

PROSPEÇÃO COM GEORADAR: O CASO DA OFICINA DO DRMM/CML, NO POLO DOS OLIVAIS

SURVEY WITH GEORADAR: THE CASE OF THE DRMM/CML, IN THE OLIVAIS POLE

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 é um equipamento que permite a prospeção de terrenos e/ou materiais, cuja técnica se baseia na propagação de ondas eletromagnéticas em meios contínuos, e na reflexão destas ondas em interfaces entre materiais com diferentes propriedades dielétricas. É uma técnica de inspeção que tem a vantagem de ser indireta e não destrutiva, cuja utilização tem por objetivo detetar e localizar estruturas subsuperficiais, sendo também, em muitos casos, utilizada na deteção de espaços vazios. Nesta comunicação apresentam-se os resultados obtidos em ensaios com GEORADAR, que foram realizados no pavimento da oficina do Departamento de Reparação e Manutenção Mecânica (DRMM) da Câmara Municipal de Lisboa (CML), em consequência do abatimento do pavimento num local da oficina. O objetivo da prospeção foi detetar e mapear eventuais galerias subterrâneas, como as identificadas na sequência do abatimento do pavimento.

ABSTRACT

The GEORADAR is an equipment that allows land and/or materials surveying, whose technique is based on the propagation of electromagnetic waves in continuous media, and on the reflection of these waves at interfaces between materials with different dielectric properties. It is an inspection technique that has the advantage of being indirect and non-destructive, whose use aims to detect and locate subsurface structures, and is also, in many cases, used to detect empty spaces. This communication presents the results obtained in tests with GEORADAR, which were carried out on the pavement of the workshop of the Mechanical Repair and Maintenance Department (DRMM) of the Municipality of Lisbon (CML), which took place after the collapse of the floor in a place of the workshop. The purpose of the survey was to detect and map any underground galleries, such as those identified following the subsidence of the pavement.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o desenvolvimento de equipamentos de aquisição e de processamento de dados, utilizados nas aplicações de GEORADAR, permitiram que esta técnica geofísica evoluísse de uma mera visualização e inspeção expedita do terreno para a obtenção de imagens de elevada resolução e de diagnóstico. De facto,

desde os anos sessenta do século XX que a técnica de prospeção geofísica por GEORADAR tem alcançado desenvolvimentos significativos e tem sido aplicada em variadas áreas de investigação (Ulrikson, 1982; Davis e Annan, 1989; Lai et al., 2018). As melhorias incrementadas, quer em recentes equipamentos, quer em sofisticadas técnicas de processamento de sinais, têm possibilitado um significativo avanço na resolução das imagens obtidas, e deste modo têm permitido uma maior utilização desta técnica de prospeção em várias áreas.

As aplicações cobrem inúmeros exemplos e vão desde a identificação de estruturas geológicas, à deteção e delimitação de cavidades, de condutas, de contentores e de cabos enterrados, incluindo ainda o estudo de materiais. Em engenharia civil, as aplicações contemplam as áreas da geotecnia, vias de comunicação e de estruturas. De referir que a deteção e mapeamento de condutas, de tubagens e diversos cabos enterrados, é uma área de estudo onde esta técnica tem alcançado um grande desenvolvimento na sua aplicação.

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

Neste artigo apresenta-se a prospeção por GEORADAR executada no pavimento da oficina do DRMM/CML, no Polo dos Olivais, em Lisboa. Esta prospeção decorreu após o abatimento do pavimento num local da oficina, em 19 de maio de 2020, tal como se mostra na Figura 1.



Figura 1 - Imagem do abatimento do pavimento da oficina do DRMM/CML, em 19 de maio 2020

A oficina ocupa uma área de cerca de 4000 m², e destina-se a fazer a reparação e a manutenção de veículos da Câmara Municipal de Lisboa, principalmente da frota de veículos pesados.

Após o abatimento verificou-se que existiriam algumas galerias subterrâneas muito superficiais, logo abaixo do pavimento. No historial desta oficina, conta-se que foi edificada no local onde existiu uma antiga fábrica de curtumes, podendo as galerias terem constituído tanques de lavagem de peles.

O objetivo da prospeção com GEORADAR foi detetar e mapear eventuais galerias subterrâneas, como as identificadas na sequência do abatimento do pavimento (Figura 1). Os trabalhos efetuados consistiram na realização de perfis de reflexão em modo contínuo, segundo uma rede ortogonal, com dezanove perfis longitudinais à oficina e vinte e quatro perfis transversais (ver Figura 7).

2. PRINCÍPIOS DA PROSPEÇÃO COM GEORADAR

A técnica de aplicação do GEORADAR, também denominado por radar de prospeção ou de penetração, está fundamentada no fenómeno de propagação de ondas eletromagnéticas de radiofrequência, explicado pelas conhecidas equações de Maxwell. Quando utilizado na modalidade de perfil de reflexão, é uma técnica de prospeção geofísica cujos princípios são idênticos aos do método da reflexão sísmica e da técnica de sonar.

Se existir contraste nas propriedades eletromagnéticas entre dois meios (ou estruturas) subsuperficiais, as ondas eletromagnéticas transmitidas pelo emissor do GEORADAR são refletidas na interface entre os dois materiais, obedecendo às leis da ótica geométrica. As ondas refletidas são detetadas pelo recetor, que regista o seu tempo de percurso e a sua amplitude. Através do movimento da antena do equipamento (contendo um emissor e um recetor) ao longo de um perfil, obtém-se o registo contínuo dos sinais recebidos. Este registo designado por radargrama, corresponde à secção vertical que também inclui o perfil (Davis e Annan, 1989; Rodrigues et al., 1991; Oliveira e Rodrigues., 1994). De um modo geral, estes registos de GEORADAR podem ser posteriormente processados, especialmente através da manipulação dos ganhos dos níveis das amplitudes dos sinais e da utilização de filtros digitais.

O reconhecimento e interpretação de reflexões nos registos podem fornecer informação e/ou delimitar e localizar interfaces e estruturas subsuperficiais ao longo do alinhamento de perfis. Este método geofísico constitui assim uma técnica de prospeção indireta, cujo objetivo é detetar e localizar estruturas subsuperficiais, quer sejam artificiais, quer sejam naturais.

Nos ambientes geológicos, por serem meios condutores, a propagação das ondas eletromagnéticas depende principalmente de dois parâmetros determinantes: a permitividade elétrica relativa e a condutividade elétrica dos materiais. Na prática, todos os meios naturais conhecidos são sensivelmente condutores e, por isso, mais ou menos absorventes de energia eletromagnética, podendo apenas o vácuo ser considerado como um meio transparente, no qual a amplitude da onda é constante ao longo da direção de propagação (Davis e Annan, 1989; Rodrigues et al., 1991, Pereira e Coelho, 2018). Contudo, certos meios de baixa condutividade elétrica são, na prática, admitidos como meios transparentes em comparação a outros de elevada condutividade, como é o caso do ar, no qual a atenuação é praticamente nula em relação aos materiais geológicos. Em contrapartida, os metais e os minerais metálicos, os quais apresentam elevados valores de condutividade elétrica, apresentam-se como

sendo praticamente opacos à energia eletromagnética. Estes materiais, apesar de apresentarem uma elevada atenuação de energia, são extremamente refletores de energia eletromagnética. Este facto é muito importante na deteção de corpos metálicos existentes no interior de outros meios, podendo ser reconhecíveis através das fortes reflexões geradas na interface do corpo metálico com o meio envolvente. Exemplos comuns desta situação é a localização de armaduras no interior de betão, a deteção de cabos ou de tubos, ou outros objetos metálicos enterrados (Pereira e Coelho, 2018).

Na aplicação do GEORADAR aos meios geológicos e materiais de construção, 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 enviados 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:

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

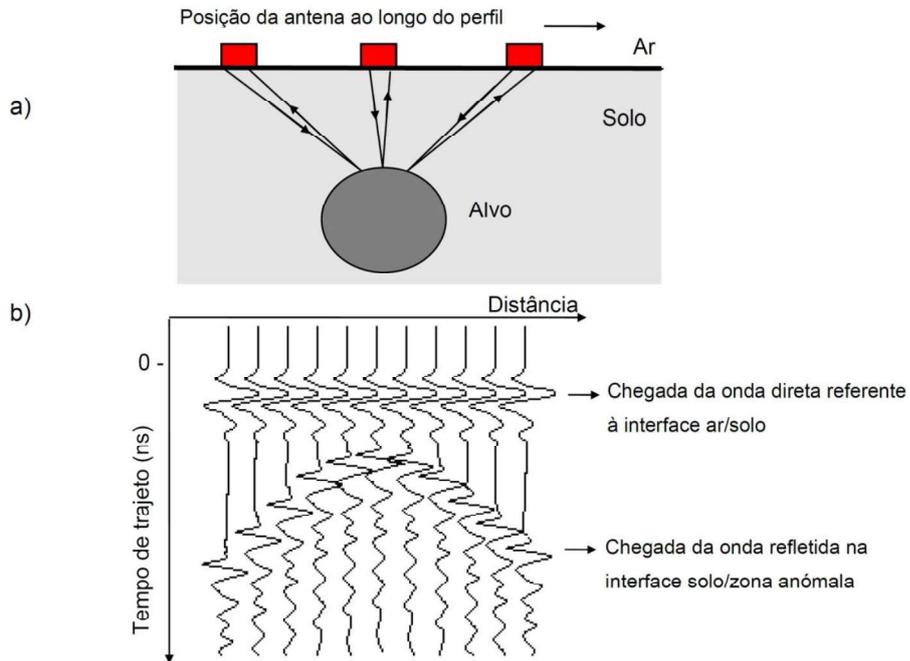
Na expressão anterior, V é a velocidade de propagação da energia eletromagnética no meio atravessado, e t , o tempo de percurso registado. O produto ($V t$) deverá ser dividido por dois, devido ao facto de, em termos de reflexão de energia, e para as situações de emissão-receção de energia no mesmo plano geométrico, o tempo de percurso 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. Na Figura 2 apresenta-se esquematicamente, o princípio de funcionamento do GEORADAR na execução de um perfil para dois tipos de modelos (Pereira e Coelho, 2018).

O exemplo A na Figura 2, refere-se ao caso da passagem da antena sobre uma zona anómala confinada, e no qual se mostra uma secção de sinais resultantes. No caso B mostra-se uma secção de sinais para um modelo com uma interface horizontal entre dois tipos de materiais diferentes. 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 apresentados, 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).

CASO A



CASO B

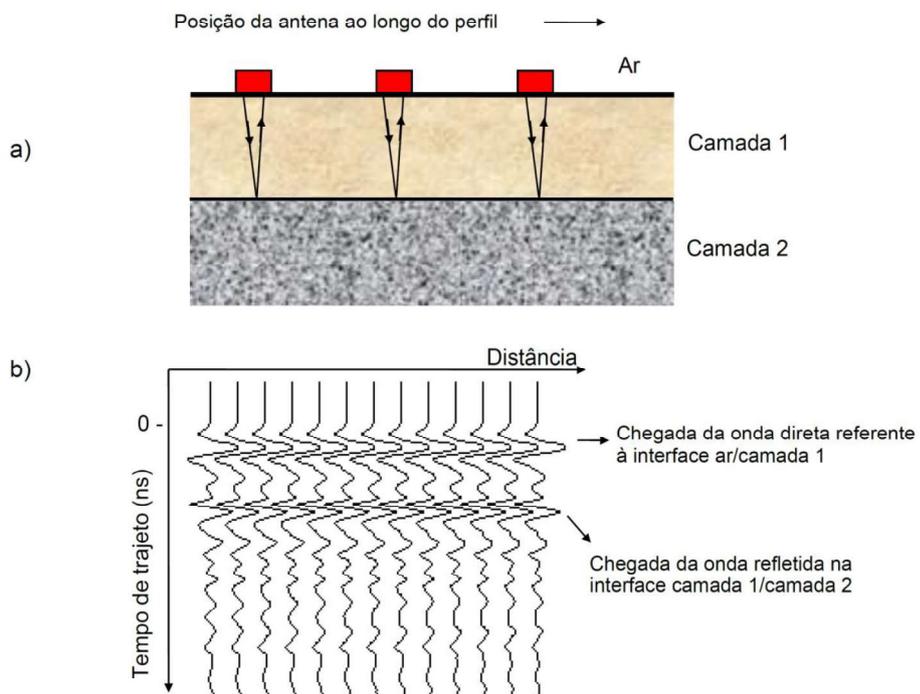


Figura 2 – Ilustração de um perfil de GEORADAR para dois tipos de modelos (Pereira e Coelho, 2018)

Em cada secção de sinais encontram-se realçadas as principais reflexões, claramente identificáveis 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 apresenta um andamento linear ao longo do perfil.

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

A análise e interpretação de uma secção traduz-se na distinção de possíveis refletos face a outros “eventos”, tais como, difrações, ruído de fundo, reflexões múltiplas, etc.. Num sinal, uma reflexão distingue-se por uma significativa variação de amplitude no sinal, apresentando uma forma de onda destacável relativamente à parte restante. Numa imagem, a identificação visual de refletos está em geral associada à marcação de alinhamentos ou de outras formas que mais se realcem face ao conjunto do registo. 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 (Pereira e Coelho, 2018; Pereira e Coelho, 2021).

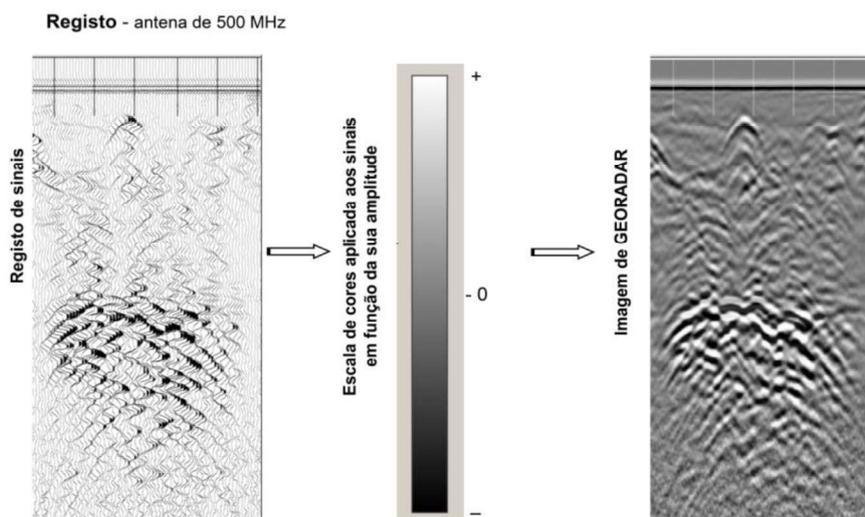


Figura 3 – Escala de tons de cinzentos aplicados aos registos (Pereira e Coelho, 2018)

3. METODOLOGIA DE ENSAIOS E RESULTADOS OBTIDOS

Os trabalhos realizados com o GEORADAR localizaram-se no pavimento da oficina do DRMM da CML no Polo dos Olivais, em Lisboa. As fotografias da Figura 4 ilustram o aspeto geral da referida oficina.

No total realizaram-se quarenta e três perfis (dezanove longitudinais - PL1 a PL19 e vinte e quatro transversais - PT1 a PT24), dispostos numa quadrícula que abrangeu a área disponível da oficina do DRMM (Figura 7). Para a execução dos perfis utilizou-se a técnica contínua de reflexão. O comprimento máximo dos perfis longitudinais à

oficina foi de 66,5 m, e o dos perfis transversais foi de 56 m. A distância entre sucessivos perfis paralelos foi, no geral, de 3 m, sendo alguns dos perfis separados por 4 e 2 m, devido à ocupação do local por máquinas pesadas.

O equipamento utilizado nos trabalhos foi um sistema designado por SIR-10H, da marca “*Geophysical Survey Systems, Inc.*” (GSSI). O sistema é constituído pelos seguintes elementos: a) unidade central de controlo de transmissão, receção e registo de sinais; b) unidade de visualização dos registos; c) cabos de ligação; d) antena para emissão e receção de energia eletromagnética, para a frequência central de emissão de 500 MHz; e) roda para controlo de distâncias percorridas, que é agrupada à antena utilizada. O aparelho de aquisição foi instalado num carrinho e a antena de emissão-receção da energia eletromagnética foi deslocada manualmente ao longo dos perfis.

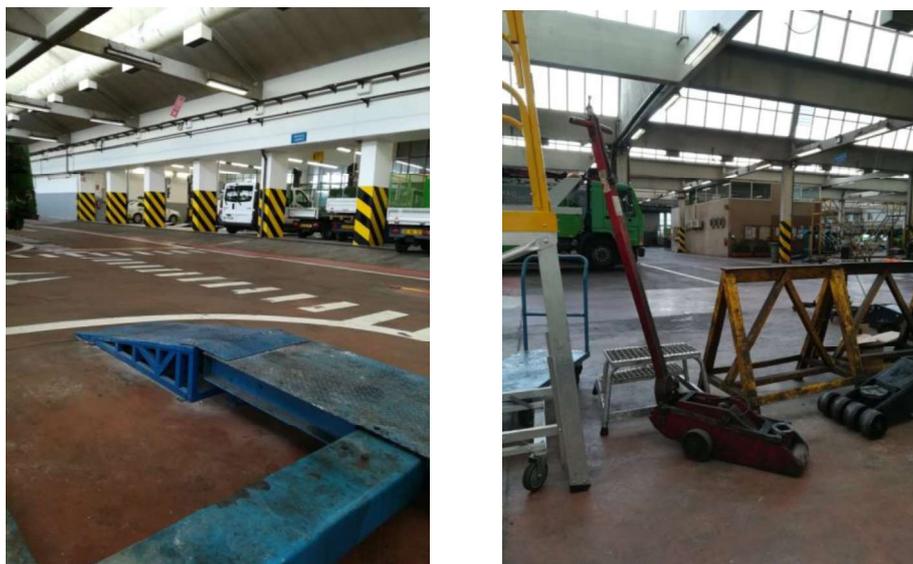


Figura 4 – Aspeto geral da oficina do DRMM da Câmara Municipal de Lisboa

Na prospeção efetuada, os registos de GEORADAR foram obtidos com uma amostragem espacial elevada, de 106 sinais por metro (scans/m), permitindo a 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, ilustrada na Figura 3, em tons de cinzentos, foi aplicada como uma função de distribuição linear a todos os registos. O negro foi empregue à amplitude negativa mínima de sinal, e o branco à amplitude positiva máxima. Os registos foram gravados com uma janela de tempo de receção de 80 ns (nanosegundos), possibilitando abranger a capacidade de penetração da antena utilizada de 500 MHz.

Como metodologia, após o abatimento do pavimento da oficina foram efetuados vários perfis de GEORADAR na proximidade da zona em colapso, de modo a cruzar a galeria subterrânea, com o objetivo de verificar e confirmar a resposta das anomalias identificadas nos registos. Na Figura 5 apresenta-se um registo de um destes perfis. Neste registo destacam-se dois tipos de anomalias: a) ocorrência de uma anomalia no início do perfil, a 1 m de distância, com reflexões hiperbólicas de forte amplitude comparativamente aos sinais envolventes, e que correspondem à presença de uma sarjeta de ferro no pavimento; b) ocorrência de uma anomalia, logo abaixo da superfície, entre cerca de 2,8 m e 4,7 m de distância, também com reflexões horizontais fortes, expressando-se como uma banda no registo, e correspondente à

galeria. A forma da anomalia deve-se ao facto de a galeria ter secção quadrangular, e ser muito superficial.

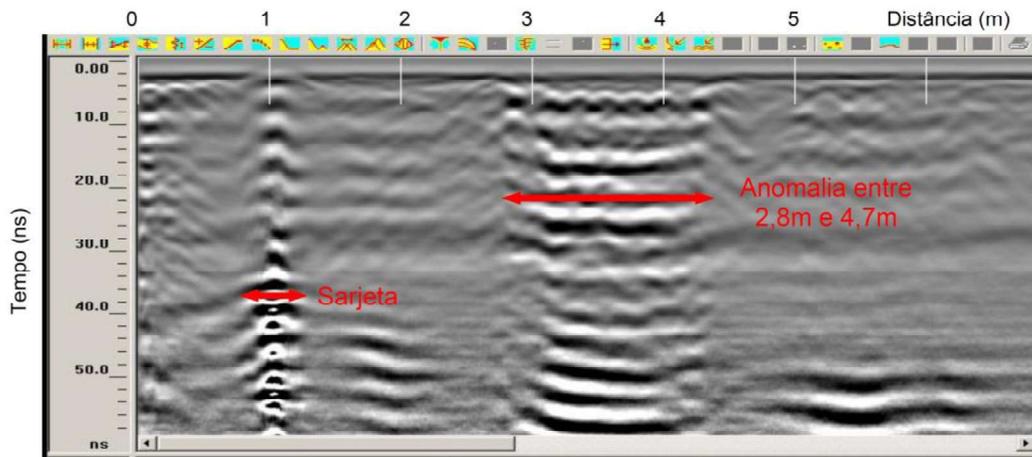


Figura 5 – Registo de GEORADAR efetuado junto à zona de abatimento, num ensaio prévio

Como prioridade para a localização de anomalias que pudessem ser correlacionáveis com eventuais galerias existentes sob o pavimento da oficina, a interpretação das imagens dos registos, baseou-se na pesquisa de refletores horizontais e com expressão vertical em banda, e de amplitude significativa, tal como se identificou no registo da Figura 5. No exemplo da Figura 6, correspondente a um extrato de registo do perfil PL12, mostra-se a anomalia entre os 48 e 49,5 m de distância, com características correlacionáveis a uma galeria subterrânea. Com estas características foram encontradas anomalias deste tipo nos perfis PL12, PL14, PL15, PL18, PL19, PT14, PT15, PT16, PT17 e PT18. Nos restantes perfis efetuados na oficina não foram encontradas anomalias significativas com as mesmas características.

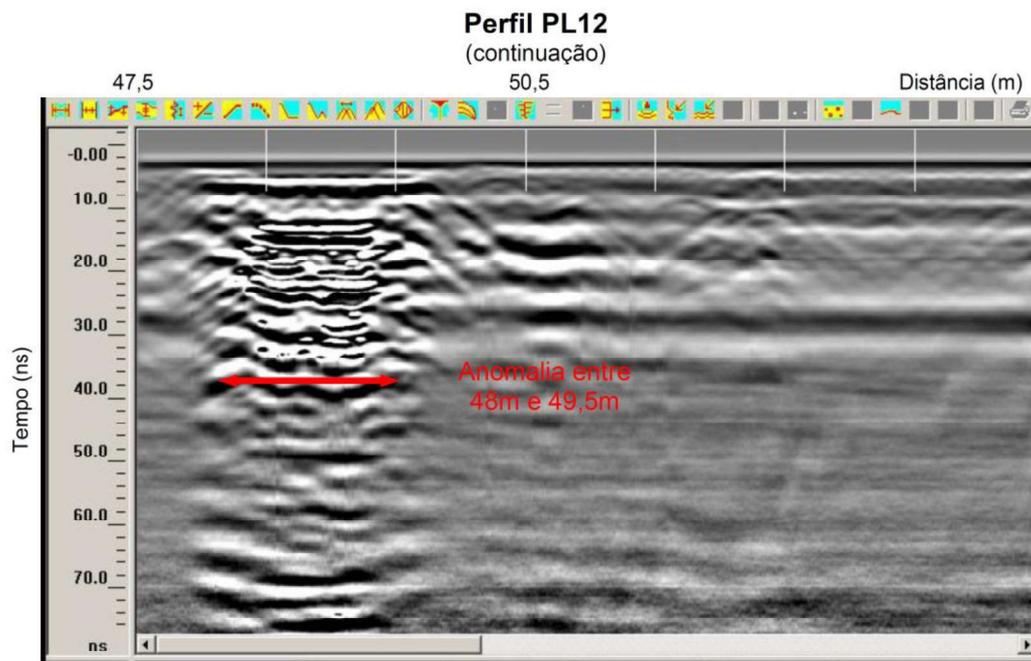


Figura 6 – Extrato do registo do perfil PL12, com anomalia entre cerca de 48 m e 49,5 m

Na sequência da interpretação efetuada em cada perfil, representam-se na planta da Figura 7, a vermelho, as diversas anomalias e zonas anómalas encontradas. Para além de algumas anomalias pontuais em alguns perfis, observa-se que elas se concentram nos perfis PL15, PT15 e PT18.

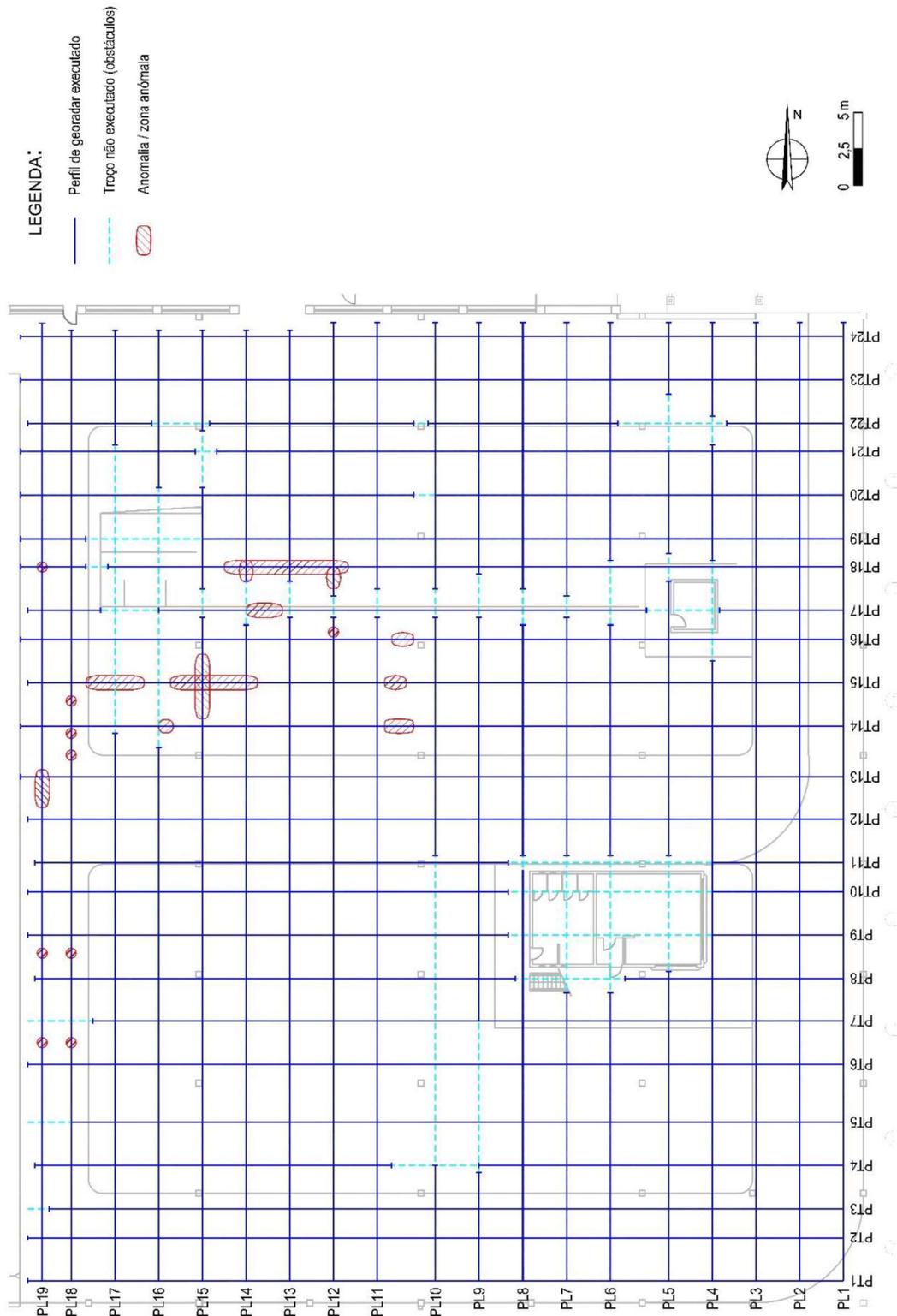


Figura 7 – Planta de localização dos perfis e do zonamento das anomalias obtidas

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após o abatimento do pavimento, num local da oficina do Departamento de Reparação e Manutenção Mecânica, da CML, e da identificação da existência de galerias subterrâneas, tornou-se indispensável detetar e mapear outras eventuais galerias. Neste contexto, foi indicada a execução de uma prospeção por GEORADAR, nos espaços livres da referida oficina, por se tratar de uma técnica rápida, expedita e não destrutiva.

Os trabalhos foram efetuados com recurso a um equipamento da “Geophysical Survey Systems, Inc” e uma antena de frequência central de 500 MHz. No total realizaram-se quarenta e três perfis, em modo de reflexão de ondas eletromagnéticas.

Como metodologia, procedeu-se à realização de ensaios prévios à prospeção, com a execução de vários perfis na zona do abatimento, com o objetivo de registar uma anomalia padrão, da galeria subterrânea mostrada na Figura 1. Esta anomalia serviu de guia na interpretação de todos os registos de GEORADAR.

Deste modo, foi possível obter um mapeamento das anomalias detetadas, tendo-se verificando que as principais se encontram nos perfis PL15, PT15 e PT18 (Figura 7). As anomalias registadas apresentam reflexões com fortes amplitudes e com características de poderem corresponder a eventuais espaços vazios de galerias subterrâneas, com relevante significado geotécnico e estrutural.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Câmara Municipal de Lisboa 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.
- 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.
- Oliveira, M. P. e Rodrigues, L. F. (1994). Application of ground penetrating radar in engineering geology. Detection of cavities. *7th International IAEG Congress*, 205-211. Lisboa
- Pereira, M. e Coelho, M. J. (2021). Prospeção com GEORADAR no pavimento da oficina do DRMM/CML, no polo dos Olivais. *Relatório LNEC 117/2021 – DG/NGEA*, Lisboa.
- Pereira, M. e Coelho, M. J. (2018). Utilização do GEORADAR na deteção de infraestruturas. *16º Congresso Nacional de Geotecnia*. Ponta Delgada, Açores.
- Rodrigues, L. F.; Oliveira, M. P. e Coelho, M. J. (1991). Radar de penetração. Aplicações em geotecnia. *4º Congresso Nacional de Geotecnia*, Vol. 3, 311-323. Lisboa.
- Ulriksen, C. F. (1982). Application of impulse radar to civil engineering. *Tese de doutoramento*. Lund University. Lund, Sweden.