

Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional
17 a 19 de Dezembro, Coimbra, Portugal
Universidade de Coimbra

Aplicações do georadar na reabilitação e detecção de anomalias

Francisco M. Fernandes e Paulo B. Lourenço

Investigador Pós Doutoramento, Professor Catedrático
Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães
e-mail: fmcpf@civil.uminho.pt, pbl@civil.uminho.pt

Resumo

O georadar é uma técnica de inspecção não destrutiva baseada na emissão de ondas electromagnéticas, através do solo e em materiais de construção, e na recepção das reflexões originadas por objectos e camadas de materiais distintos. A gama de aplicações é muito vasta, sendo utilizada na inspecção de materiais diversos. Várias antenas permitem a sua aplicação na resolução de problemas de natureza muito diversificada, desde aplicações estruturais a geotécnicas, sendo esta última a aplicação que lhe deu o nome. A utilização do georadar na engenharia estrutural é relativamente recente. Em Portugal, o georadar tem sido aplicado muito recentemente na resolução de problemas estruturais e na prospecção de infra-estruturas enterradas.

Neste artigo, descrevem-se algumas dessas aplicações, com o objectivo de demonstrar as capacidades desta metodologia, as suas vantagens e limitações e a importância dos resultados obtidos. Os resultados demonstram que o georadar é adequado na detecção de armadura e barras de pré-esforço a profundidades elevadas (> 5 cm), na detecção de cabos eléctricos, na determinação da geometria em estruturas de alvenaria e na detecção de humidade.

Palavras-chave: georadar, inspecção não destrutiva, anomalias, detecção de armaduras, avaliação da geometria.

1 Introdução

O panorama da construção a nível europeu, inclusive em Portugal, tem estado a passar por diversas dificuldades. A saturação da construção de parques habitacionais, a falta de investimento público e a existência de numerosos edifícios e estruturas em diversos estados de deterioração que urgia reparar (devido a questões de sustentabilidade da construção, ambientais, etc.) levou a que muitas empresas começassem a investir fortemente na reabilitação de estruturas já existentes. Por toda a Europa, este negócio já representa uma larga fatia da construção (> 50 %), enquanto que, em Portugal, ainda representa um valor muito baixo (5-10 %). Adicionalmente, Portugal tem demonstrado que os responsáveis não se encontram devidamente preparados e que os métodos construtivos, materiais de construção e metodologias de estudos prévios utilizados são muitas vezes inadequados para tal tarefa. Em particular, é muitas vezes efectuado um diagnóstico insuficiente do estado de conservação e da resistência da estrutura. 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 de forma remota características e objectos escondidos por trás de superfícies opacas é algo fascinante e é 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, o seu estudo, a evolução tecnológica e o desenvolvimento de ferramentas informáticas para um melhor tratamento dos sinais são constantes. Em Portugal, trata-se duma técnica que tem dado os seus primeiros passos na inspecção de pontes [5], monumentos históricos [6] e prospecção arqueológica. No entanto, as possibilidades da sua utilização são bastante mais abrangentes, existindo ainda um amplo desconhecimento desta técnica por parte dos profissionais. O georadar é intensivamente utilizado na detecção de vários tipos de elementos metálicos (estruturais e não estruturais) e não metálicos enterrados ou embebidos em estruturas de betão armado e alvenaria. Representa igualmente uma técnica muito poderosa para a prospecção geofísica e arqueológica. De seguida estão apresentados e explicados várias aplicações derivadas da experiência dos autores na utilização desta técnica não destrutiva.

2 Descrição do georadar

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 que as antenas emitem a radiação electromagnética, registam as reflexões e a transformam em informação digital, consequentemente armazenada em dispositivo próprio para posterior processamento.

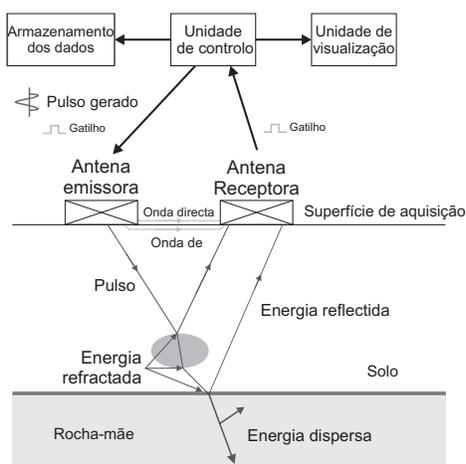


Figura 1 – Componentes e modo de operação de sistema de georadar moderno.

As antenas, provavelmente o elemento mais importante de um sistema de georadar, são caracterizadas pela sua frequência central f , situada, tipicamente, num intervalo de frequências bastante largo, de 10 a 2000 MHz. A selecção da frequência da antena depende do tipo de aplicação, profundidade e dimensões dos alvos potenciais e do tipo de ambiente do local. Para dar uma ideia das frequências e das suas possibilidades de utilização, a Tabela 1 ilustra diversas aplicações, resoluções esperadas e profundidades de penetração típicas de antenas, em condições adequadas de propagação.

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	
1000 MHz	0.5 a 1.5 m	Alta	Engenharia
>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 “contentor” 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 por tempo de viagem de ida e volta, i.e. “*Two-Way Travel-Time*”, sendo expresso em nanossegundos (ns). Nas diferentes posições 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 mais detalhada sobre sistemas georadar e o seu funcionamento pode ser obtida em [3] e [1].

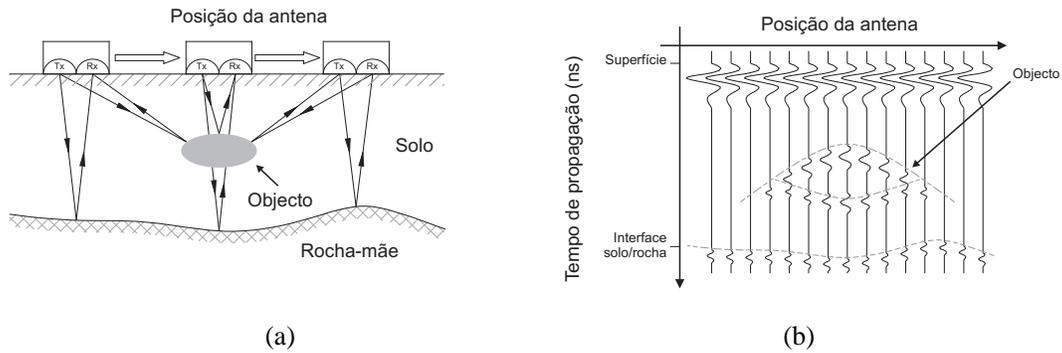


Figura 2 – Aquisição de dados no terreno em modo de reflexão. (a) Metodologia de aquisição e (b) radargrama resultante.

Um segundo modo de operação é por transmissão directa, em que o emissor e o receptor são localizados em posições diferentes, de forma a cobrir completamente a área a investigar com feixes electromagnéticos (tomografia). 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”. A reconstrução da imagem interna do corpo a investigar é um problema inverso para o qual existem diferentes algoritmos de solução [2, 7]. 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 [4].

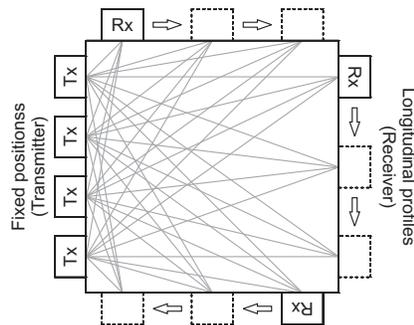


Figura 3 – Aquisição de dados no terreno em modo de transmissão directa (tomografia).

3 Aplicações

3.1 Detecção de armadura e bainhas de pré-esforço

Determinar a localização de elementos metálicos com funções estruturais, tais como varões de armadura ordinária e cabos/bainhas de pré-esforço, é extremamente importante em intervenções de reforço e na alteração de uso e remodelação de diversos tipos de estruturas (pontes, edifícios comerciais e pavilhões industriais, etc.), pois o seu desconhecimento pode levar a problemas de estabilidade e de quantidades erróneas de reforço. Esta informação permite avaliar se esses elementos estruturais se encontram conforme o plano de construção (o que muitas vezes não é o caso) e

determinar a capacidade real da estrutura, permite detectar a sua localização em casos onde esta é desconhecida e permite programar perfurações sem afectar os elementos existentes.

A detecção de elementos metálicos é efectuada de maneira muito eficiente, devido às características particulares deste sistema. As ondas emitidas pelo georadar são totalmente reflectidas por elementos metálicos, o que o torna particularmente adequado para a sua detecção. A possibilidade de detectar elementos a uma profundidade elevada faz com que seja mais vantajoso relativamente a outros equipamentos que detectam armadura (superficial). No entanto, todos os elementos que se encontram por baixo desses elementos metálicos não serão facilmente detectáveis, visto grande parte da energia ser reflectida pelo metal. No entanto, o georadar não possui resolução suficiente para determinar o diâmetro dos varões ou tubos detectados.

Para ilustrar as possibilidades deste equipamento, três exemplos de aplicação serão descritos. No primeiro caso está em causa o reforço de pilares de betão armado num pavilhão industrial de componentes electrónicos. Esse reforço seria efectuada através da cravação de barras metálicas a cerca de 0.5 m da laje de tecto. Portanto, era imprescindível determinar a localização dos varões de maneira a programar a localização do reforço sem os danificar. Adicionalmente, de maneira a evitar parar a produção, o que originaria levadas perdas para a empresa, e na impossibilidade de gerar resíduos, que poderiam danificar as máquinas de produção, o georadar destacou-se como o método a ser utilizado para obter a informação pretendida. A Figura 4 ilustra duas colunas onde foram efectuados os ensaios. O acesso foi efectuada por plataforma móvel, sem paragem da laboração e sem gerar quaisquer resíduos (pois não foram executados quaisquer furos ou roços).



Figura 4 – Exemplos dos locais onde foram efectuados os ensaios nos pilares.

Um exemplo dos resultados obtidos com este método está ilustrado na Figura 5, onde se pode comprovar que o posicionamento efectuada em construção nem sempre se encontra conforme o determinado em projecto, havendo sempre lugar a desvios, que podem afectar a execução do reforço.

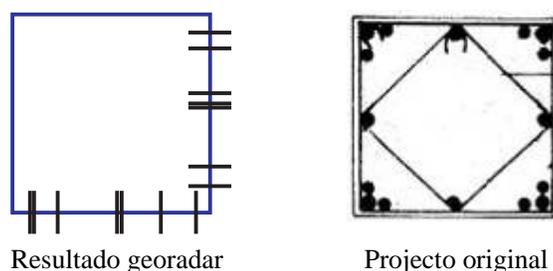


Figura 5 – Resultado da aplicação do georadar para a determinação da armadura num pilar, e comparado com o estabelecido em projecto.

No segundo exemplo, o georadar foi utilizado com sucesso na determinação da armadura em pilares do edifício do Arquivo Distrital de Braga. Nesta situação, a vantagem da detecção em profundidade desta técnica ficou evidenciada ao detectar os varões da armadura longitudinal situados a cerca de 0.15 m da superfície. Com esta espessura de recobrimento, a utilização de outros equipamentos de detecção de metais é difícil, pois estes estão indicados para a detecção de metal superficial (até 5 cm). Um exemplo da aplicação do georadar (antena de 1600 MHz) e do aspecto dos resultados estão ilustrados na Figura 6.

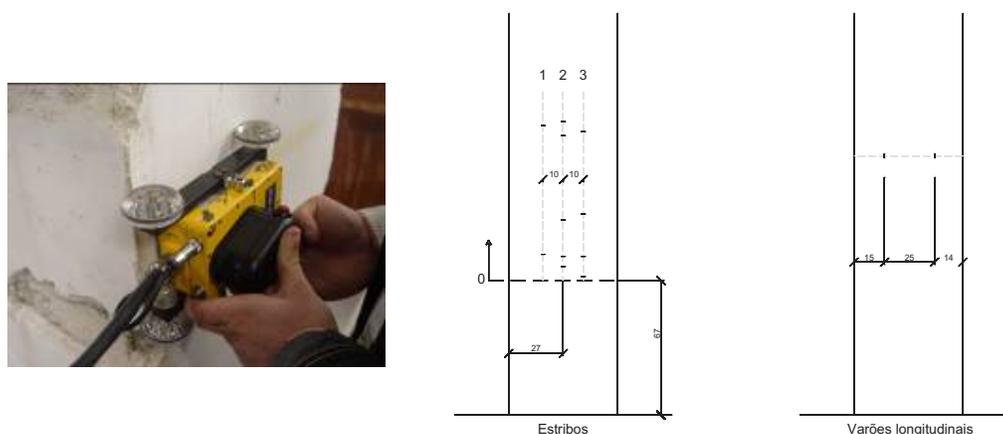


Figura 6 – Resultado da aplicação do georadar para a determinação da armadura num pilar com elevada espessura de recobrimento (0.15 m).

Como última aplicação, apresenta-se a utilização do georadar para detectar elementos estruturais com o intuito de, posteriormente, efectuar furos sem os danificar. Neste caso, o local dos ensaios foi o tabuleiro dum viaduto em Tavira (ver Figura 7). O objectivo era transferir para outra posição uma tubagem de águas que se encontrava sob uma das bermas da ponte. Para colocar o tubo na nova posição, era necessário proceder à cravação de barras metálicas através do tabuleiro em vários pontos preestabelecidos.



Figura 7 – Ponte ensaiada localizada em Tavira e vista da berma onde foram efectuados os ensaios.

Um exemplo do tubo a transferir está ilustrado na Figura 8a. A inspecção com georadar foi efectuada numa pequena área em torno da localização provável de cada furo, ilustrado na Figura 8b. Deste modo, cerca de 60 poços com cerca de $0.5 \times 0.75 \times 0.1$ m foram abertos e uma antena de alta-frequência (1600 MHz) foi utilizada para determinar da presença, ou não, de barras de alta-resistência que era imprescindível não danificar. Devido a restrições no manuseamento da antena e de maneira a cobrir o máximo comprimento possível, foram efectuadas duas medições nas duas direcções. Tal permitiu

aferir, com elevada precisão, a localização desses elementos. A Figura 9 exemplifica os resultados obtidos com o georadar, onde as duas barras foram detectadas através de duas hipérbolas de difracção de forte intensidade e cujos picos estão separados por 0.5 m, o que estava conforme alguns desenhos da estrutura disponíveis.

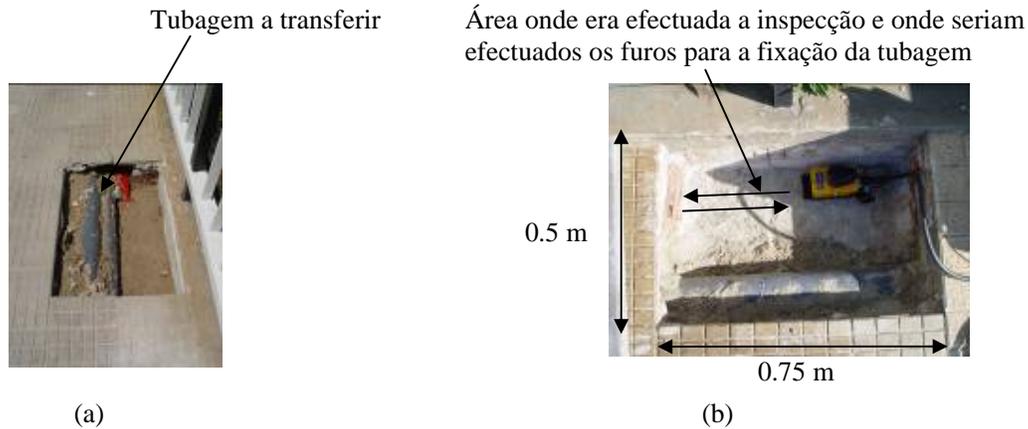


Figura 8 – Exemplos da (a) tubagem que será transferida e (b) aspecto e dimensões da área inspecionada.

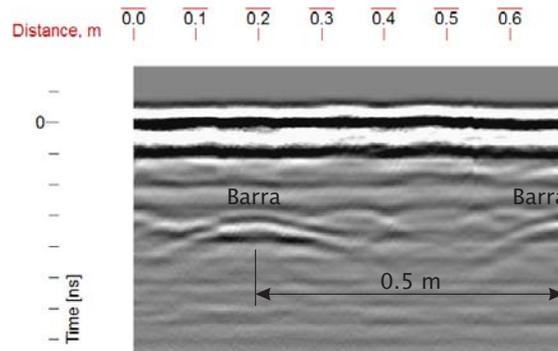


Figura 9 – Exemplo do resultado dum leitura com georadar, onde se observa a detecção de duas das barras separadas de 0.5 m.

3.2 Geometria de elementos em alvenaria

A detecção da espessura de elementos de alvenaria e a sua uniformidade é habitualmente importante para a verificação da sua estabilidade, especialmente em estruturas antigas. 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 possam obrigar a extrair algumas carotes para aferir correctamente a velocidade de propagação da onda. Para ilustrar as capacidades do georadar neste âmbito, apresenta-se a inspecção de uma parede de três panos, construída em ambiente laboratorial, cujas características estão ilustradas na Figura 10. Um dos painéis é constituído por dois tipos de alvenaria: um dos painéis com blocos regulares de junta seca e um painel com blocos irregulares. On interior é preenchido por gravilha e possuiu uma viga de madeira embebida, cujas dimensões estão apresentadas na Figura 10.

Nestes ensaios foi igualmente construída uma segunda parede, com características diferentes em termos de dimensões e material de enchimento, mas cujos resultados estão apresentados em [9]. No radargrama ilustrado na Figura 11, a face de inspeção e a face oposta da parede são claramente detectadas. Na parte esquerda, é ainda possível observar que o painel de alvenaria regular é detectado por um sinal horizontal a cerca de 3 ns de profundidade, que termina a meio do perfil (da parede), onde começa a alvenaria com pedras irregulares. Neste caso, devido à inclinação das faces das pedras, o sinal não é reflectido em direcção à antena receptora, e grande parte da energia é perdida. Por essa razão é que, na parte direita do radargrama, o sinal dessa interface é praticamente imperceptível. Adicionalmente, a viga de madeira que se encontra embebida na parte central da parede é detectada sem dificuldade, devido ao contraste de propriedades entre o material de enchimento e a madeira.

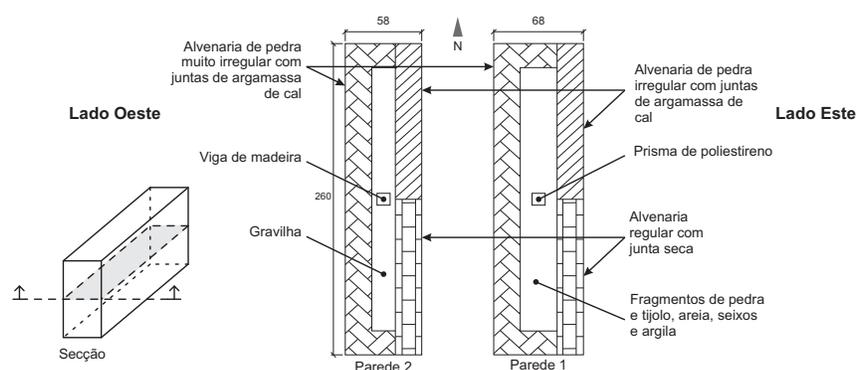


Figura 10 – Esquema das paredes de alvenaria. Neste artigo, são mostrados os resultados oriundos da parede n.º1.

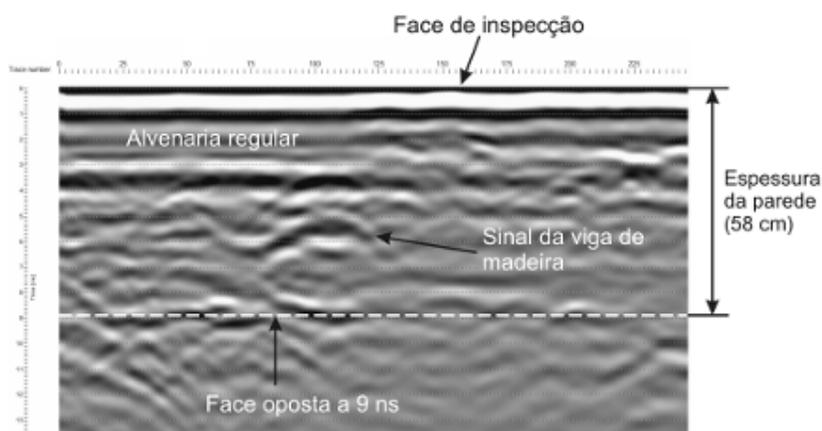


Figura 11 – Detecção de viga de madeira embebida numa parede de alvenaria de pedra.

3.3 Cabos eléctricos

A gestão das infra-estruturas de uma cidade moderna é uma tarefa de muita responsabilidade e de variada natureza, que inclui: a instalação, conservação e reparação de cabos eléctricos, cabos de telecomunicações, tubos de saneamento, distribuição de água, gás, etc. Para proceder a uma intervenção, é necessário conhecer inteiramente o local, no sentido de poder programar com exactidão onde escavar e o percurso mais adequado, e evitar danificar as infra-estruturas já existentes. No

entanto, são infelizmente comuns situações em que o cadastro destas infra-estruturas é incompleto, incorrecto ou inexistente. Assim, é geralmente aconselhável efectuar uma prospecção prévia do local, de maneira a aumentar o seu conhecimento.

O georadar possui características próprias adequadas para esta tarefa, que permitem mapear infra-estruturas enterradas, detectando com relativa facilidade tubos e cabos de plástico ou metálicos. Como exemplo, a detecção de cabos eléctricos é ilustrado na Figura 12e no radargrama da Figura 13. Neste caso, os cabos eléctricos em questão não se encontravam cadastrados. Pelo que, aquando de obras de alargamento na via, a presença dum poste de iluminação em frente a uma caixa de distribuição levantou suspeitas de que aí poderia encontrar-se um cabo de alimentação eléctrica (para o poste de iluminação). Assim, antes de continuar com a escavação, foi efectuada uma prospecção no local, que resultou na detecção de dois elementos enterrados, que se supôs serem de cabos eléctricos.



Figura 12 – Esquema dos ensaio de georadar para localizar o cabo eléctrico não cadastrado entre a caixa eléctrica e o poste de iluminação.

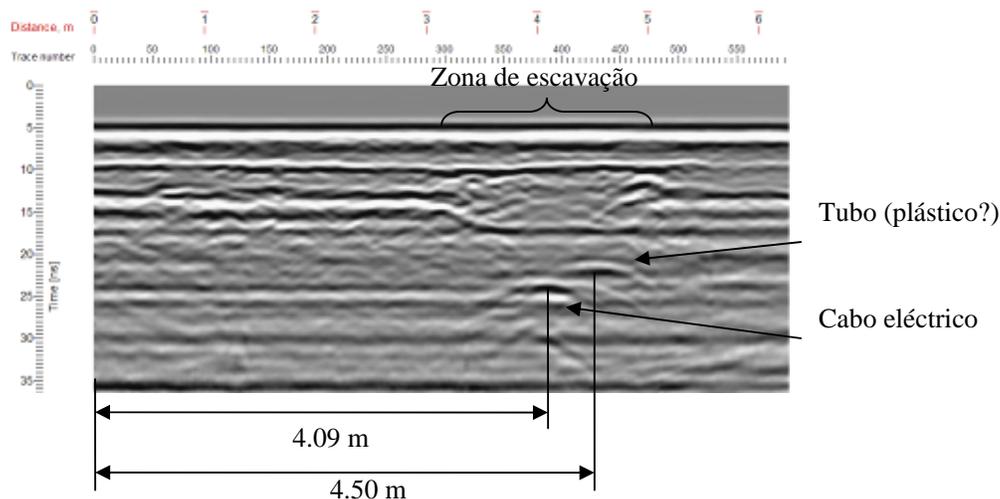


Figura 13 – Radargrama exibindo os cabos eléctricos em frente à caixa situada na berma.

3.4 Humidade

Por fim, o georadar permite igualmente avaliar estruturas relativamente à presença de água. Não sendo este parâmetro determinado de maneira rigorosa, o georadar consegue, no entanto, indicar onde é provável que ocorra a presença de humidade, ou determinar uma diferença entre materiais relativamente ao seu teor em água. Efectivamente, o georadar permite distinguir um material seco de um saturado de humidade de duas maneiras: (i) através da diminuição da velocidade de propagação da onda emitida; (ii) e através da atenuação da amplitude do sinal.

Relativamente ao primeiro caso, a metodologia requer que se conheça a espessura do elemento a ser medido. Pode citar-se, por exemplo, o trabalho de Forde [8], em que a humidade ascendente em paredes de alvenaria é detectada através do aumento do tempo de leitura (relativamente à parede seca). A Figura 14 ilustra esse resultado. No segundo caso, a humidade é detectada ao observar uma diminuição brusca da amplitude do sinal, relativamente às áreas adjacentes no radargrama. Para ilustrar esse facto, apresenta-se a Figura 15.

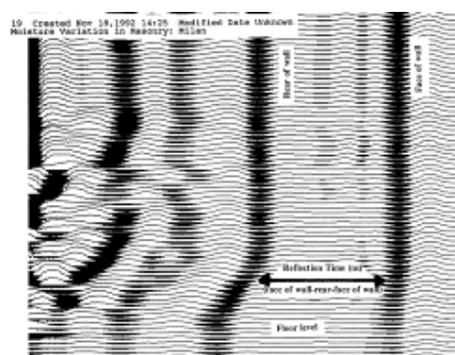


Figura 14 – Radargrama mostrando que a parte inferior da parede está saturada de humidade.

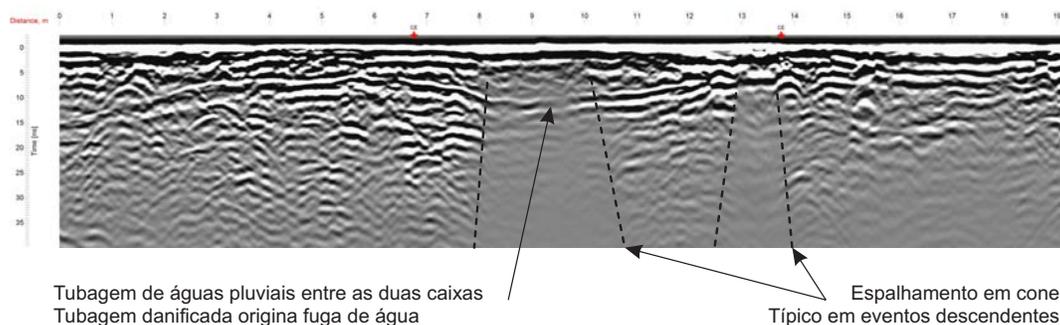


Figura 15 – Radargrama mostrando a presença de humidade em algumas áreas do subsolo.

4 Conclusões

O georadar é uma técnica não destrutiva que possuiu uma vasta gama de aplicações em engenharia, geofísica e arqueologia. No entanto, apesar de ser uma técnica muito utilizada no estrangeiro, ainda se encontra pouco divulgada em Portugal. Os exemplos apresentados expõem, sucintamente, as capacidades que esta metodologia possui, e que incluiu: detecção de varões de armadura ordinária a profundidades elevadas, bainhas de pré-esforço e barras pré-esforçadas, localização de cabos

eléctricos, determinação da espessura de elementos em alvenaria, detecção de elementos de madeira embebidos em alvenaria e a presença de humidade em estruturas e em solos.

Relativamente à inspecção em estruturas de betão armado e alvenaria, a informação que pode ser obtida é muito relevante para os intervenientes, pois permite actuar nas várias fases da construção e reabilitação, nomeadamente, projecto, construção, fiscalização e manutenção.

Em obras de escavação, o georadar permite verificar a existência de infra-estruturas no subsolo, o que permite minimizar a ocorrência de danos em tubagens, ou a ruptura de cabos.

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.

Referências

- [1] Daniels, D.J. Ground Penetrating Radar – 2nd Edition. *Radar, sonar, navigation and avionics series 15*, IEE, London, 2004, 726p.
- [2] Hall, I.D.; McNab, A.; Hayward, G. Improved ultrasonic image generation through tomographic image fusion. *Ultrasonics*, Vol. 37(6), 1999, pp. 433-443.
- [3] Reynolds, J.M. *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons, Chichester, 1997, 806p.
- [4] Topczewski, L.; Fernandes, F.M.; Cruz, P.J.S.; Lourenço, P.B. Practical implications of GPR investigation using 3D data reconstruction and transmission tomography. *Journal of Building Appraisal*, Vol. 3(1), 2007, pp. 59-76.
- [5] Cruz, P.J.S.; Topczewski, L.; Fernandes, F.M.; Lourenço, P.B. Utilização do radar de prospecção geotécnica na localização das bainhas de pré-esforço nas pontes da Barra e de Lanheses. 4^{as} *Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas (JPÉE)*, Lisboa, 13-16 de Dezembro de 2006, pp. 385-394.
- [6] Fernandes, F.; Lourenço, P.B.; Zanzi, L. Avaliação da constituição de elementos estruturais através do radar de prospecção geotécnica. *Engenharia e Vida*, Vol. 28, 2006, pp. 38-44.
- [7] Valle, S.; Zanzi, L.; Rocca, F. Radar tomography for NDT: comparison of techniques. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 41(2), 1999, pp. 259-269.
- [8] Forde, M.C.; McCavitt, N.; Binda, L.; Colla, C. Identification of moisture capillarity in masonry using digital impulse radar. 5th *International Conference on Structural Faults and Repair*, Edinburgh, Julho 1993, pp. 397-403.
- [9] Fernandes, F.M. Evaluation of two novel NDT techniques: microdrilling of clay bricks and ground penetrating radar in masonry. PhD Dissertation, Guimarães, University of Minho, 2006. Available from www.civil.uminho.pt/masonry.