

UTILIZAÇÃO DO GEORADAR NA DETEÇÃO DE INFRAESTRUTURAS

USE OF GEORADAR IN THE DETECTION OF INFRASTRUCTURES

Pereira, Marília; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, marilia@Inec.pt*
Coelho, Maria João; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, marjoao@Inec.pt*

RESUMO

O GEORADAR ou radar de prospeção é uma técnica geofísica expedita para a deteção de estruturas enterradas a pequena profundidade. Esta técnica baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas em meios contínuos, tendo a vantagem de consistir numa técnica de prospeção indireta e não destrutiva. As aplicações e os alvos detetáveis são vastos e dependem da frequência da energia emitida e da gama de penetração. Exemplos de infraestruturas que podem ser detetadas são: condutas, tubagens diversas, cabos metálicos, entre outros. Neste artigo apresenta-se uma aplicação desta técnica na pesquisa de infraestruturas enterradas num pátio do Palácio das Necessidades, em Lisboa. A pesquisa teve como objetivo a delimitação de áreas livres de infraestruturas para enterramento de contentores de resíduos sólidos urbanos. Os resultados obtidos permitiram a identificação de uma zona adequada e com uma área compatível à execução da obra pretendida.

ABSTRACT

The GEORADAR or ground penetrating radar (GPR) is an expedient geophysical technique for the detection of buried structures at small depth. This technique is based on the propagation of electromagnetic waves in continuous media, having the advantage of being an indirect and non-destructive exploration technique. The applications and the detectable targets are vast and depend on the frequency of the emitted energy and the range of penetration. Examples of infrastructures that can be detected are: ducts, various pipes, metallic cables, among others. This article presents an application of this technique in the investigation of infrastructures buried in a courtyard of the Palácio das Necessidades, in Lisbon. The research had as objective the delimitation of areas free of infrastructures for burial of solid urban waste containers. The results obtained allowed the identification of an appropriate zone and with an area compatible with the execution of the intended work.

1 - INTRODUÇÃO

Desde os anos sessenta que a técnica de prospeção geofísica por GEORADAR tem sofrido desenvolvimentos significativos e tem sido aplicada em numerosas áreas de investigação (Harrison, 1970; Ulrikson, 1982; Davis e Annan, 1989; Lai et al., 2018). As melhorias alcançadas, quer em recentes equipamentos, quer em sofisticadas técnicas de processamento de sinais têm permitido um relevante avanço na resolução das imagens obtidas, e deste modo têm permitido uma maior aplicabilidade desta técnica de prospeção em vários domínios.

Possíveis aplicações na área da engenharia variam desde a identificação de estruturas geológicas até à deteção e delineação de cavidades, de condutas, contentores e cabos enterrados, para além do estudo de integridade e controle de materiais.

Em engenharia civil, a deteção e mapeamento de condutas, tubagens diversas e cabos enterrados é uma área de estudo onde esta técnica tem tido um grande desenvolvimento na sua aplicação.

O GEORADAR (ou do inglês GPR – *Ground Penetrating Radar*) é um sistema que permite a inspeção do terreno e que é baseado na emissão de ondas eletromagnéticas de elevada frequência, apresentando capacidade para detetar interfaces entre materiais com diferentes propriedades dielétricas. É uma técnica com elevada resolução, não interferindo diretamente com estruturas existentes e muito rápida na sua execução prática.

Em Portugal, as redes de gás, água, eletricidade e comunicações são propriedade de diferentes instituições e nem sempre se encontram integralmente mapeadas e atualizadas em registos de cadastro, por forma a serem corretamente identificadas nos locais sujeitos a obras de escavação.

Os custos e riscos das escavações podem ser significativos, dependendo das condições do terreno, do local e das eventuais redes de infraestruturas aí instaladas. O conhecimento prévio da sua localização poderá diminuir os custos de escavação e os riscos de danificação dessas redes. Devido a estes factos, a

técnica de prospeção por GEORADAR, que é uma técnica não invasiva e não destrutiva, é a mais indicada para a execução de mapeamentos de redes de infraestruturas, em fases prévias ao início de muitas obras de escavação.

Neste artigo apresenta-se a prospeção por GEORADAR, executada num pátio de acesso (Figura 1) ao Palácio das Necessidades, em Lisboa, com vista à deteção de redes de infraestruturas aí existentes (Pereira e Coelho, 2015). O Palácio das Necessidades é um antigo convento do século XVIII onde atualmente se localiza o Ministério dos Negócios Estrangeiros. Este palácio, erguido no reinado de D. João V, integra-se num conjunto arquitetónico classificado como Imóvel de Interesse Público. Com o propósito do dono de obra efetuar o enterramento de contentores de resíduos sólidos naquele espaço, e face ao tipo de edificado e ao património do conjunto, antes de se efetuarem as escavações tornou-se de primordial importância a aplicação de uma técnica de prospeção geofísica não destrutiva, para deteção dos tipos de tubagens e cabos existentes no local a várias profundidades.

Os principais objetivos da prospeção efetuada foram: i) identificação dos vários tipos de redes de infraestruturas pela observação de tampas existentes no local; ii) deteção das condutas, tubos e cabos enterrados, através da execução de vários perfis de GEORADAR, numa rede pseudo 3D; iii) mapeamento da localização dessas redes no pátio de acesso; iv) indicação de uma zona no pátio adequada à volumetria dos contentores de resíduos a implantar, por forma a orientar a localização da área de escavação. De referir ainda que a prospeção efetuada abrangeu essencialmente terrenos de aterro superficiais.



Figura 1 – Vista do pátio de acesso ao Palácio das Necessidades. Local onde se realizou a prospeção

2 - PRINCÍPIOS BÁSICOS DA PROSPEÇÃO POR GEORADAR

A técnica de prospeção por radar de penetração, também designada na literatura da especialidade por GEORADAR ou GPR, baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas em meios naturais, incluindo os materiais geológicos. Quando aplicado a este tipo de materiais, constitui uma técnica geofísica de prospeção indireta e não destrutiva, cuja utilização tem por objetivo detetar e localizar diferentes estruturas subsuperficiais, desde que a energia eletromagnética penetre até à profundidade requerida e ultrapasse a atenuação que normalmente os materiais geológicos provocam.

Em modo de reflexão de ondas, pelo deslocamento da antena do GEORADAR, equipada com um emissor e um recetor, ao longo de um perfil à superfície, obtém-se o registo contínuo de sinais recebidos, também designado por radargrama, e que corresponde à secção vertical do perfil. A técnica baseia-se no facto da velocidade de propagação e da reflexão em interfaces entre diferentes materiais ser dependente das

propriedades elétricas e magnéticas dos meios de propagação. Em meios com suficiente contraste nas propriedades eletromagnéticas, as interfaces podem ser detetadas em registos contínuos.

A identificação e interpretação de reflexões nos registos podem fornecer várias informações, no sentido de localizar ou delimitar interfaces e estruturas subsuperficiais ao longo do perfil.

Nos materiais geológicos, por serem meios condutores do ponto de vista eletromagnético, a propagação da energia eletromagnética depende essencialmente de dois parâmetros determinantes: a permissividade elétrica relativa e a condutividade elétrica dos materiais.

Na prática todos os meios naturais conhecidos são mais ou menos condutores e, por isso, mais ou menos absorventes de energia eletromagnética, podendo apenas o vácuo ser considerado como um meio absolutamente transparente, no qual a amplitude da onda é constante ao longo da direção de propagação. No entanto, certos meios de baixa condutividade elétrica são, na prática, considerados como meios transparentes comparativamente a outros de elevada condutividade, como é o caso do ar, no qual a atenuação é praticamente nula em relação aos materiais geológicos.

Por outro lado, os metais e os minerais metálicos, os quais apresentam elevados valores de condutividade elétrica, apresentam-se como sendo praticamente opacos à energia eletromagnética. Estes tipos de materiais, apesar de apresentarem uma elevada atenuação de energia são extremamente refletivos. Este facto é importante na deteção de corpos metálicos existentes no interior de outros meios, podendo ser identificáveis através das fortes reflexões geradas na interface do corpo metálico com o meio envolvente. Exemplos típicos desta situação é a localização de armaduras no interior de betão, a deteção de cabos ou de tubos, ou outros objetos metálicos enterrados.

Na aplicação do radar aos meios geológicos, a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas num meio, V , pode ser aproximada pela seguinte expressão, sendo a constante c a velocidade da luz no vácuo, a qual corresponde a 3×10^8 m/s, e K a constante dielétrica ou permissividade relativa desse meio:

$$V \approx \frac{c}{\sqrt{K}} \quad [1]$$

Os impulsos de energia eletromagnética emitidos pela antena emissora de um radar, ao encontrarem uma descontinuidade nas propriedades elétricas do meio, ficam naturalmente sujeitos aos fenómenos de refração e reflexão, aos quais se podem aplicar os princípios da ótica geométrica. Em termos de reflexões registadas em sucessivos sinais e considerando o caso de um modelo de uma camada, a distância s , entre o ponto de emissão dos impulsos e a interface para a qual se registaram as reflexões, pode ser calculada através da expressão:

$$s = \frac{Vt}{2} \quad [2]$$

Na expressão anterior, V é a velocidade de propagação da energia eletromagnética no meio atravessado, e t o tempo de percurso registado. O produto (Vt) deverá ser dividido por dois, devido ao facto de, em termos de reflexão de energia, e para as situações de emissão-receção de energia no mesmo plano geométrico, o tempo de percurso registado corresponder a um tempo de propagação de dupla trajetória, ou seja, desde o ponto de emissão até ao ponto de reflexão e novamente em direção ao ponto de receção.

Como se referiu, os vários materiais geológicos apresentam diferentes características do ponto de vista eletromagnético, sendo estas características importantes para se obterem reflexões passíveis de serem identificáveis nos registos de GEORADAR.

Neste trabalho utilizou-se a modalidade de ensaio designada por perfil de reflexão. O funcionamento do equipamento para a modalidade de perfil de reflexão, processa-se do seguinte modo:

- i. a unidade de transmissão gera um impulso de alta voltagem e de curta duração, sob a forma de energia eletromagnética, com uma frequência central de acordo com a antena que estiver a ser utilizada. A energia transmitida para o terreno, propaga-se no meio e, ao encontrar interfaces entre meios com suficiente contraste nas propriedades eletromagnéticas, reflete-se e é captada pela unidade recetora;

- ii. a unidade de receção amplifica os sinais captados, os quais são enviados para a unidade de controlo, onde são digitalizados, formatados e armazenados; paralelamente, os sinais são ainda enviados para um ecrã, podendo assim ser observados simultaneamente à operação do GEORADAR;
- iii. ao movimentar-se a antena ao longo de um perfil, com uma taxa de emissão de impulsos elevada e constante, o conjunto de sucessivos sinais recebidos constituem uma secção de GEORADAR, a qual representa uma imagem bidimensional das variações das propriedades eletromagnéticas dos materiais localizados sob o alinhamento do perfil;
- iv. posteriormente, os registos obtidos são processados, aplicando várias técnicas de melhoramento de sinais, especialmente através da manipulação dos níveis de ganho e da conversão dos registos de sinais em imagens coloridas, por aplicação de uma escala de cores apropriada. Deste modo, as imagens resultantes podem apresentar uma razão sinal/ruído significativamente melhorada.

Na Figura 2 apresenta-se esquematicamente, o princípio de funcionamento do GEORADAR na execução de um perfil para dois tipos de modelos. O caso A refere-se à situação da passagem da antena sobre uma zona anómala, no qual se mostra uma pequena secção de sinais resultantes. No caso B mostra-se uma pequena secção de sinais para um modelo com uma interface horizontal entre dois tipos de camadas de diferentes materiais. De um modo simples, no primeiro caso procura-se exemplificar a situação da deteção de um vazio ou de um tubo, e o segundo caso aplica-se às situações de deteção de determinadas interfaces entre diferentes materiais.

Na Figura 2 e para os dois casos, a antena ao ser movimentada ao longo do perfil, emite energia eletromagnética, cuja propagação e reflexão na superfície da zona anómala (caso A) ou na interface entre as duas camadas (caso B), são indicadas pelos raios esquematizados para várias posições da antena e representados em a). Em b), as secções mostram os sinais recebidos em função da posição da antena ao longo do perfil (eixo horizontal) e do tempo referente ao trajeto da energia (eixo vertical).

Em cada secção de sinais encontram-se destacadas as principais reflexões, claramente visíveis pela variação de amplitude dos sinais. Para o caso A, a reflexão referente à zona anómala apresenta uma forma hiperbólica no perfil, ao passo que a reflexão correspondente ao caso B mostra um andamento linear ao longo do perfil.

Na Figura 3 mostra-se esquematicamente o modo de conversão de uma secção contínua de sinais numa imagem contínua colorida. Cada sinal é transformado numa linha colorida, através da conversão dos vários níveis de amplitude desse sinal, pela aplicação de uma escala de cores atribuída. Deste modo, a secção de sinais pode ser apresentada como imagem contínua e colorida, cujas cores ou variações de diferentes tons de uma cor, representam diferentes níveis de amplitude ao longo dos sinais que constituem uma secção.

No trabalho efetuado, os registos de GEORADAR foram obtidos com uma amostragem espacial elevada, de 106 sinais por metro (scans/m), dando a possibilidade de inserção de marcas nos radargramas, por cada metro de distância percorrida. Cada sinal recebido foi registado e amostrado com 512 pontos.

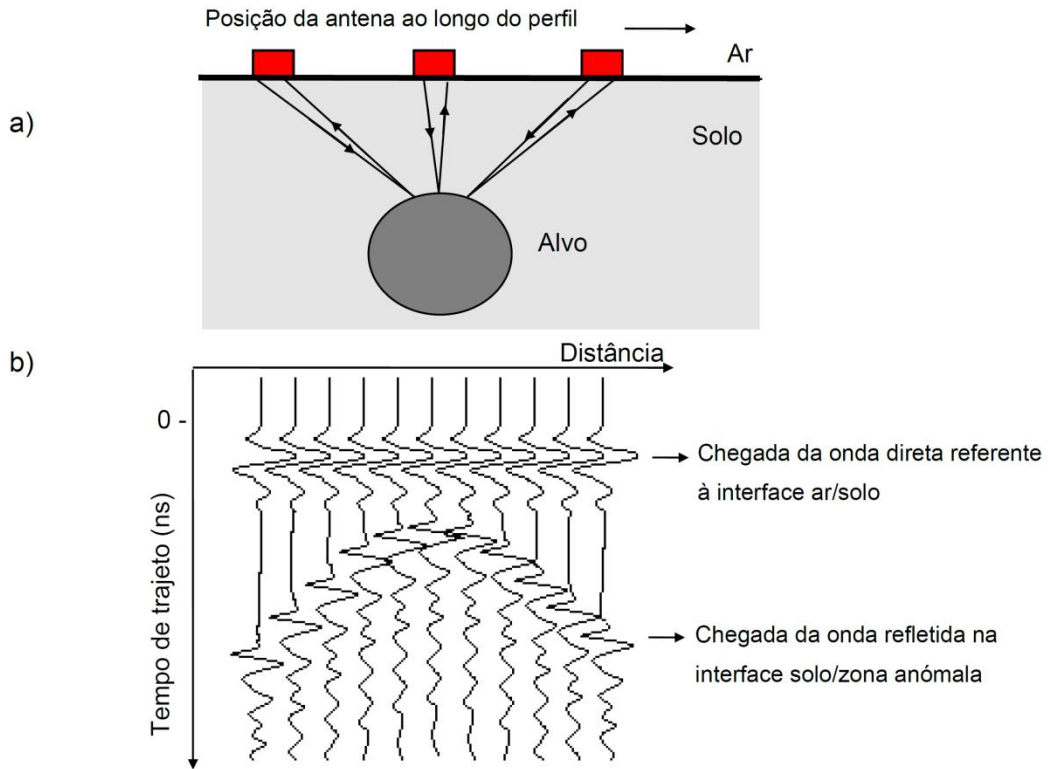
A escala de cores escolhida, em tons de cinzentos, foi aplicada como uma função de distribuição linear a todos os registos de GEORADAR, e encontra-se ilustrada na Figura 3. A cor branca é aplicada à amplitude positiva máxima e a cor negra à amplitude negativa mínima de sinal.

A interpretação de uma secção consiste na discriminação de possíveis refletores face a um conjunto de outros "eventos" (difrações, ruído de fundo, reflexões múltiplas, etc.).

Num sinal, uma reflexão distingue-se, em geral, por uma significativa variação de amplitude no sinal, apresentando uma forma de onda destacável relativamente à parte restante.

Num registo, a identificação visual e direta de refletores está em geral associada à marcação de alinhamentos ou de outras formas que mais se destaquem face ao conjunto da imagem. Para tal tem-se em consideração determinadas características típicas, tais como a coerência na forma de onda, e uma certa continuidade ao longo da secção do perfil.

CASO A



CASO B

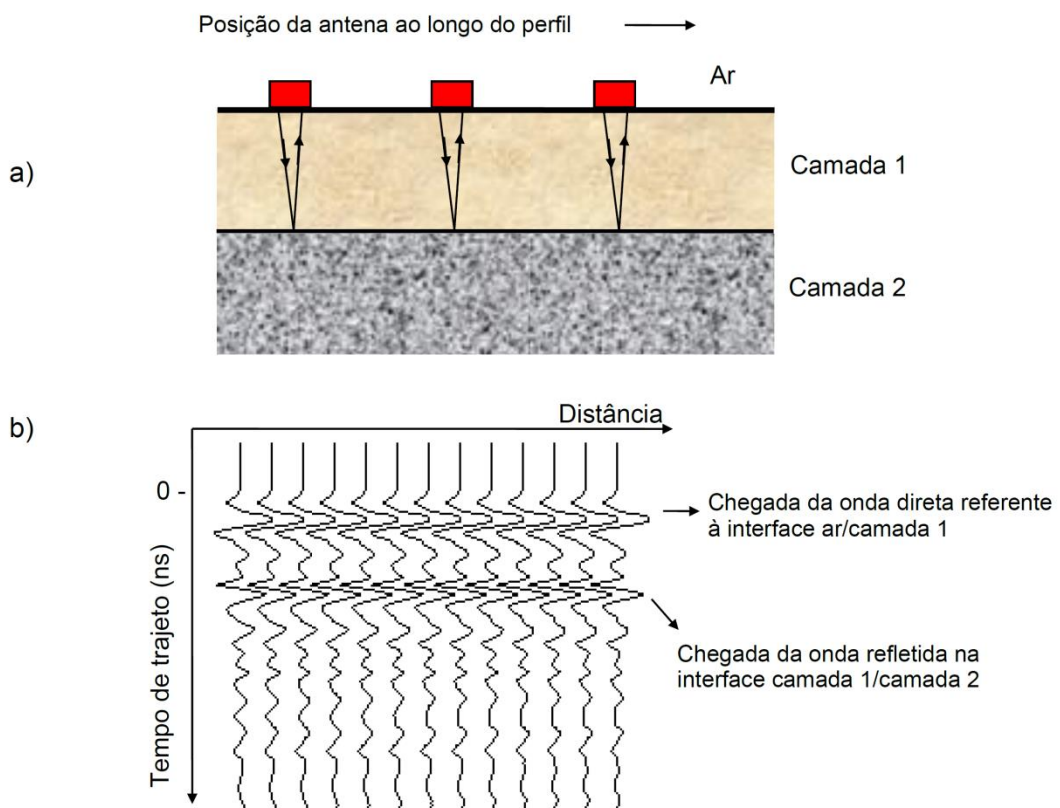


Figura 2 – Ilustração esquemática de um perfil de GEORADAR para dois tipos de modelos

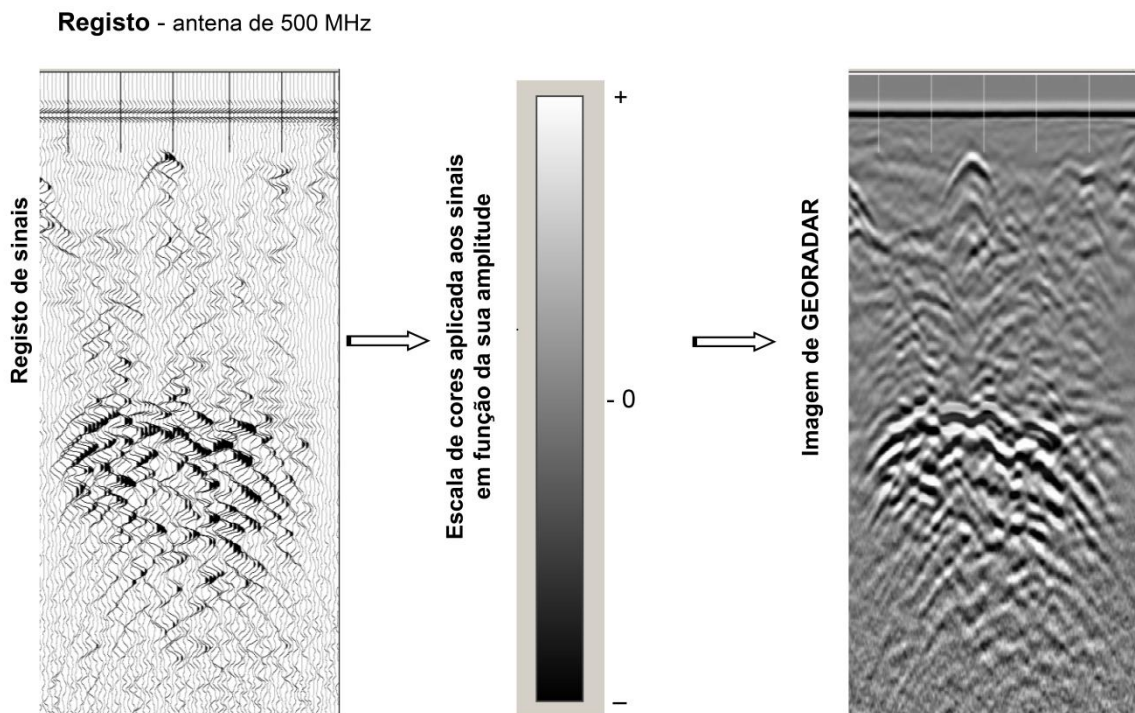


Figura 3 – Escala de cinzentos aplicada aos registos

2.1 - Algumas limitações da técnica

Uma das maiores limitações na aplicação da técnica de GEORADAR reside no facto de terem que existir condições necessárias em termos de contraste nas propriedades eletromagnéticas entre as estruturas a serem detetadas e os materiais envolventes, o que por vezes nem sempre se verifica (Oliveira e Rodrigues, 1994).

Em algumas situações em que não existe suficiente contraste, ou em áreas de elevada condutividade, a deteção das estruturas alvo pode por vezes ser impossível.

Outras limitações que afetam esta técnica de ensaio, especialmente na interpretação de algumas imagens, estão relacionadas às heterogeneidades de alguns terrenos, como no caso de aterros terrosos e rochosos. Estas situações geram uma quantidade enorme de reflexões e difrações que se sobrepõem umas às outras, escondendo ou disfarçando as reflexões geradas pelas estruturas a serem detetadas. Por vezes e em algumas circunstâncias é necessário a aplicação de técnicas adicionais de processamento de sinais para extrair a informação desejada.

3 - EQUIPAMENTO, METODOLOGIA E RESULTADOS OBTIDOS

O pátio de acesso ao Palácio das Necessidades, onde se pretendia fazer as escavações para o enterramento de contentores de resíduos sólidos, foi coberto à superfície por uma rede de doze perfis, aproximadamente perpendiculares entre si (ver Figura 7). A técnica de ensaio utilizada nestes perfis foi a técnica contínua de reflexão de ondas eletromagnéticas.

O equipamento utilizado nos trabalhos foi um equipamento designado por SIR-10H, da marca "Geophysical Survey Systems, Inc." (GSSI). O equipamento é basicamente constituído pelos seguintes elementos:

- unidade central de controle para transmissão, receção e registo de sinais;
- unidade de visualização dos registos;
- cabos de ligação;
- antenas para emissão e receção de energia eletromagnética, para frequências centrais de emissão de 200, 500 e 900 MHz (ver Figura 4);
- roda para controle de distâncias percorridas, que é acoplada à antena utilizada.

O aparelho de aquisição foi instalado no local e a antena de emissão-recepção da energia eletromagnética foi puxada manualmente ao longo dos perfis, tal como se ilustra na fotografia da Figura 4. Acoplada a esta antena foi colocada uma roda com um sistema de controlo e medição de distâncias, permitindo efetuar uma amostragem espacial contínua e constante.



Figura 4 – Vista da execução de um perfil transversal

Tal como se referiu anteriormente, no local foram implantados doze perfis segundo uma disposição quadricular, tendo sido quatro perfis orientados longitudinalmente à maior dimensão do espaço e oito transversais a estes. Na planta da Figura 7 apresentam-se os alinhamentos dos perfis realizados, P1 a P4 (longitudinais) e T1 a T8 (transversais), assim como a localização aproximada de algumas tampas de caixas de várias infraestruturas existentes no local.

Os perfis P1 a P4, com comprimentos que variaram entre cerca de 32 e 18,5 m, foram executados com a orientação de norte para sul, e os perfis T1 a T8, com comprimentos entre cerca de 12,5 e 11 m, foram realizados de este para oeste.

Todos os perfis foram realizados sobre o pavimento empedrado, tendo-se utilizado várias antenas de frequência central, as quais permitem alcançar várias profundidades.

A amostragem espacial nos registos de GEORADAR foi elevada, com 106 sinais por metro (scans/m), dando a possibilidade de se obter uma escala métrica nos radargramas, ou seja, uma marca por cada metro de distância percorrida em cada perfil.

Os registos foram gravados com uma janela de tempo de receção em nanosegundos adequada a cada antena, permitindo abranger a capacidade de penetração de cada uma das antenas utilizadas. Cada sinal recebido e registado foi amostrado com 512 pontos.

Para a conversão da escala de tempos de trajeto numa escala de profundidades estimadas, admitiu-se uma constante dielétrica (K) de 10, isto é, correspondente a uma velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no meio abaixo do pavimento empedrado de cerca de 0,95 m/ns. Este valor teve em conta o tipo de materiais existentes e a possibilidade de se encontrarem parcialmente saturados.

O processamento dos registos consistiu na aplicação da escala de cores, mencionada anteriormente, aos sinais dos radargramas e num processamento de filtragem. Todos os registos foram filtrados, com vista à remoção de ruído de fundo, devido ao sistema de operação ("*system ringing*"), o qual normalmente se sobrepõe sob a forma de bandas horizontais à informação recebida e registada. O filtro aplicado foi do tipo "*Horizontal Boxcar Background Removal*", na janela de tempos correspondente entre os 40 e 512 pontos de amostragem.

Face aos objetivos do trabalho, com prioridade para a localização de redes de infraestruturas existentes no local, a interpretação das imagens dos registos baseou-se na pesquisa de refletos com formas

hiperbólicas e de amplitude significativa, as quais são normalmente denunciadoras da existência de heterogeneidades ou alvos que possam corresponder a condutas, tubos ou cabos, tal como se mostra esquematicamente na Figura 5.

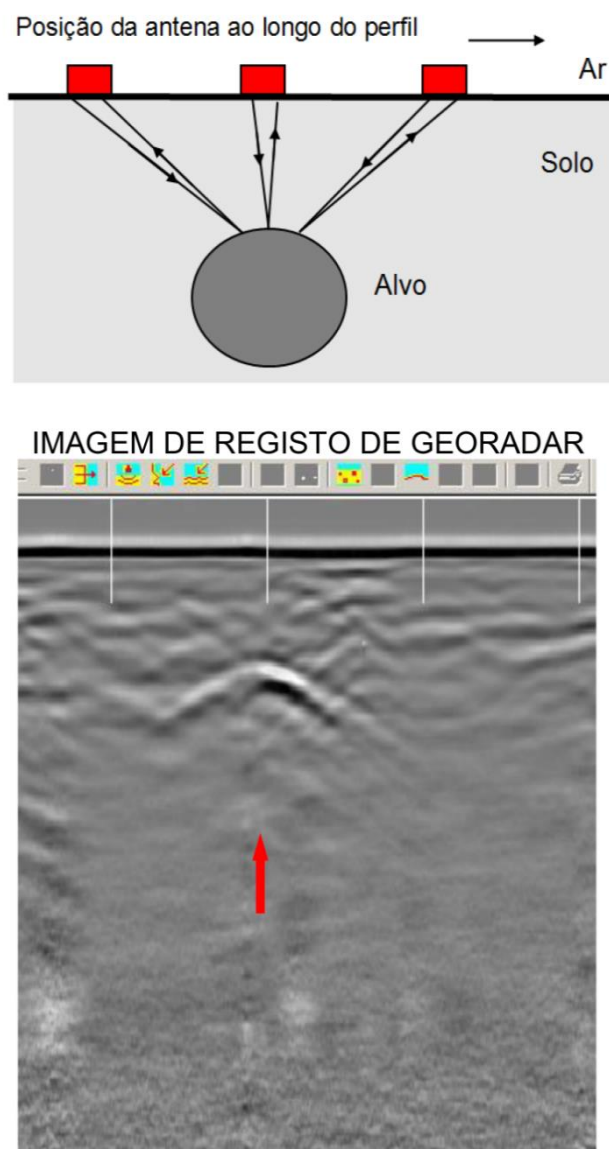


Figura 5 – Reflexão de forma hiperbólica devida à presença de um alvo enterrado

Da análise de todos os registos obtidos foram demarcadas todas as reflexões hiperbólicas encontradas de amplitude destacável, tal como se mostra em extratos dos registos apresentados na Figura 6.

Em sequência à interpretação efetuada em cada perfil, representam-se na planta da Figura 7 os resultados obtidos a partir dos registos de GEORADAR. Nesta figura, sobre as linhas dos perfis encontram-se marcadas as zonas e pontos onde se observaram reflexões hiperbólicas, e para as quais existe forte probabilidade de existência de tubos, cabos ou condutas, devido ao facto de se apresentarem numa distribuição segundo vários alinhamentos.

Na planta encontra-se ainda delimitada uma área, desenhada com uma quadrícula a cor verde, em que os registos dos perfis que a atravessaram não apresentam evidências de existência de tubos, cabos ou condutas.

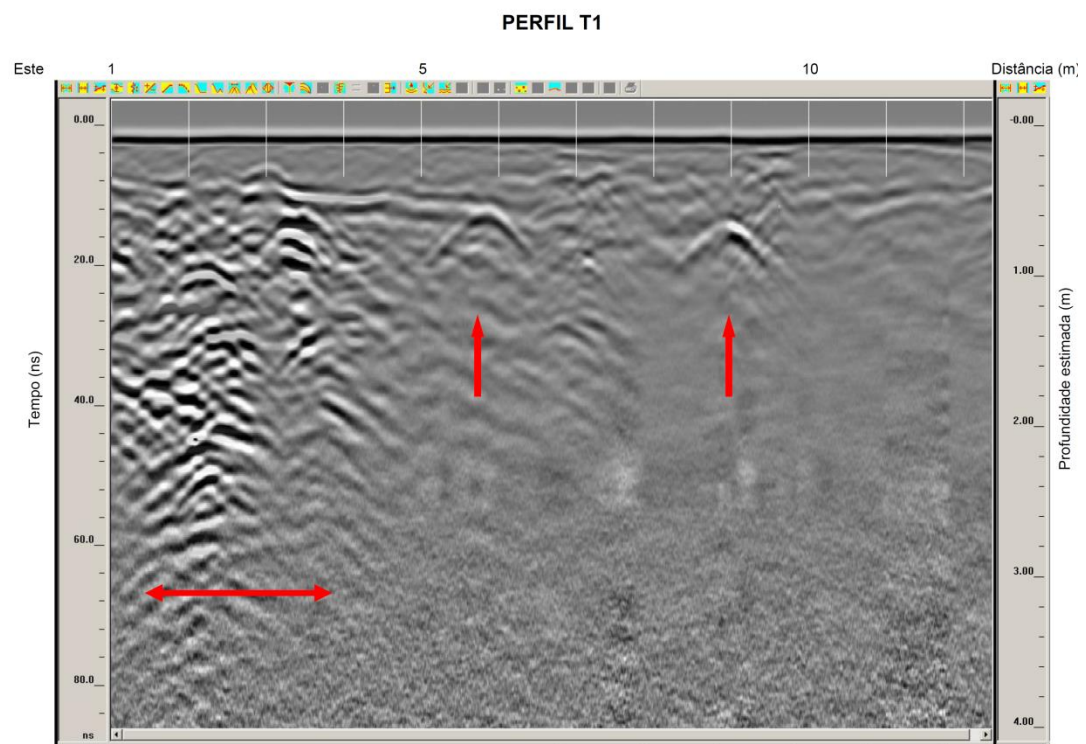
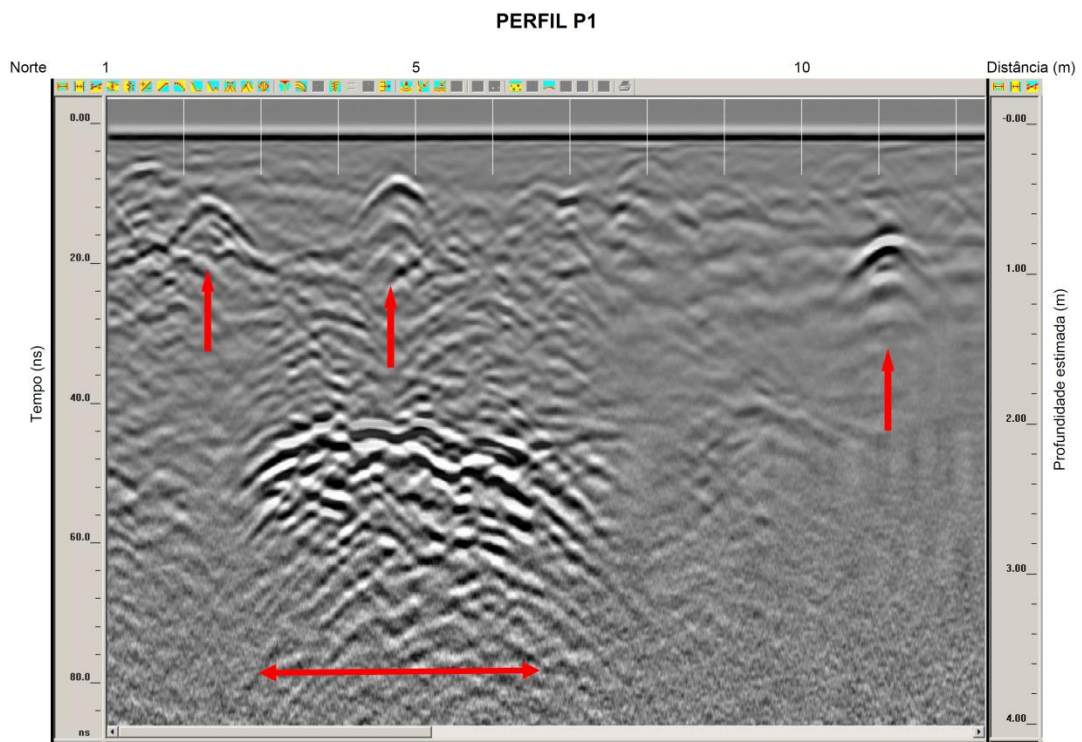


Figura 6 – Extratos de registos obtidos no pátio do Palácio das Necessidades, onde se assinala (com setas a vermelho) a interpretação das reflexões hiperbólicas

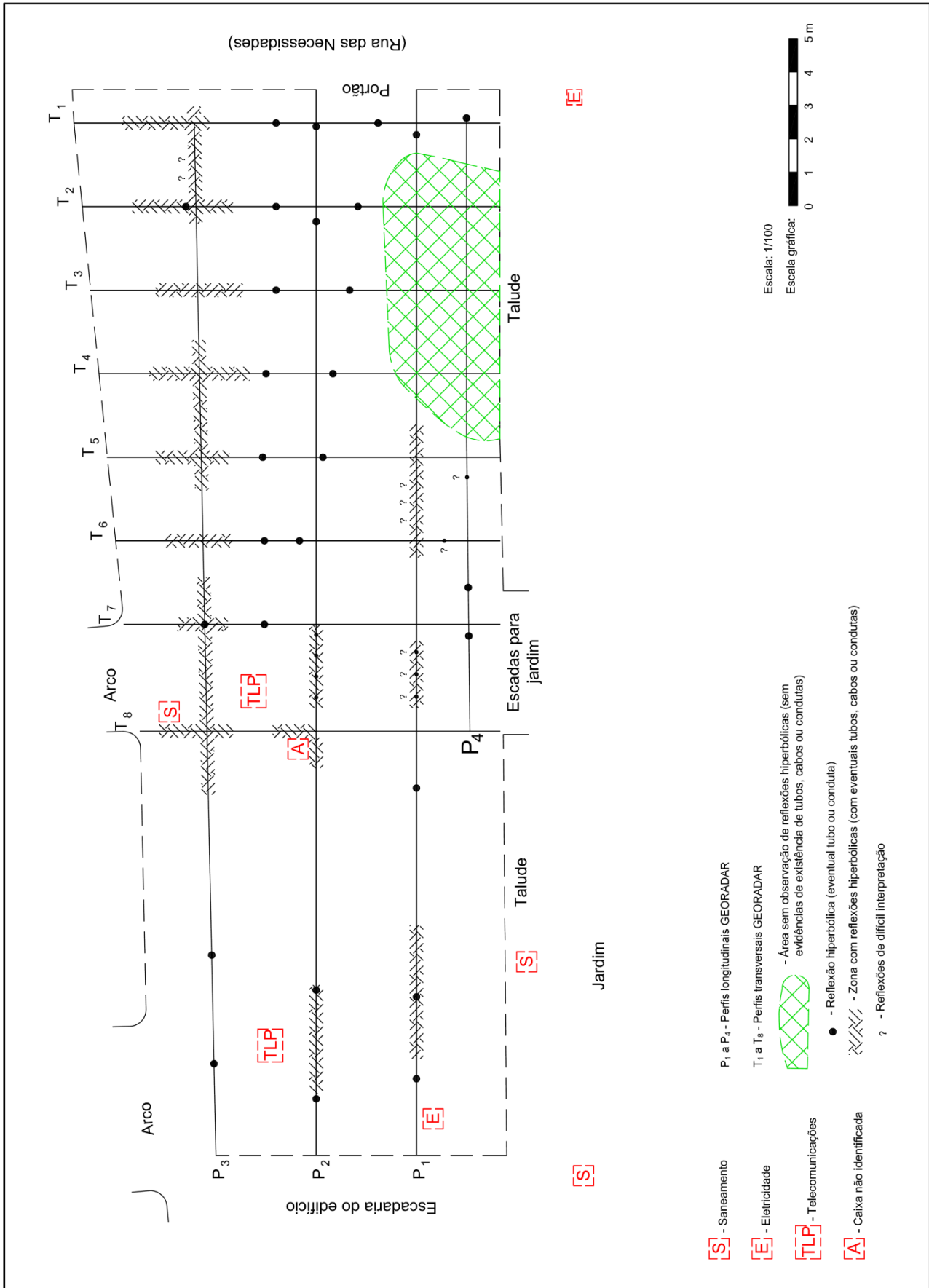


Figura 7 – Palácio das Necessidades (pátio): planta de localização dos perfis de GEORADAR e do zonamento dos resultados obtidos

Após a execução da prospeção por GEORADAR, a obra iniciou-se com a escavação direcionada para o local indicado pela prospeção como sendo o mais aconselhável para o enterramento dos contentores de resíduos sólidos. Na fotografia da Figura 8 apresenta-se uma vista da localização dos contentores no pátio de acesso ao Palácio das Necessidades, após a obra concluída.



Figura 8 – Palácio das Necessidades (pátio): Localização dos tops dos contentores enterrados após a obra concluída

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente artigo apresenta-se uma aplicação da prospeção por GEORADAR na deteção de várias infraestruturas num pátio de acesso ao Palácio das Necessidades, junto à rua das Necessidades, em Lisboa, com vista à implantação de contentores subterrâneos de resíduos sólidos urbanos.

No pavimento do local, assim como no pequeno talude adjacente, são visíveis várias tampas de caixas de redes de infraestruturas, tais como a de saneamento, eletricidade, telecomunicações e outras não identificadas, cuja localização aproximada se indica na planta da Figura 7.

Da análise dos resultados obtidos com o GEORADAR, expressos na planta da Figura 7, verifica-se que, nos vários perfis realizados, foram encontrados vários pontos e zonas com refletores indicadores da presença destas redes, cuja distribuição apresenta vários alinhamentos na área em estudo, e os quais foram tidos em consideração, quer na escolha do local para a instalação dos contentores, quer durante a fase de obra.

Com base nos registos obtidos com o GEORADAR, verificou-se ainda que, numa zona junto ao portão para a rua das Necessidades, assinalada na Figura 7, não se detetaram reflexões que evidenciassem a existência de redes de infraestruturas. Os contentores foram instalados na zona referenciada pela prospeção por GEORADAR como a mais adequada para esse efeito.

De referir ainda que, embora esta técnica de prospeção apresente como condicionante principal o facto de requerer condições de contraste nas propriedades eletromagnéticas entre a estrutura alvo a detetar e o meio envolvente, a experiência tem mostrado as suas potencialidades de aplicação em numerosas situações.

A aplicação prática de uma prospeção por GEORADAR é uma operação não intrusiva, não destrutiva, rápida de executar, cujos resultados podem ser visualizados e analisados no próprio local de obra, podendo ser fornecidas informações num prazo de tempo muito curto e a custos relativamente reduzidos, especialmente quando se compara esta técnica aos meios tradicionais de prospeção direta.

É de destacar ainda o facto das informações resultantes de uma prospeção por GEORADAR poderem ser utilizadas no planeamento e programação de trabalhos de prospeção direta e de escavação, conferindo em muitas situações maior rigor e objetividade.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Ministério dos Negócios Estrangeiros a publicação destes resultados.

REFERÊNCIAS

- Davis, J. L. e Annan, A. P. (1989) - Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37, pp 531-551.
- Harrison, C. H. (1970) - Reconstruction of subglacial relief from radio sounding echoes. *Geophysics*, 35, pp 1099-1115.
- Lai, W. L., Chang, R. W. e Sham, J. C. (2018) - A blind test of nondestructive underground void detection by ground penetrating radar (GPR). *Journal of Applied Geophysics*, 149, pp 10-17.
- Pereira, M. e Coelho, M. J. (2015) - Ensaios com GEORADAR no Palácio das Necessidades. Relatório LNEC 99/2015 – DG/NGEA, Lisboa.
- Oliveira, M. P. e Rodrigues, L. F. (1994) - Application of ground penetrating radar in engineering geology – Detection of cavities. 7th International IAEG Congress, pp 205-211.
- Ulriksen, C. F. (1982) - Application of impulse radar to civil engineering. Lund University. Tese de doutoramento. Lund, Sweden.