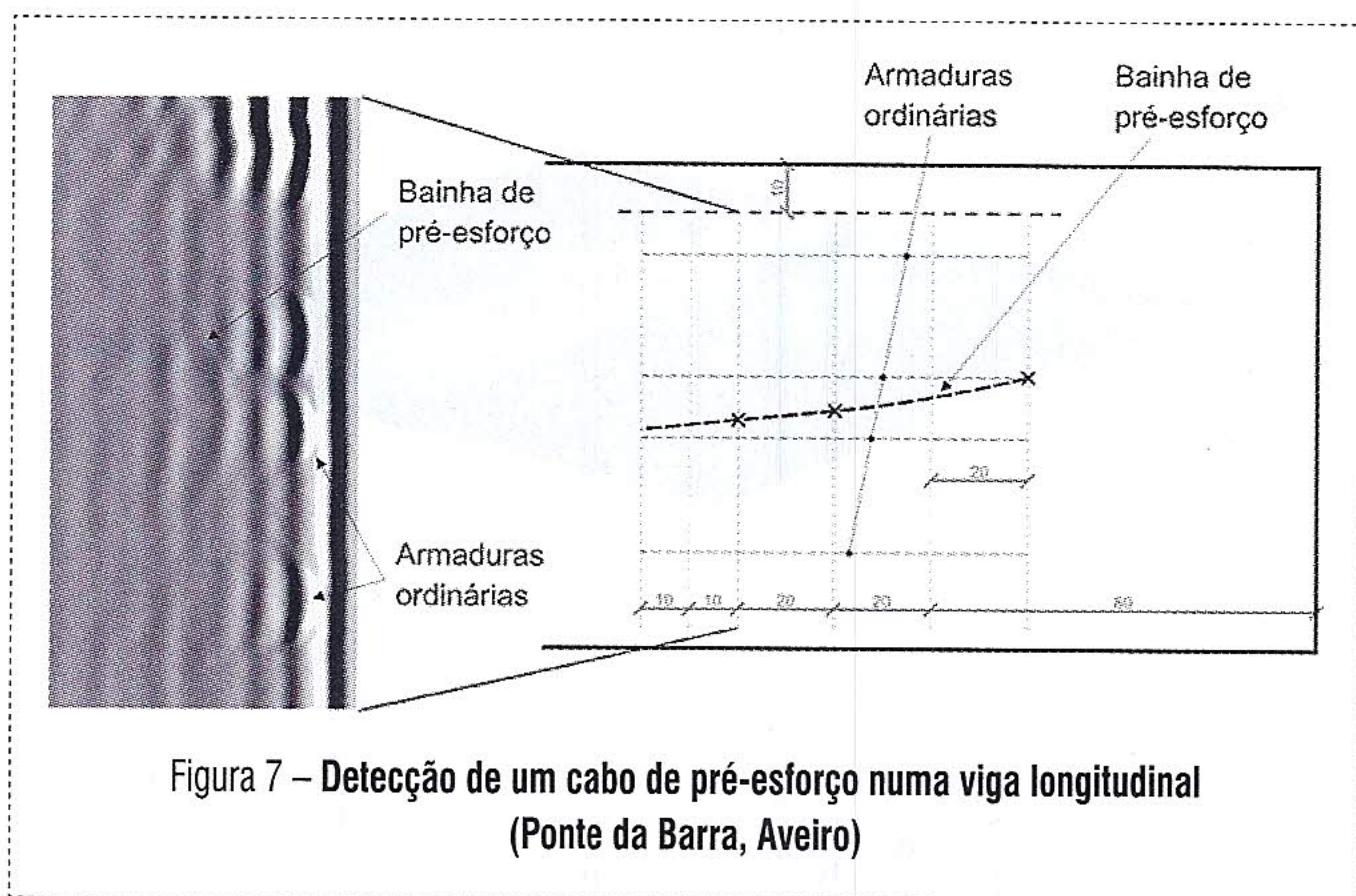


Figura 7 – Detecção de um cabo de pré-esforço numa viga longitudinal (Ponte da Barra, Aveiro)

→ geralmente inferior a 0.3 m, devem ser utilizadas antenas com frequência superior a 1 GHz, sob pena das armaduras se transformarem num espelho e impedirem a propagação das ondas. Na Figura 8 é apresentada uma situação na qual é visível a diferença de reflexão consoante o espaçamento entre varões utilizando uma antena de 1.6 GHz. Enquanto varões espaçados de mais de 0.1 m são detectados individualmente, espaçamentos inferiores resultam numa camada única que não permite a propagação posterior de ondas. Isto é particularmente importante quando se está a mapear zonas próximas das cabeças de ancoragem, tipicamente densamente armadas. Adicionalmente, é possível determinar a espessura do betão de recobrimento, que é um valor relevante para a durabilidade das estruturas.

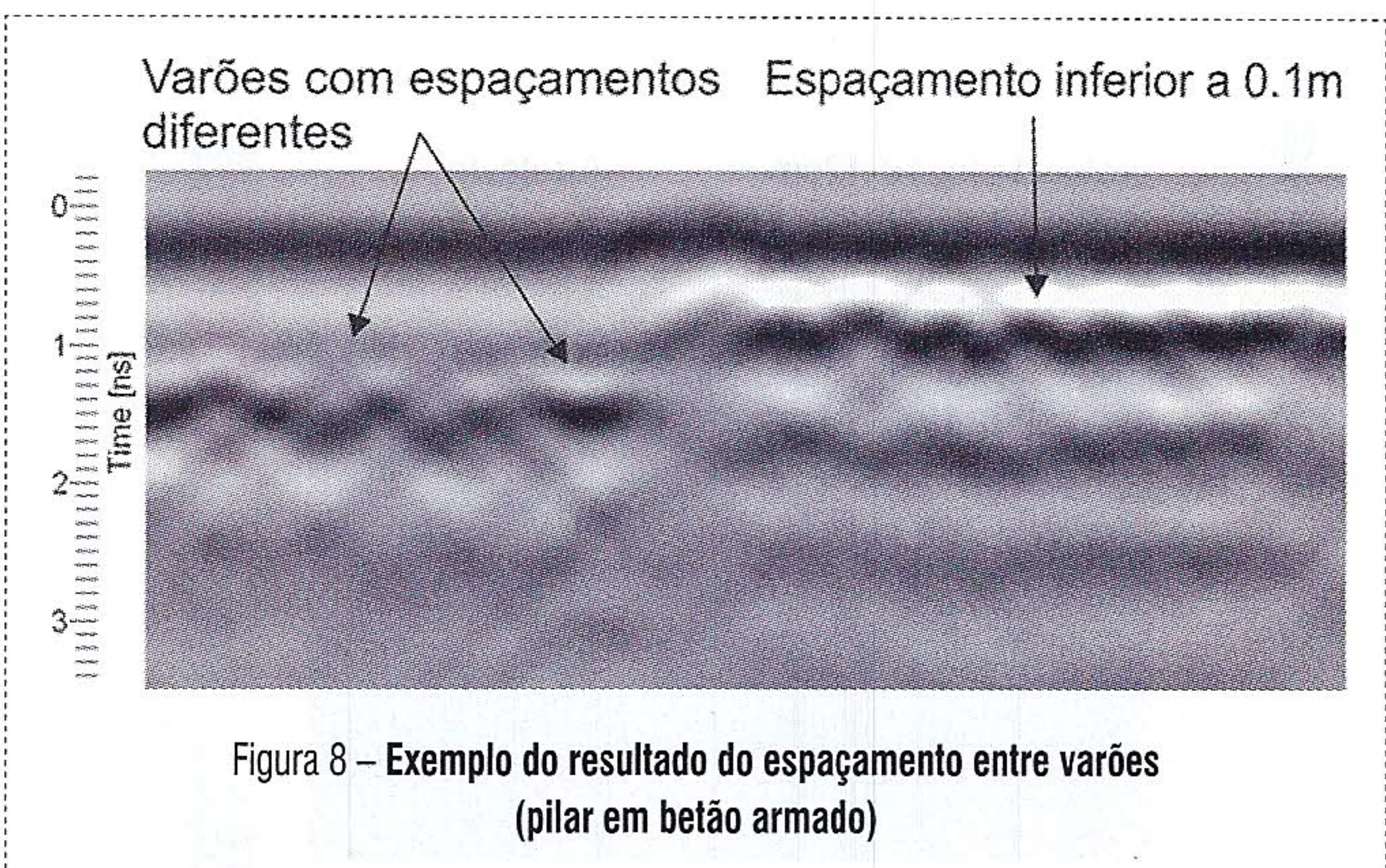


Figura 8 – Exemplo do resultado do espaçamento entre varões (pilar em betão armado)

Para uma detecção mais precisa da armadura e das bainhas sob a superfície, é possível executar uma elevada densidade de leituras paralelas, que conduzem a uma imagem tridimensional. A utilização desta técnica permite uma melhor visualização e interpretação dos resultados. Para ilustrar esta possibilidade, apresenta-se um exemplo correspondente a uma laje (simulada) de uma ponte onde estão colocados diversos objectos, nomeadamente três bainhas de pré-esforço, vazios, zonas de betão mal vibrado e armadura (Figura 9). É possível, assim, verificar os elementos no interior da laje a diferentes profundidades (Figura 10). Neste exemplo, uma dificuldade adicional prende-se com a orientação dos reflectores que devem ser detectados. Na Figura 10, um dos blocos com forma triangular não foi detectado em qualquer uma das três fatias apresentadas. A reflexão das ondas electromagnéticas segue regras similares às leis da óptica, pelo que, em situações onde os objectos a detectar não estão orientados de forma a que a onda reflectida não seja dirigida para a antena receptora, a sua presença não é detectada.



Figura 9 – Aspecto da laje simulada: (a) antes da betonagem e (b) após a betonagem

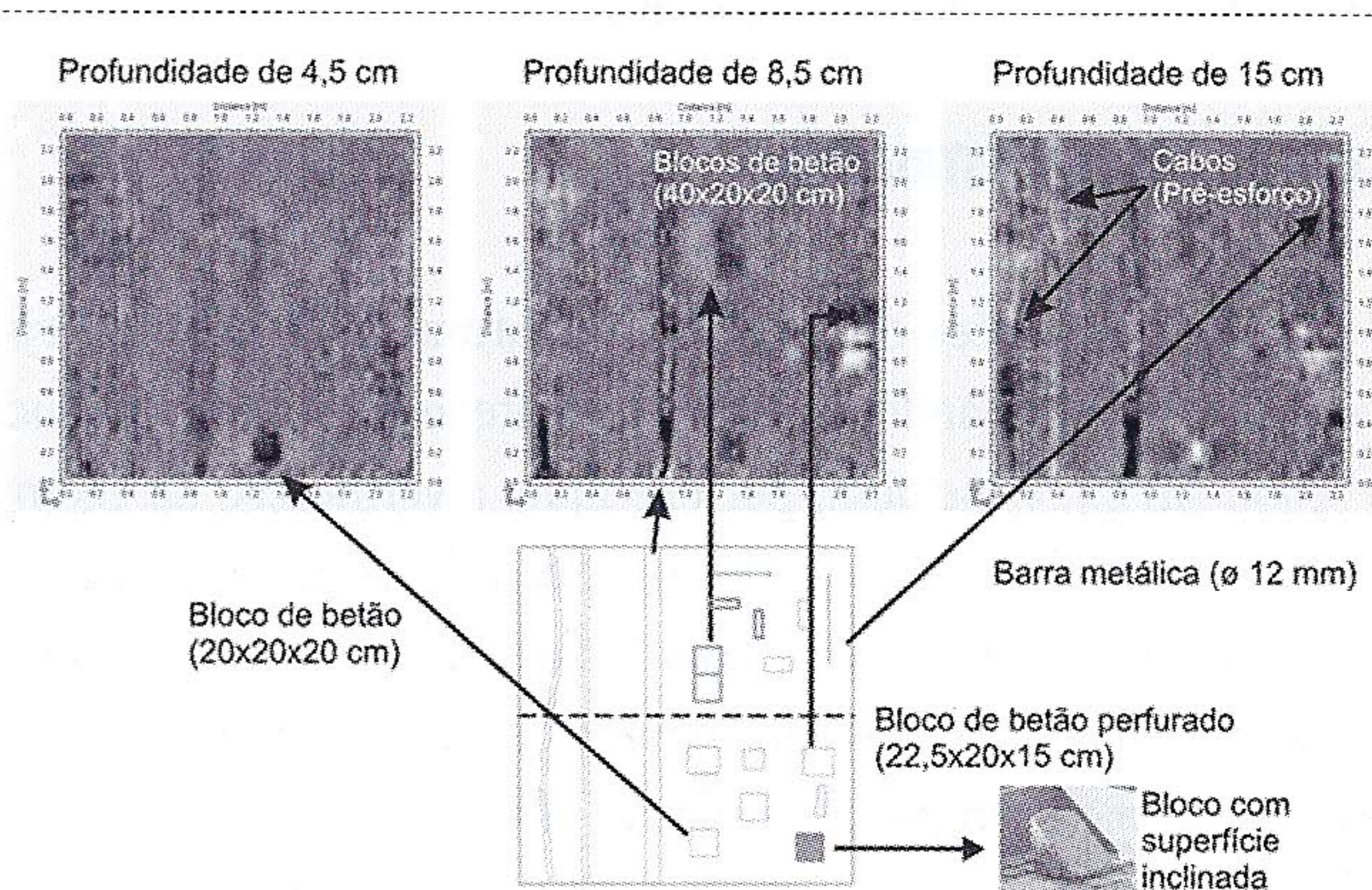


Figura 10 – Radargramas horizontais a várias profundidades onde se podem observar os diversos elementos no interior da laje

3.2. Detecção de elementos embebidos em estruturas de alvenaria

As estruturas de alvenaria são complexas, não unicamente devido à sua constituição pouco homogénea e variável, mas também porque é habitual adicionar elementos de outra natureza para melhorar o seu comportamento, como tirantes metálicos e vigas de madeira, por exemplo. A detecção desses elementos depende do contraste efectivo entre a constante dieléctrica dos dois materiais. Salienta-se que as características dieléctricas permitem geralmente a detecção sem dificuldade. A Figura 11 ilustra a detecção simples de uma viga de madeira embebida no enchimento de uma parede de alvenaria de pedra composta (Topczewski *et al.*, 2007) com uma antena de 1.6 GHz. É também possível observar que uma interface entre ma-

teriais bem definida, como a interface entre a alvenaria regular e o material de enchimento, resulta numa reflexão forte. Já a interface entre alvenaria irregular e o material de enchimento é praticamente imperceptível, pois só são detectadas algumas hipérboles isoladas, que se devem à irregularidade do material e à orientação da face interior das pedras. Por fim, as sucessivas perdas de energia sofridas ao longo do percurso pela parede fazem com que a superfície oposta (final da parede) não seja detectada. Uma inspecção mais complexa consiste numa tomografia em torno da localização da viga. O resultado, ilustrado na Figura 12, permite definir uma área aproximada da secção real.

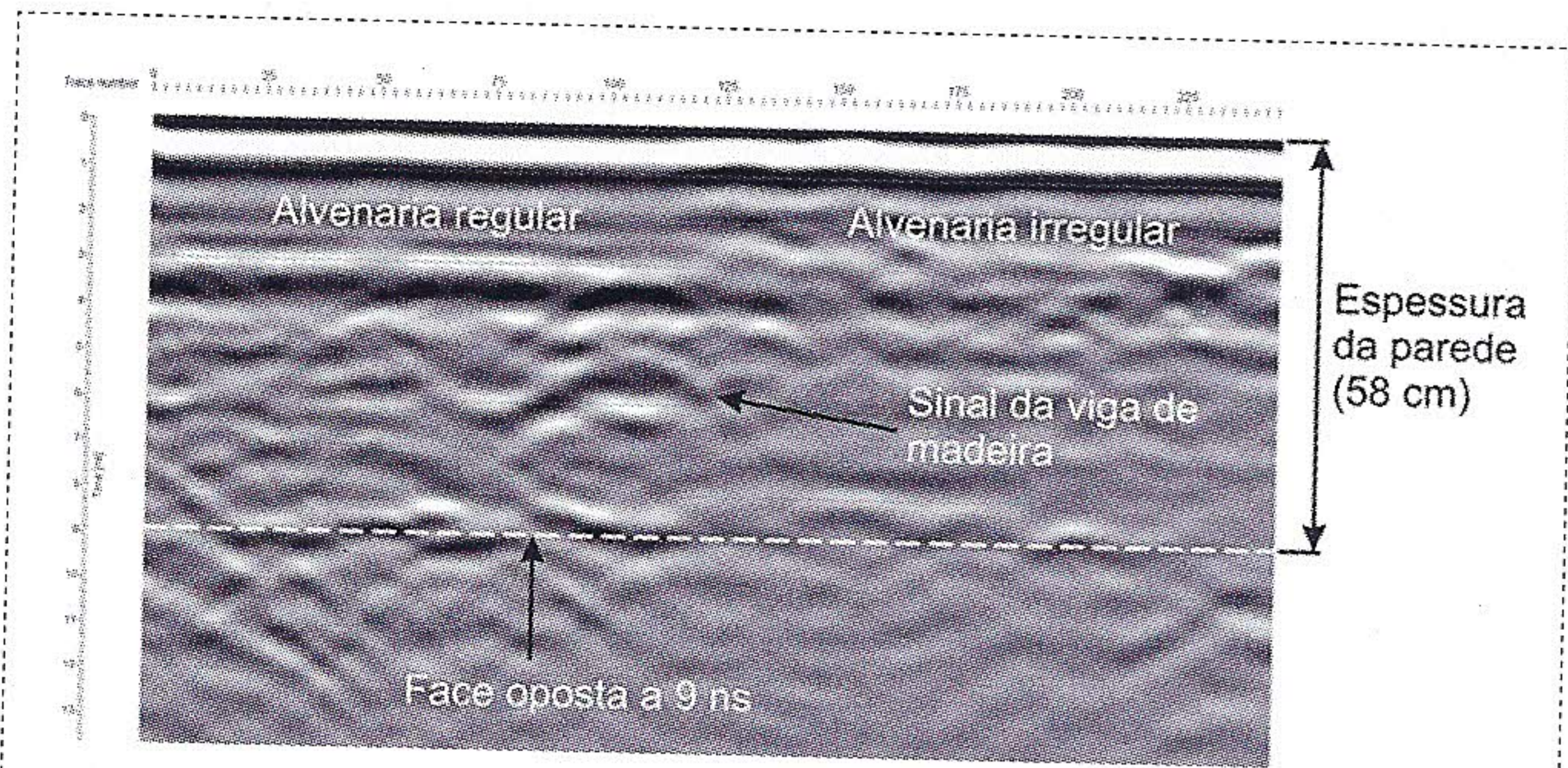


Figura 11 – Detecção de viga de madeira embebida numa parede de alvenaria de pedra

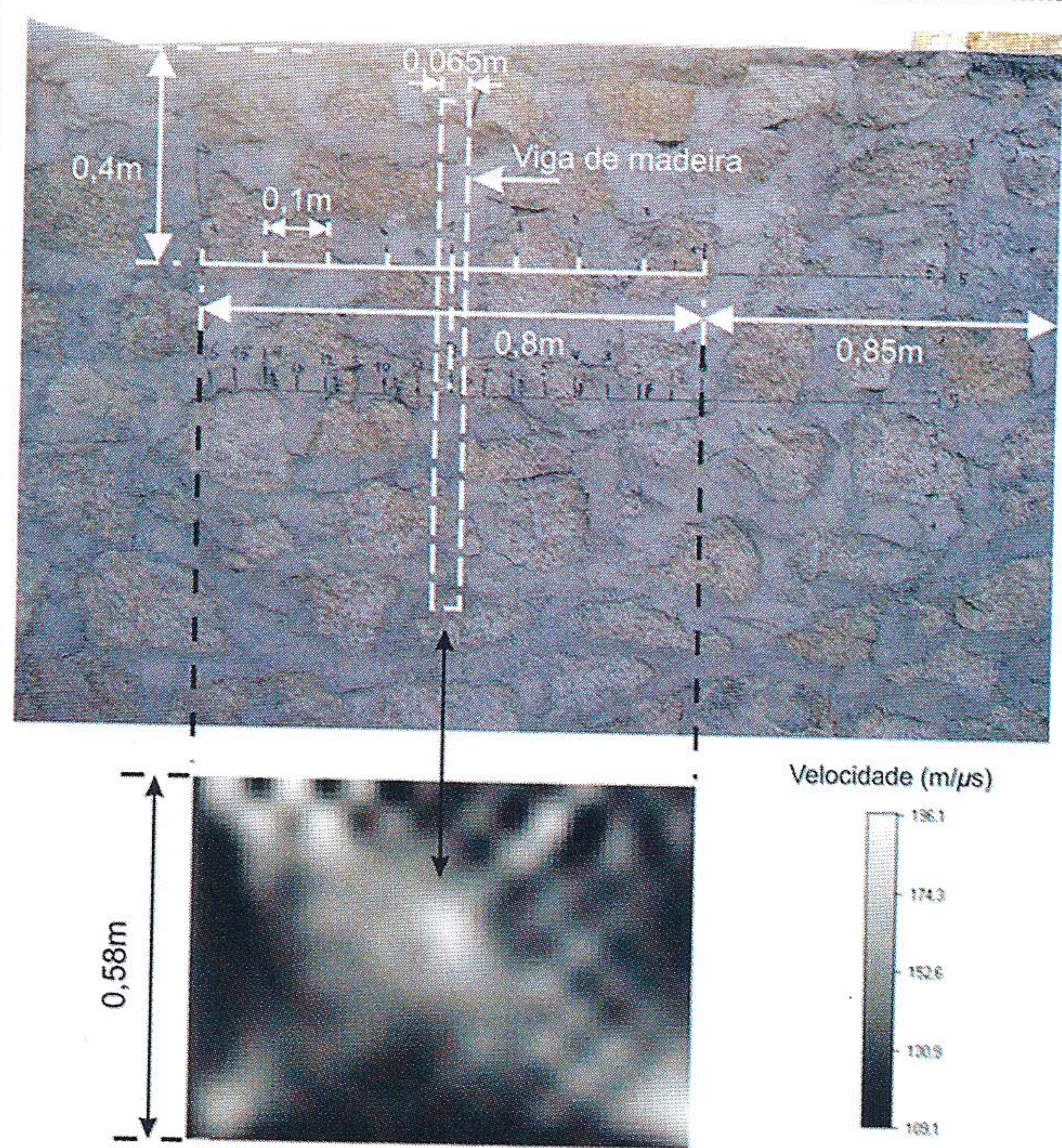


Figura 12 – Tomografia realizada para detectar uma viga de madeira embebida na parede

Nas construções antigas em alvenaria é ainda frequente encontrar peças metálicas (gatos ou cavilhas) que funcionam como ligadores entre pedras. O metal é geralmente bem detectado com o georadar e a localização destes elementos em estruturas de alvenaria é geralmente bem sucedida. A Figura 13 ilustra a detecção de ancoragens metálicas utilizadas para a suspensão de pinturas localizadas no intradorso da cúpula central do edifício do Altes Museum, em Berlim, Alemanha, enquanto que na Figura 14, a inspecção da fachada da Sé do Porto permitiu verificar a existência de conectores metá-

licos que suportam elementos decorativos e estruturais (Vasconcelos *et al.*, 2006). Nem sempre é possível detectar elementos comuns (metal) de maneira directa (hipérbole). Neste caso, pressupõe-se a existência dos elementos metálicos de maneira indirecta, isto é, identificando os padrões que esse elemento metálico causa no radargrama, como a perturbação no sinal de superfície.

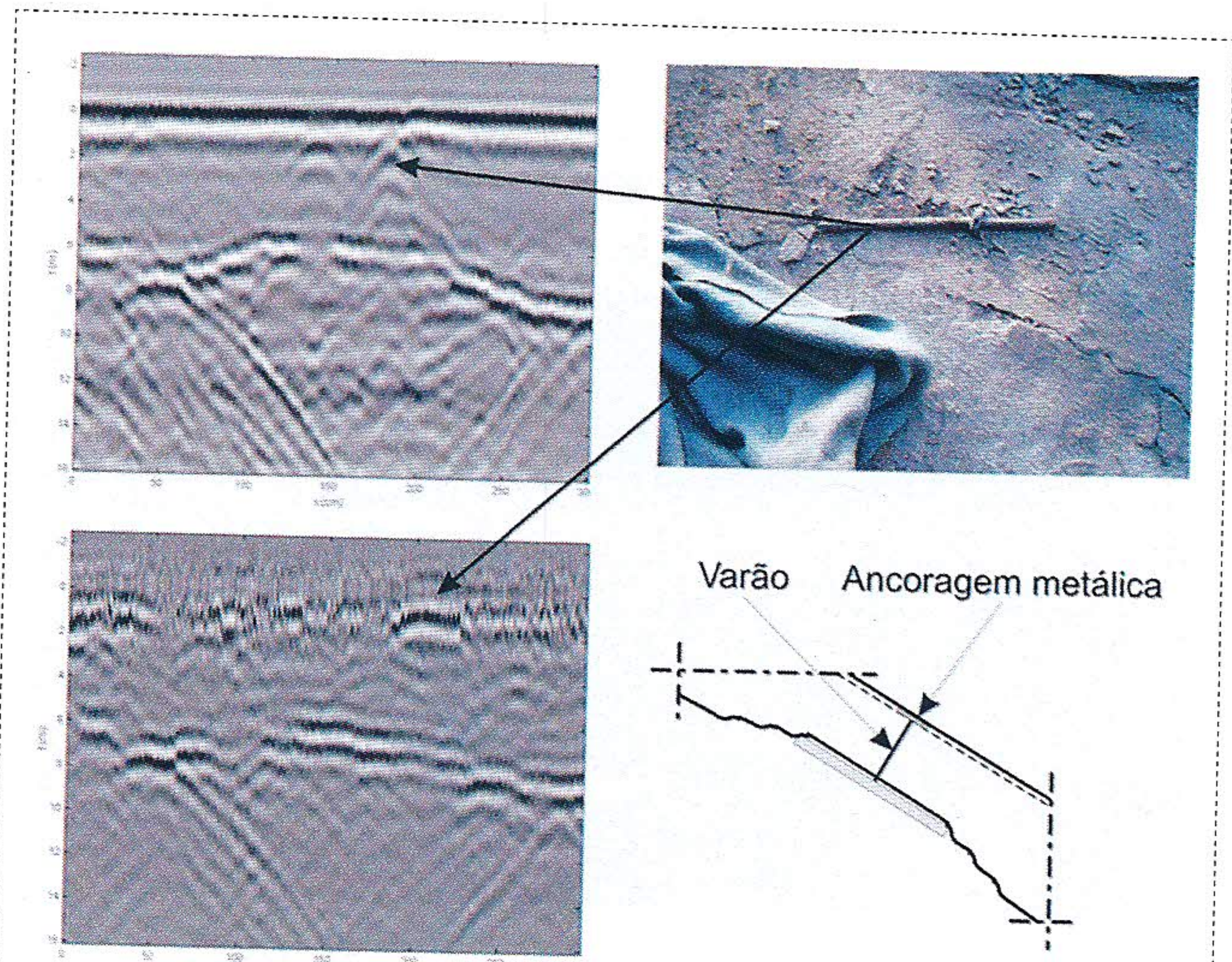


Figura 13 – Detecção de ancoragens para fixação de pinturas na cúpula do edifício do Altes Museum, Berlim, Alemanha

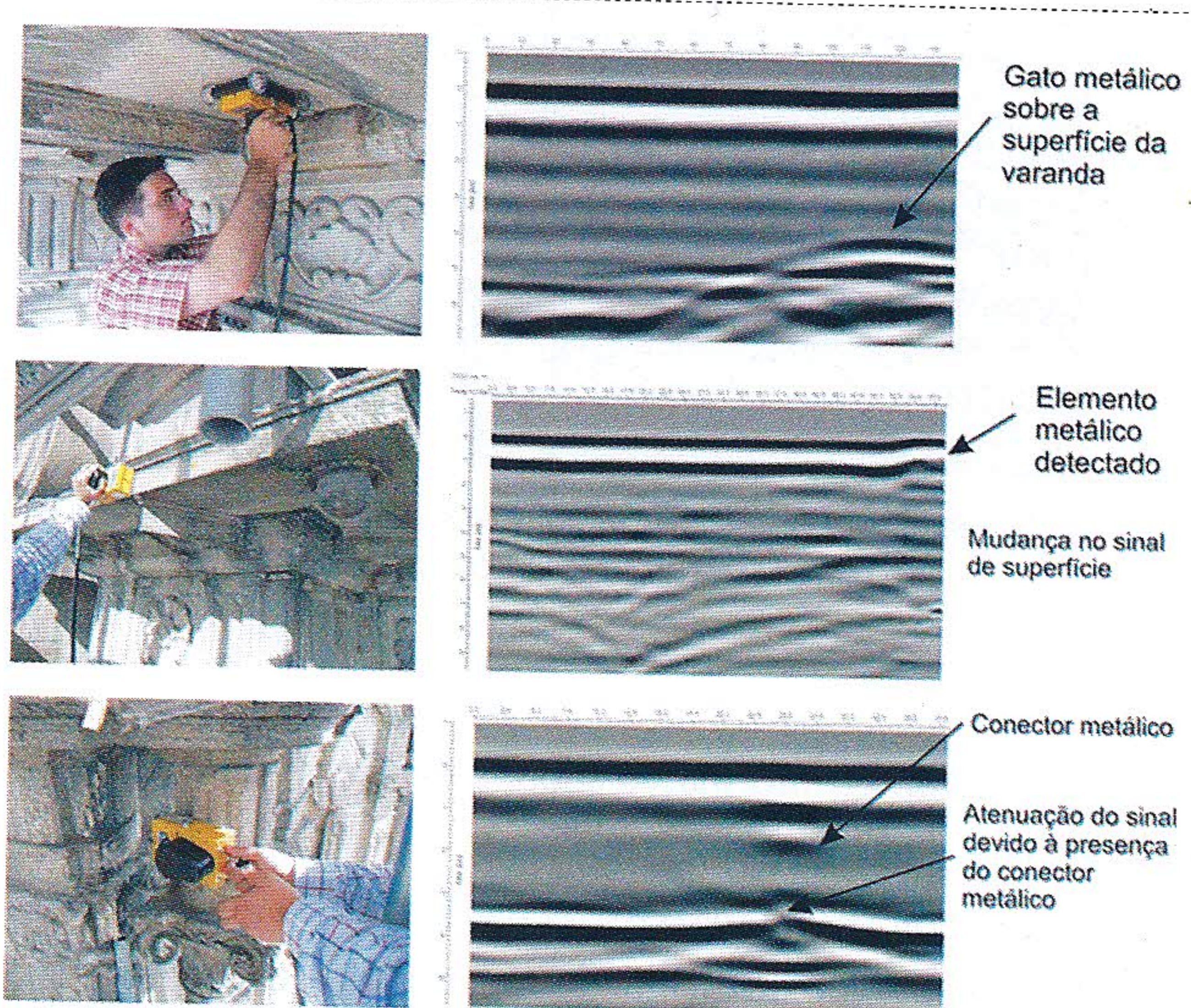


Figura 14 – Detecção de conectores metálicos na fachada da Sé Catedral do Porto

3.3. Detecção de espessuras

A detecção da espessura de elementos de alvenaria e a sua uniformidade é habitualmente importante para a verificação da estabilidade. O georadar é adequado para a detecção da espessura de elementos de alvenaria com vários panos, ainda que a heterogeneidade e a presença de humidade possa obrigar a extrair algumas carotes para aferir correctamente a velocidade de propagação da onda. Dois exemplos ilustram esta possibilidade na Figura 11 e na Figura 15. O primeiro caso apresenta a inspecção de uma parede de três panos em laboratório, onde o primeiro pano de alvenaria e a face oposta da parede são claramente detectados. No segundo caso, a inspecção de uma ponte em arco em Porto de Mós, revelou elevada concentração de humidade e permitiu a detecção da espessura do arco.



Figura 15 – Perfil longitudinal na Ponte Nova em Porto de Mós

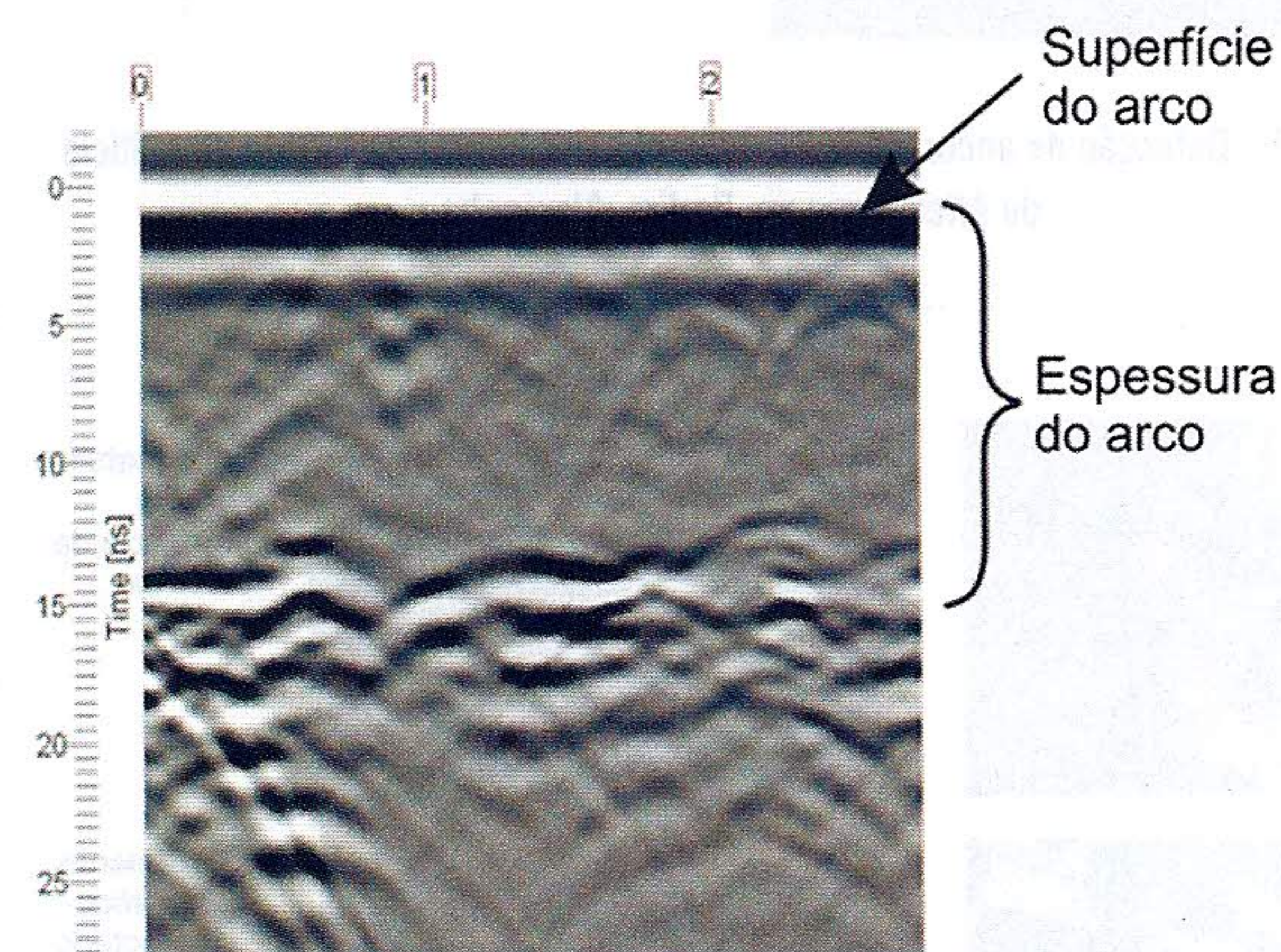


Figura 16 – Verificação da espessura da pedra do arco da Ponte Hintze Ribeiro, em Leiria. Ensaio realizado no intradorso do arco

4. CONCLUSÕES E NOTAS FINAIS

O radar de prospecção geotécnica é uma técnica de inspeção expedita e eficiente para aplicação em estruturas de betão armado, betão pré-esforçado e alvenaria. A sua utilização é expedita e o seu funcionamento baseia-se em princípios físicos bem definidos. As diversas frequências utilizáveis permitem obter resultados com elevada precisão em várias aplicações ou atingir grandes profundidades em aplicações onde a precisão não é relevante. Assim, a detecção de elementos tais como armadura e bainhas de pré-esforço e o conhecimento da geometria permite elaborar um projecto de reforço que considere o comportamento estrutural efectivo da construção e a sua real capacidade resistente. Adicionalmente, a inspeção permite a execução de medidas de reforço ou modificações em segurança, pois previne a ocorrência de dano nos elementos existentes durante a intervenção. Finalmente, a detecção atempada de defeitos de construção e anomalias permite perceber a ocorrência da deterioração e adoptar intervenções correctivas que limitem a progressão do dano.

A aquisição dos dados no terreno é de extrema importância para que, depois, em gabinete, se possam interpretar correctamente os dados registados. A escolha da frequência da antena, frequência de amostragem e janela temporal são importantes para a qualidade da informação recolhida. A interpretação dos sinais de georadar é uma tarefa complexa, pois os resultados exibem formas geométricas que, frequentemente, não coincidem com os objectos a detectar. Neste contexto, só a experiência do operador permite interpretar correctamente resultados complexos. Adicionalmente, o processamento de sinal e a utilização incorrecta de alguns filtros pode levar a interpretações erróneas. Finalmente, convém mencionar a importância de conhecer a estrutura sondada ou a tipologia de estruturas semelhantes para a interpretação dos resultados, uma vez que a interpretação dos resultados pressupõe saber que determinados elementos ou características estão presentes (ou poderão estar presentes) na zona sondada (existência de armaduras em peças de betão armado, juntas em estruturas de alvenaria, geometria particular, etc.).

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece o financiamento parcial deste trabalho pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, através da bolsa de investigação POCTI SFRH/BPD/26706/2005. Os autores agradecem ao Dr. Lukasz Topczewski o contributo na aquisição dos dados e na análise tomográfica. ■

→ A sondagem foi efectuada sobre o pavimento do tabuleiro, pelo que só foi possível obter informação sobre a espessura do arco na zona junto à chave do arco.

No entanto, sempre que for possível aceder à parte inferior do arco, a informação obtida é de qualidade superior, como se pode constatar no exemplo ilustrado na Figura 16. Nesta foi utilizada a antena de 500 MHz para realizar o ensaio por baixo do arco, pelo que a sua espessura ficou claramente definida em toda a leitura realizada.

Referências

- Cruz, P.J.S., Topczewski, L., Fernandes, F.M. e Lourenço, P.B. (2006). "Utilização do radar de prospecção geotécnica na localização das bainhas de pré-esforço nas pontes da Barra e de Lanheses." Em 4.ª Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas (JPEE), LNEC, Lisboa, 385-394.
- Daniels, D.J. (2004). "Ground Penetrating Radar – 2nd Edition". Radar, sonar, navigation and avionics series 15, IEE, London, UK, 726p.
- Dérobot, X., Aubagnac, C. and Abraham, O. (2002). "Comparison of NDT techniques on a post-tensioned beam before its autopsy", *NDT&E International*, 35(8), 541-548.
- Fernandes, F., Lourenço, P.B., Zanzi, L. (2006). "Avaliação da constituição de elementos estruturais através do radar de prospecção geotécnica". *Engenharia e Vida*, 28, 38-44.
- Fernandes, F.M. (2006) "Evaluation of two novel NDT techniques: microdrilling of clay bricks and ground penetrating radar in masonry". Tese de Doutoramento, Universidade do Minho. Disponível em: www.civil.uminho.pt/masonry.
- Giannopoulos, A., Macintyre, P., Rodgers, S. and Forde, M.C. (2002). "GPR detection of voids in post-tensioned concrete bridge beams". *Proc., Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, Santa Barbara, CA, USA*, 376-381.
- Grangeia, C., Matias, M.S. (2004). "Técnicas de georadar em prospecção arqueológica: Ançã e S. Martinho de Árvore". *Revista Portuguesa de Arqueologia*, 7(2), 427-434.
- Hall, I.D., McNab, A., Hayward, G. (1999). "Improved ultrasonic image generation through tomographic image fusion". *Ultrasonics*, 37, 433-443.
- Reynolds, J.M. (1997). "An introduction to applied and environmental geophysics". John Wiley & Sons, Chichester, 806p.
- Topczewski, L., Fernandes, F.M., Cruz, P.J.S., Lourenço, P.B. (2007). "Practical implications of GPR investigation using 3D data reconstruction and transmission tomography". *Journal of Building Appraisal*, 3(1), 59-76.
- Valle, S., Zanzi, L., Rocca, F. (1999). "Radar tomography for NDT: comparison of techniques". *Journal of Applied Geophysics*, 41, 259-269.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Fernandes, F. (2006). "Avaliação da estabilidade dos elementos salientes da fachada da Sé do Porto". *Relatório 06-DEC/E-12*, Universidade do Minho, Guimarães, 22p.