

ANÁLISE DA CAPACIDADE DO MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA DETETAR ALVOS RESISTIVOS (NÃO CONDUTORES)

ASSESSMENT ON THE CAPABILITY OF THE RESISTIVITY METHOD TO DETECT RESISTIVE TARGETS (NONCONDUCTIVE)

Mota, Rogério; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, rmota@lnec.pt*

RESUMO

Os métodos de prospeção geofísica apenas são eficazes na deteção de um determinado alvo se ocorre um contraste da propriedade física medida entre este e o meio envolvente. Na presente comunicação aborda-se a capacidade do método da resistividade elétrica, sob a forma de perfis de tomografia de resistividade elétrica, para deteção de alvos resistivos – estruturas vazadas enterradas. Apresentam-se exemplos de deteção, e de não deteção, de estruturas resistivas enterradas ou subterrâneas, nomeadamente, conduta hidráulica, tubo, auditório subterrâneo, aqueduto e caneiro. Discute-se a relação entre a dimensão dos alvos e a profundidade a que estes se encontram, face à dimensão dos dipolos de eléctrodos (DD) que materializam os perfis. É ainda abordada a precisão da deteção tendo em conta as situações de fronteira/limite da pseudo-secção de resistividade elétrica e a dimensão do dipolo versus a profundidade de investigação. O primeiro caso de estudo aborda o estudo dum tubo de betão com 2m de diâmetro (D) inserido num aterro executado em ambiente cársico. Foram executados perfis com diferentes DD, com os dispositivos de Wenner e de dipolo-dipolo em dois locais, permitindo obter diferentes profundidades de investigação. Os resultados permitiram verificar que o dispositivo de dipolo-dipolo é o mais adequado para detetar alvos resistivos com uma razão da resistividade objeto/envolvente na ordem de 7x, para uma razão profundidade/dimensão de 1D. O segundo exemplo é um tubo metálico (D=25cm) eletricamente isolado, enterrado em aluvião saturado, a uma profundidade estimada de 2,5 m (10D). Não foi possível detetá-lo nos perfis executados. Um auditório subterrâneo a 1 m de profundidade num meio Miocénico foi claramente detetado, sendo o dispositivo dipolo-dipolo o que deu melhores resultados. No caso de um aqueduto, este foi localizado com os dispositivos de Wenner e de dipolo-dipolo. A posição (lateral e em profundidade) de uma ribeira encanada foi identificada com sucesso.

ABSTRACT

Geophysical methods are effective mainly if there is a contrast of the measured physical property between the target and the surrounding environment. This paper discusses the ability of the electrical resistivity method, in the form of electrical resistivity tomography profiles, to detect buried resistive targets - drainage systems, pipes or underground galleries. It addresses the relationship between targets' dimension and buried depth as a function of the electrodes (dipole) distance (DD). First case study is a 2 m diameter (D) concrete pipe in a compacted landfill over a karstic basement. At two different distances from pipe's edge - allowing two investigation depths (1.65 m and 3.72 m), a survey was performed with different DD using dipole-dipole and Wenner arrays. The results allowed to verify that dipole-dipole is the best to detect resistive targets buried in a resistive environment with a resistivity ratio body/environment of at least 7 times, for any DD between 0.25D and 1.0D, but with a depth/body dimension ratio around 1D. The second example is a metal tube (D=25 cm), externally insulated, buried in an alluvial saturated zone. Depth to the target, unknown but estimated around 2.5m, gave a ratio depth/body dimension equal to 10D. Two profiles (DD=0.5m, DD=0.75m) were performed, but without success on locating the tube. The third example is an underground auditorium, with 13m(width)x4m(height) at 1 m depth in a Miocene environment. Several profiles were performed with Wenner and dipole-dipole arrays, being the dipole-dipole array the one that gave the best resolution. A survey performed at the location of an ancient aqueduct from which chimneys are visible but the underground structure and location are unknown allowed to locate it with success using Wenner and dipole-dipole arrays. Finally, a covered river, whose real position between two points was unknown, was subject to a survey and its position and depth successfully detected.

1 - INTRODUÇÃO

A resistividade elétrica constitui uma medida da resistência que um material impõe à transmissão da corrente elétrica. Esta é favorecida principalmente pela presença de água nos vazios do solo ou da rocha, e pelos sais nela dissolvidos, pelo que a resistividade depende não só da porosidade do material que compõe o terreno (matriz sólida), como também do seu teor em água e da sua concentração iónica, pelo que, quanto maior for o teor em água ou a presença de material condutor, como, por exemplo, grafite ou pirite, menor é a resistividade. Outro fator que influencia a transmissão da corrente elétrica é a presença de argila, não só pela sua composição química, como também em função do seu estado de saturação.

Uma matriz sólida, como, por exemplo, um maciço granítico, pode assim ter um valor maior ou menor de resistividade elétrica, em função da presença de argila ou de um material condutor sólido e do seu teor em água, que pode variar ao longo do tempo, conduzindo a uma variação da resistividade ao longo do tempo. Quanto menos condutor da corrente elétrica for um meio, mais elevada será a sua resistividade elétrica – é o caso de rochas compactas, não alteradas nem fissuradas, ou vazios, como, por exemplo, grutas, túneis ou outras estruturas vazadas enterradas. A presente comunicação aborda esta última situação, já sujeita a estudos por alguns autores (e.g. Apparao et al., 1997a e 1997b; e Nawawi e Loke, 1995), dada a sua aplicabilidade à geotecnia, nomeadamente quando do estudo para a fundação de novas estruturas em ambiente urbano, em que é necessário detetar estruturas enterradas das quais se conhece a sua existência, mas não a sua localização precisa.

Segundo Van Nostrand (1953) um objeto enterrado pode ser detetado se produzir no mínimo uma anomalia de 10%, ou seja, se ocorrer um contraste de 10% com o meio envolvente.

Apresentam-se diversos casos de estudo em que houve sucesso e, num caso, insucesso na deteção das estruturas em questão. Na maioria dos casos apresentados foram utilizados dois dispositivos tetraeletródicos de medida – dipolo-dipolo e Wenner. Dos quatro elétrodos, dois são dedicados à injeção de corrente elétrica e os outros dois à medição do potencial elétrodo gerado no terreno (para uma descrição do modo de funcionamento destes dispositivos consulte-se, por exemplo, Mota (2017)).

Com base em estudos realizados em tanque, onde o meio encaixante era água e os alvos resistivos eram estruturas isolantes à transmissão da corrente elétrica (ebonite), Apparao et al. (1997b) concluíram que, para o dispositivo de Wenner, a profundidade de deteção de estruturas resistivas é de 1,5 vezes o raio de um cilindro (1,5R), ou seja 0,75 vezes o seu diâmetro (0,75D), e que, para o dispositivo de dipolo-dipolo, estas relações são de 2,0R ou 1,0D.

Nawawi e Loke (1995) realizaram uma experiência com um tubo de betão com 2 m de diâmetro situado a 3 m de profundidade, ou seja, uma razão profundidade/dimensão do alvo de 1,5D, executando perfis com o dispositivo de Wenner com 2 m de distância dipolar. Nesta situação a anomalia devida ao tubo encontrava-se bem delimitada. No modelo de resistividade (ρ) que obtiveram, a relação entre ρ_{max} (tubo) e ρ_{min} (meio ambiente) era de $\rho_{max}=15\rho_{min}$.

2 - CASOS DE ESTUDO

Nos casos de estudo que se apresentam, os modelos tomográficos de resistividade elétrica foram obtidos com recurso ao programa Res2DInv (Loke e Barker, 1996). Nestes modelos a gama da resistividade elétrica é diferente de local para local, mas mantém-se constante em cada local, para facilitar a análise comparativa entre modelos, com uma única exceção, devidamente assinalada. Em todos os modelos apresentados a gama de resistividade é crescente, das cores azuis para as encarnadas, e adota-se, normalmente, a visão do observador virado para o Norte.

2.1 - Passagem hidráulica

O primeiro caso de estudo corresponde à deteção de um tubo de betão, com 2 m de diâmetro, instalado sob um aterro de uma autoestrada, fazendo parte do seu sistema de drenagem. Os trabalhos de campo foram realizados na fase de construção da autoestrada, pelo que se teve acesso à plataforma antes da colocação de betuminoso, permitindo, assim, obter diferentes profundidades de investigação.

Atendendo à inclinação do tubo e às diferentes espessuras do material de aterro colocadas sobre este, foram selecionados dois locais (A e B, na Figura 1), a diferentes distâncias do seu extremo, o que deu origem a duas profundidades de investigação diferentes (1,65 m (0,825D) e 3,72 m (1,86D)).

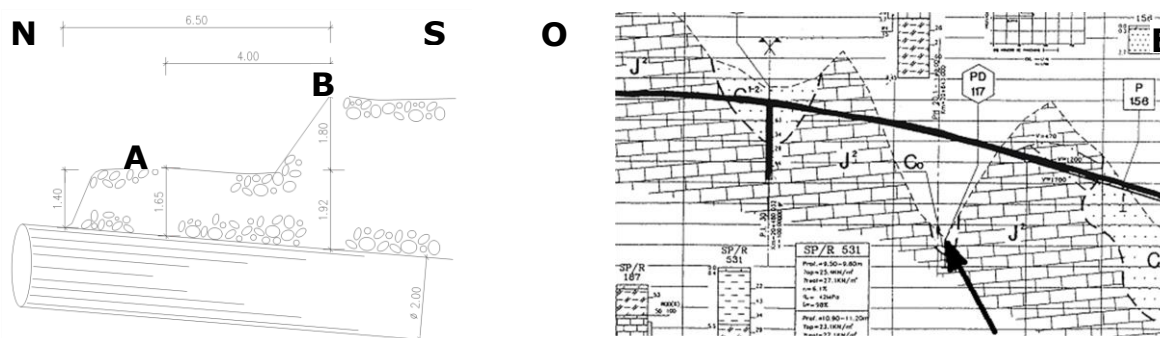


Figura 1 - a) Esquema com a posição da passagem hidráulica, localização dos perfis (assinalados por A e B) e espessuras de terreno entre estes e o tubo. b) Secção geológica (O-E), assinalando-se com uma seta o local da passagem hidráulica

Os perfis de resistividade elétrica foram executados em cada local com os dispositivos de dipolo-dipolo e de Wenner. No local mais próximo do extremo (local A) foram utilizadas, em cada dispositivo, três distâncias dipolares (0,5, 1,0 e 2,0 m) e apenas duas distâncias no segundo local (local B) (1,0 e 2,0 m), neste caso devido ao facto de a distância dipolar de 0,5 m resultar numa profundidade de investigação máxima aquém daquela à qual se encontrava o tubo. O meio geológico envolvente é cársico, sendo o atero constituído por camadas compactadas de enrocamento, cascalho e areia. Os trabalhos foram realizados no Verão apresentando-se o terreno muito seco.

A partir da observação dos modelos apresentados na Figura 2 e na Figura 3, verifica-se que, no local A, o tubo apenas é bem detetado com o dispositivo de dipolo-dipolo, qualquer que seja a distância dipolar utilizada. Neste local, e com o dispositivo de Wenner, o tubo é detetado, uma vez que, no local onde ele se encontra, existe um aumento da resistividade, mas os resultados não apontam claramente para a existência de um corpo resistivo naquele local, ao contrário do que acontece com o dispositivo de dipolo-dipolo. No local B, correspondente a uma maior profundidade do alvo, não se identifica o tubo em nenhuma das situações testadas, apenas a presença de uma interrupção na camada de menor resistividade elétrica no perfil executado com o dispositivo de Wenner, e com a menor distância dipolar.

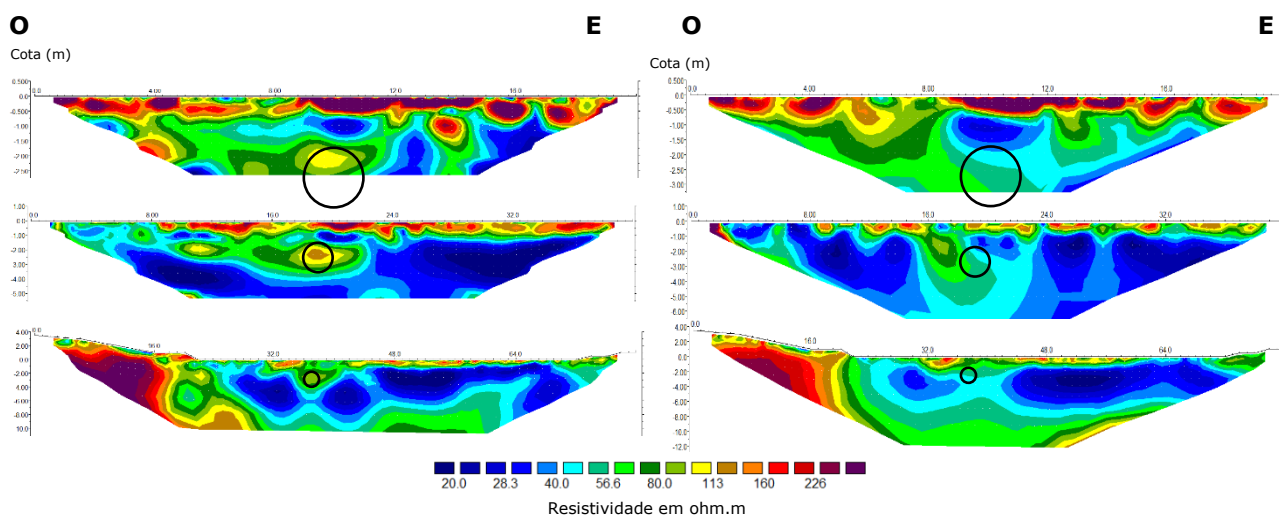


Figura 2 - Modelos obtidos para o local A (*Esquerda* – dispositivo de dipolo-dipolo. *Direita* – dispositivo de Wenner. *Topo* – DD=0,5 m. *Centro* – DD=1,0 m. *Base* – DD=2,0 m)

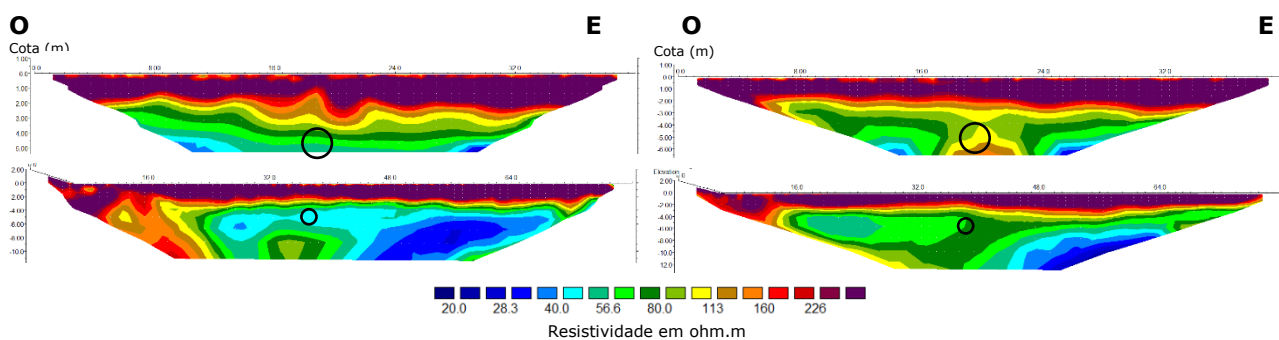


Figura 3 - Modelos obtidos para o local B (*Esquerda* – dispositivo de dipolo-dipolo. *Direita* – dispositivo de Wenner. *Topo* – DD=1,0 m. *Base* – DD=2,0 m)

Comparando a profundidade de deteção obtida com ambos os dispositivos com aquela do estudo conduzido por Apparao et al. (1997b) verifica-se que são idênticas.

No que diz respeito à relação entre a resistividade do alvo (ρ_{max}) face à do meio encaixante (ρ_{min}) dos resultados da inversão realizada na presente situação obteve-se uma relação de $\rho_{max}=7\rho_{min}$, ou seja, um contraste muito menor do que aquele obtido por Nawawi e Loke (1995).

As conclusões de Van Nostrand (1953), e os resultados de Apparao et al. (1997b) e de Nawawi e Loke (1995), levam a considerar que a não deteção do vazio criado pelo tubo de betão em todas as situações testadas poderá dever-se ao facto de a sua resistividade não diferir muito da do meio em que se encontrava inserido.

Deste caso de estudo conclui-se que o melhor dispositivo para deteção de alvos resistivos enterrados num ambiente resistivo é o de dipolo-dipolo, para qualquer distância dipolar compreendida entre 0,25D e

1,0D (sendo D o diâmetro do alvo), mas com uma relação profundidade-diâmetro do alvo em torno de 1,0D.

2.2 - Tubo enterrado

O tubo metálico de um gasoduto, com 25 cm de diâmetro, isolado exteriormente com uma manga de polietileno, tornando-o, assim, um alvo resistivo, encontrava-se enterrado numa zona aluvionar, próximo de uma ribeira (Fig. 4).

Desconhecia-se, à data da execução da prospeção geofísica, a posição exata do tubo e a profundidade a que este se encontrava, estimando-se que estaria a cerca de 2,5 m de profundidade, o que daria uma relação de 10D entre a profundidade a que o alvo se situava e o seu diâmetro. Esta relação afigurava-se como demasiado elevada para possibilitar a deteção do tubo, apesar de se encontrar num meio extremamente favorável - aterro e terrenos aluvionares (areias e lodos) - e muito saturado, e de se utilizar o dispositivo de dipolo-dipolo, o mais favorável para deteção deste tipo de estruturas, como se viu no exemplo anterior.

Atendendo à profundidade a que o gasoduto se encontrava, e ao seu diâmetro, a distância dipolar não poderia ser inferior a 0,5 m, nem superior a 1,0 m. Com a primeira, mais precisa, o gasoduto estaria no limite da profundidade de investigação e, com a segunda, dada a sua grande dimensão face ao alvo, seria muito difícil que permitisse a sua deteção. Assim, executou-se um primeiro perfil com 0,5 m de distância dipolar (Perfil A), correspondente ao dobro do diâmetro do tubo (2D). Com esta dimensão corria-se ainda o risco de, pelo efeito de fronteira (poucos dados no limite inferior da pseudo-secção), não se detetar o gasoduto, mas apenas a sua influência no campo elétrico gerado. Procurando atingir uma maior profundidade e, assim, evitar o efeito de fronteira, executou-se, no mesmo alinhamento, um segundo perfil (Perfil B) com uma distância dipolar 50% superior - 0,75 m - que permitiu atingir cerca de 4,0 m de profundidade. A 6 m de distância destes dois perfis, foi realizado um terceiro (Perfil C), igualmente com uma distância dipolar de 0,75 m.

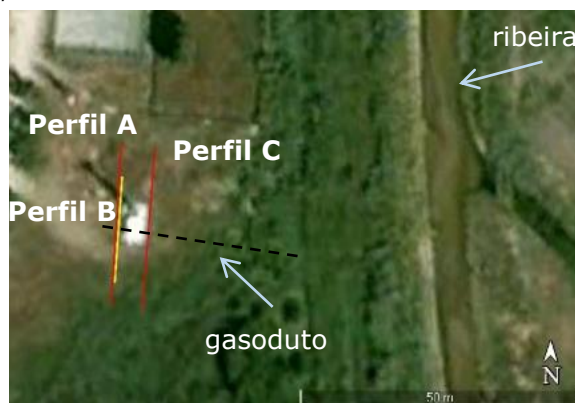


Figura 4 – Posicionamento dos perfis face ao gasoduto (posição aproximada) e à ribeira

Constam na Figura 5 os modelos de resistividade elétrica obtidos para cada perfil. Da sua análise verifica-se que não é identificável uma anomalia geofísica com a assinatura característica do alvo em questão - um pequeno círculo ou uma elipse de alta resistividade face ao meio envolvente. Identifica-se, apenas, uma interrupção na camada inferior, menos resistiva (resistividade elétrica inferior a 24 ohm.m), sensivelmente na posição onde era expectável que se encontrasse o gasoduto.

Posteriormente foi efetuada uma vala de prospeção, por meio da qual se verificou que, ao contrário do que inicialmente se supunha, o gasoduto estava a uma profundidade ainda maior - a cerca de 3 m de profundidade. Deste modo, a relação profundidade-diâmetro do tubo passou para 12D.

A análise dos modelos, conjugada com a informação obtida com a vala de prospeção, permitiu constatar que é identificável o posicionamento da vala aberta para a colocação do tubo, eventualmente a influência deste no campo elétrico gerado, mas não exatamente a sua localização. Assim, deste caso de estudo resulta que, para uma elevada relação profundidade/dimensão do alvo, será impossível detetar um alvo resistivo, embora seja possível detetar a sua presença.

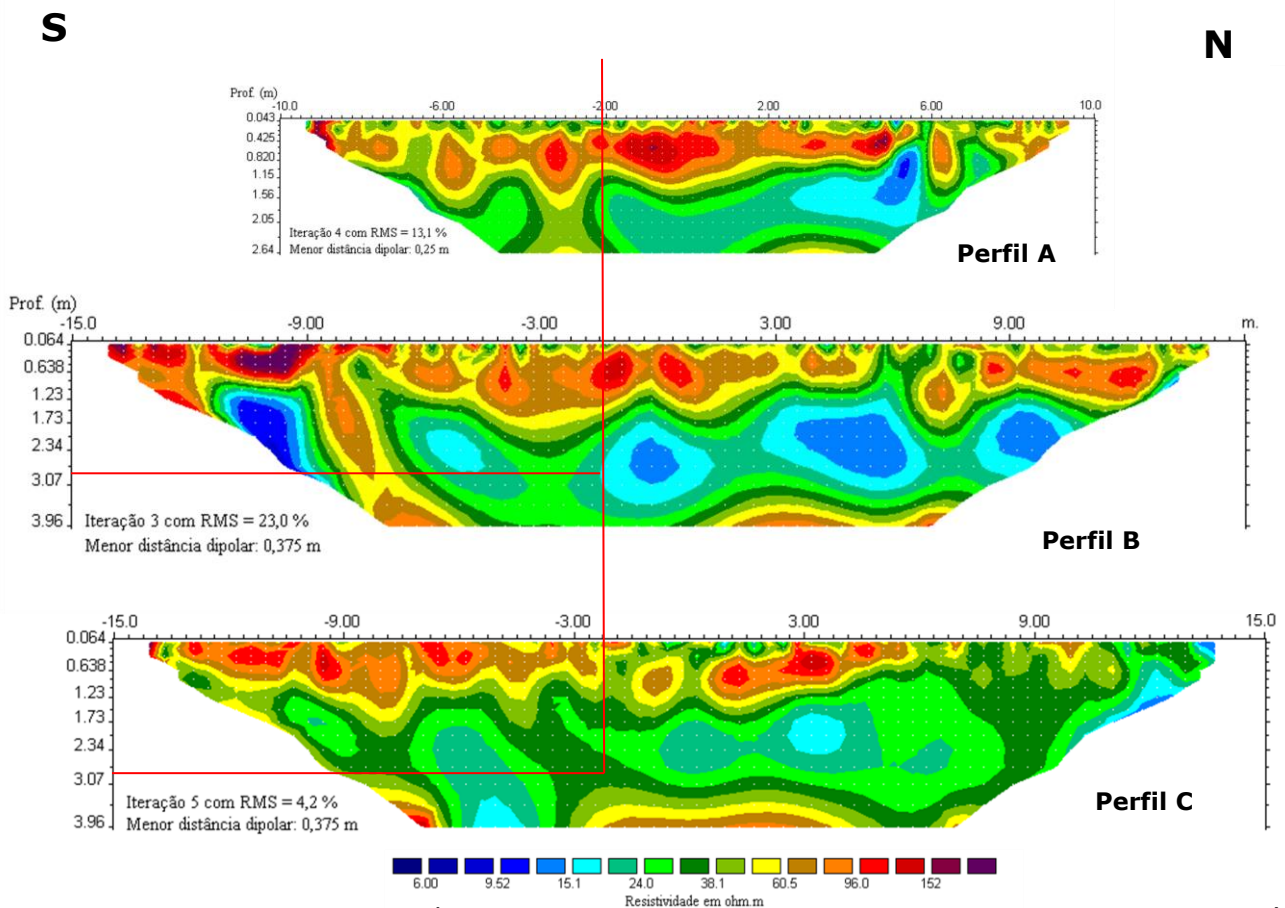


Figura 5 - Modelos de resistividade elétrica obtidos. O traço vertical a encarnado identifica a posição, comum aos três perfis, onde se encontra o tubo. Os traços horizontais identificam a profundidade a que foi encontrado o topo do tubo

2.3 - Auditório subterrâneo

No campus do LNEC efetuou-se um conjunto de perfis numa zona ajardinada junto a um edifício que possui no seu topo Oeste um auditório subterrâneo, situado parcialmente sob a extremidade desta zona de jardim (Fig. 6). Foram utilizados os dispositivos de medida de dipolo-dipolo e de Wenner. No primeiro com recurso a duas distâncias dipolares (1,0 m e 2,5 m), enquanto com o segundo apenas se utilizou a maior destas distâncias dipolares.



Figura 6 - Posicionamento do perfil face ao edifício

Apresentam-se na Figura 7 os modelos de resistividade elétrica obtidos. Da sua análise destacam-se os seguintes aspetos:

- O dispositivo de dipolo-dipolo permite uma boa identificação dos limites laterais da estrutura, especialmente o limite a Oeste, o que se deve ao facto de a injeção de corrente se encontrar a Oeste e os elétrodos a Este; contudo, o seu limite inferior fica mal resolvido;

- O dispositivo de Wenner não permite delimitar lateralmente a estrutura, mas já o consegue em termos de profundidade;
- Encontrando-se a estrutura alvo no limite (fronteira) da seção obtida, com a consequente redução de dados, é possível identificar-se a presença de um corpo resistivo, mas não a sua forma.

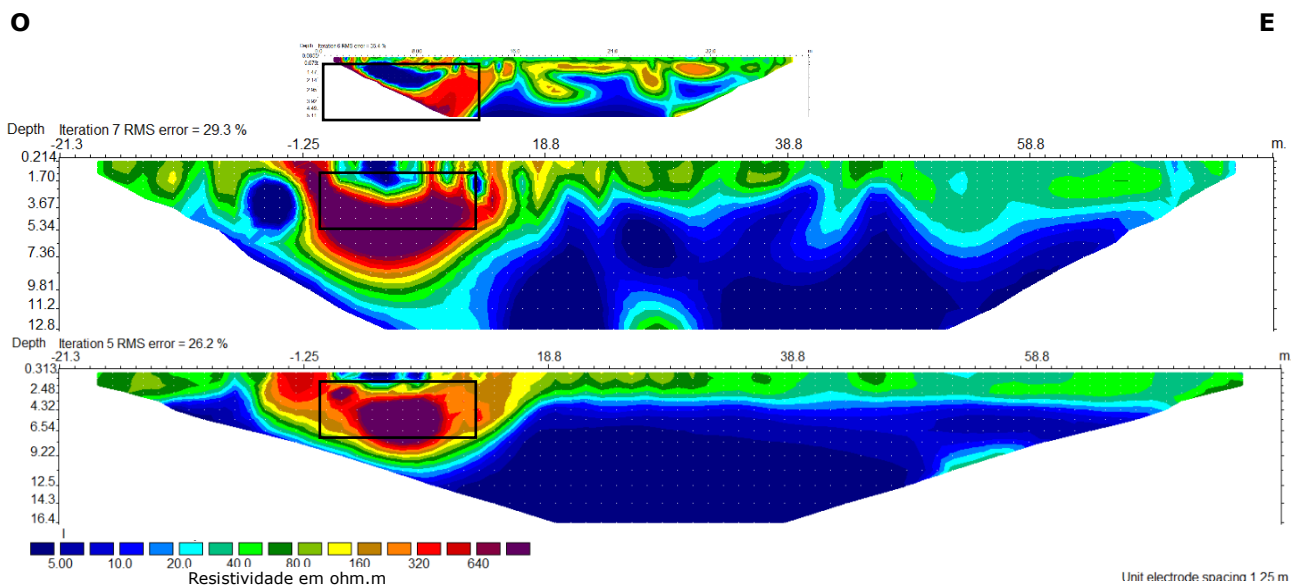


Figura 7 - Modelos de resistividade elétrica obtidos, representados com as mesmas escalas horizontal, vertical e numérica, e mantendo a posição relativa entre ambos os perfis. *Topo* – perfil obtido com o dispositivo de dipolo-dipolo (DD=1 m) e com início na extremidade Oeste da estrutura. *Centro e baixo* - modelos obtidos com DD=2,5 m, com a coordenada 0.0 na extremidade Oeste da estrutura, realizados, respetivamente, com o dispositivo de dipolo-dipolo e com o dispositivo de Wenner

2.4 - Aqueduto

Na fase de licenciamento de uma urbanização na serra de Carnaxide, foi assinalada a necessidade de se criar uma faixa de proteção ao Aqueduto das Francesas. Trata-se de um dos aquedutos tributários do antigo sistema de abastecimento de água a Lisboa, o Aqueduto das Águas Livres, e é anterior e independente do seu vizinho Aqueduto de Carnaxide (menos de 100 m de distância entre ambas as captações de água), mandado construir por D. José I em 1765, englobado nas obras de reconstrução da povoação após o sismo de 1755 (CNC, 2018; DGPC, 2018a; DGPC 2018b).

São visíveis dois alinhamentos de claraboias a Oeste e a Este da urbanização, pelo que esta teria que ser atravessada por um troço subterrâneo do aqueduto, muito provavelmente segundo uma linha que unisse os extremos destes alinhamentos (Fig. 8). Assim, foi imposta a criação de um jardim de proteção ao aqueduto, numa faixa de terreno por onde era expectável que este passasse.



Figura 8 – *Esquerda* - Aqueduto das Francesas (traços a cor amarela - troços ligando as claraboias, traço a cor azul - alinhamento provável do troço subterrâneo, traços a cor vermelha e a cor amarela transversais e formando 45° com o alinhamento – alinhamento dos perfis de resistividade elétrica). *Direita* – vala de prospeção

Atendendo a essa necessidade, e dado que essa faixa iria condicionar o desenho dos quatro lotes confinantes a Norte e a Sul, o urbanizador executou uma vala de prospeção numa orientação aproximadamente ortogonal ao alinhamento (Fig. 8), para aferir a real posição do aqueduto, e, assim, com maior certeza, dimensionar a faixa e a sua localização. Esta vala foi executada no limite Este da

urbanização, com apenas cerca de 1,5 m de profundidade, e não permitiu validar essa localização. Contudo, foi criada uma faixa com cerca de 20 m de largura abarcando o alinhamento entre as claraboias. Atendendo a este facto, posteriormente, em 2001, realizaram-se perfis de resistividade elétrica ortogonais e formando um ângulo de aproximadamente 45° com essa faixa de terreno, procurando, por esse meio, identificar a real posição do aqueduto, previamente à realização das fundações de uma habitação. Entretanto, em 2002/2003, no âmbito dos trabalhos para uma outra urbanização, de maior dimensão, situada a Este daquela em questão, foram realizados trabalhos arqueológicos pelo Centro de Estudos Arqueológicos do Concelho de Oeiras (serviço da Câmara Municipal de Oeiras), que permitiram caracterizar o aqueduto neste local. O troço colocado a descoberto encontrava-se, à data, a um pouco mais de 2 m de profundidade e possui cerca de 1 m de largura, na parte vazada, e uma largura total de aproximadamente 2 m (Fig. 9) (Cardoso, 2011). Este local encontra-se a uma cota inferior à daquele onde foram realizados os trabalhos de prospeção geofísica.



Figura 9 – Levantamento arqueológico de um troço do Aqueduto das Francesas, entre duas claraboias (Cardoso, 2011)

Em termos geológicos o local situa-se no complexo vulcânico de Lisboa, com espessuras variáveis de solos de cobertura e com elevada variação lateral do maciço rochoso, por vezes muito fraturado (Fig. 8).

Os perfis de resistividade elétrica ortogonais ao alinhamento foram executados com os métodos de dipolo-dipolo ($DD = 2\text{ m}$) e de Wenner ($DD = 1\text{ m}$ e $DD = 2\text{ m}$), enquanto no segundo alinhamento apenas se utilizou o dispositivo de dipolo-dipolo ($DD = 2\text{ m}$). No caso do alinhamento transversal à faixa de proteção, todos os perfis foram centrados no mesmo ponto. Constam na Figura 10 os modelos de resistividade elétrica obtidos no alinhamento transversal à faixa. Neste caso de estudo, por indisponibilidade atual dos ficheiros de dados, não é possível apresentar ambos os dispositivos com a mesma escala numérica. Assinalou-se com uma elipse o posicionamento do aqueduto no local onde ocorre a anomalia geofísica superficial de elevada resistividade ($> 80\text{ ohm.m}$) face ao ambiente envolvente, tendo por base as dimensões laterais inferidas a partir da prospeção arqueológica de 2002/2003, do que se conclui que o aqueduto estaria a cerca de 0,5 m de profundidade.

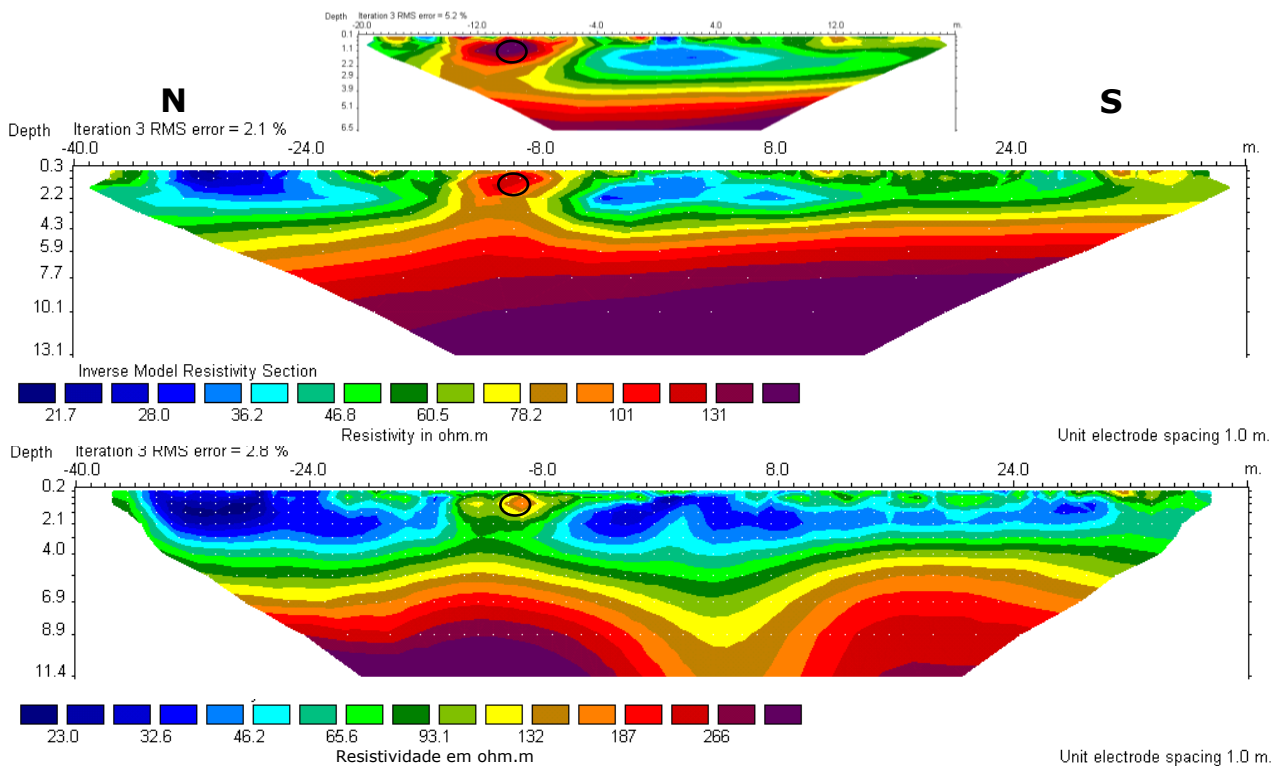


Figura 10 – Modelos de resistividade elétrica obtidos no Aqueduto das Francesas, no alinhamento ortogonal. *Topo e centro* – modelos obtidos com o dispositivo de Wenner, respetivamente com DD=1 m e DD=2 m. *Base* – modelo obtido com o dispositivo de dipolo-dipolo (DD=2 m)

Da análise ao posicionamento da anomalia obtida em cada modelo destaca-se que, com o dispositivo de Wenner o máximo da anomalia surge 1 m mais para Norte do que no dispositivo de dipolo-dipolo, o que se atribui ao modo de implantação dos elétrodos de injeção de corrente e de leitura do potencial elétrico gerado, distinto entre ambos os dispositivos. Na Figura 11 apresenta-se uma imagem do Google Earth enquadrando a faixa de proteção, a linha de união entre as claraboias do aqueduto a Oeste e a Este da urbanização, os perfis de resistividade elétrica executados e o local por onde passa efetivamente o aqueduto, com base nos resultados da prospeção geofísica realizada. Com base nesta imagem constata-se que, embora o aqueduto se encontre efetivamente dentro da faixa criada para a sua proteção, encontra-se afastado mais de 10 m para Sul face à linha de união entre as claraboias e muito próximo do limite Sul da faixa de proteção, quando se deveria encontrar a meio desta.



Figura 11 – Enquadramento, sobre imagem do Google Earth, da faixa de proteção do aqueduto (linha a traço interrompido de cor verde), linha de união entre as últimas claraboias visíveis a Oeste e a Este da urbanização (linha azul), perfis de resistividade elétrica (linhas de cor vermelha e amarela) e posição do aqueduto interpretada com base nos resultados dos modelos de resistividade elétrica obtidos (traços de cor azul clara)

2.5 - Caneiro

Teve lugar há cerca de 70 anos o encanamento da ribeira de Alcântara, a qual tem a sua nascente na Damaia, atravessa Benfica e desagua no rio Tejo, entre a gare-marítima de Alcântara e a doca de Santo Amaro.

Em parte do seu percurso por Benfica, nomeadamente junto à Quinta da Alfarrobeira, atualmente a sede da Junta de Freguesia de São Domingos de Benfica, a Câmara Municipal de Lisboa (CML) tinha cartografado dois trajetos alternativos, e, por via de obras a realizar no espaço, havia a necessidade de confirmar o real posicionamento do caneiro. Neste local a secção vazada do caneiro é de 6,22 m (Fig. 12). Para o efeito, realizaram-se perfis de resistividade elétrica segundo quatro alinhamentos (Fig. 12) no espaço disponível – limitado por muros e edifícios. Estes perfis foram materializados com base no dispositivo de dipolo-dipolo, com uma distância dipolar de 1 m. Com esta dimensão dipolar a profundidade máxima de investigação (cerca de 5 m) pouco ultrapassa a dimensão máxima vertical vazada do caneiro (4,0 m); contudo, como o que se pretendia era identificar o local por onde passa o caneiro e não toda a sua estrutura. Optou-se ainda por esta dimensão, para evitar que o traçado mais a Norte ficasse demasiado no extremo do modelo, onde a profundidade de investigação se reduz rapidamente, e a precisão é menor, devido à menor cobertura de dados, tal como se exemplificou anteriormente.



Figura 12 - Caneiro da ribeira de Alcântara, junto à Quinta da Alfarrobeira. Esquerda – secção tipo (Fonte: CML) Direita - alinhamento alternativo do caneiro (linha a traço cheio de cor laranja e linha a traço interrompido de cor preta) e perfis de resistividade elétrica (linhas a traço cheio de cor azul) (adaptado de desenho facultado pela CML)

É de destacar o facto de os alinhamentos dos perfis não serem exatamente ortogonais ao caneiro, o que tem implicações na sua dimensão interpretada nos modelos de resistividade elétrica, assim como o facto de o Perfil 4 fazer uma inflexão a 3 m do seu extremo oeste, passando para de uma orientação O-E, para NO-SE, o que levou a que se optasse por fazer dois processamentos dos dados deste perfil, sendo um deles truncado no ponto de inflexão (Fig. 13). Neste caso de estudo, os modelos são apresentados com a visão do observador virado para jusante, ou seja, para Este. Assinalou-se nos modelos o caneiro, com uma chave de cor azul, com base na interpretação geofísica. Procedeu-se, posteriormente, à sobreposição da secção-tipo do caneiro sobre os modelos, para avaliar a interpretação geofísica da sua dimensão, tendo ainda em conta a informação resultante de valas de prospeção executadas posteriormente, que a face superior do caneiro se encontra a cerca de 1 m de profundidade. Verifica-se, assim, que a diferença não é muito significativa, tendo em conta que os perfis não são exatamente ortogonais ao caneiro. Verifica-se, ainda, que a parede Norte do caneiro possui melhor definição do que a parede Sul, o que se deve, tal como se salientou em 2.3, ao modo como são colhidos os dados – neste caso de Norte para Sul.

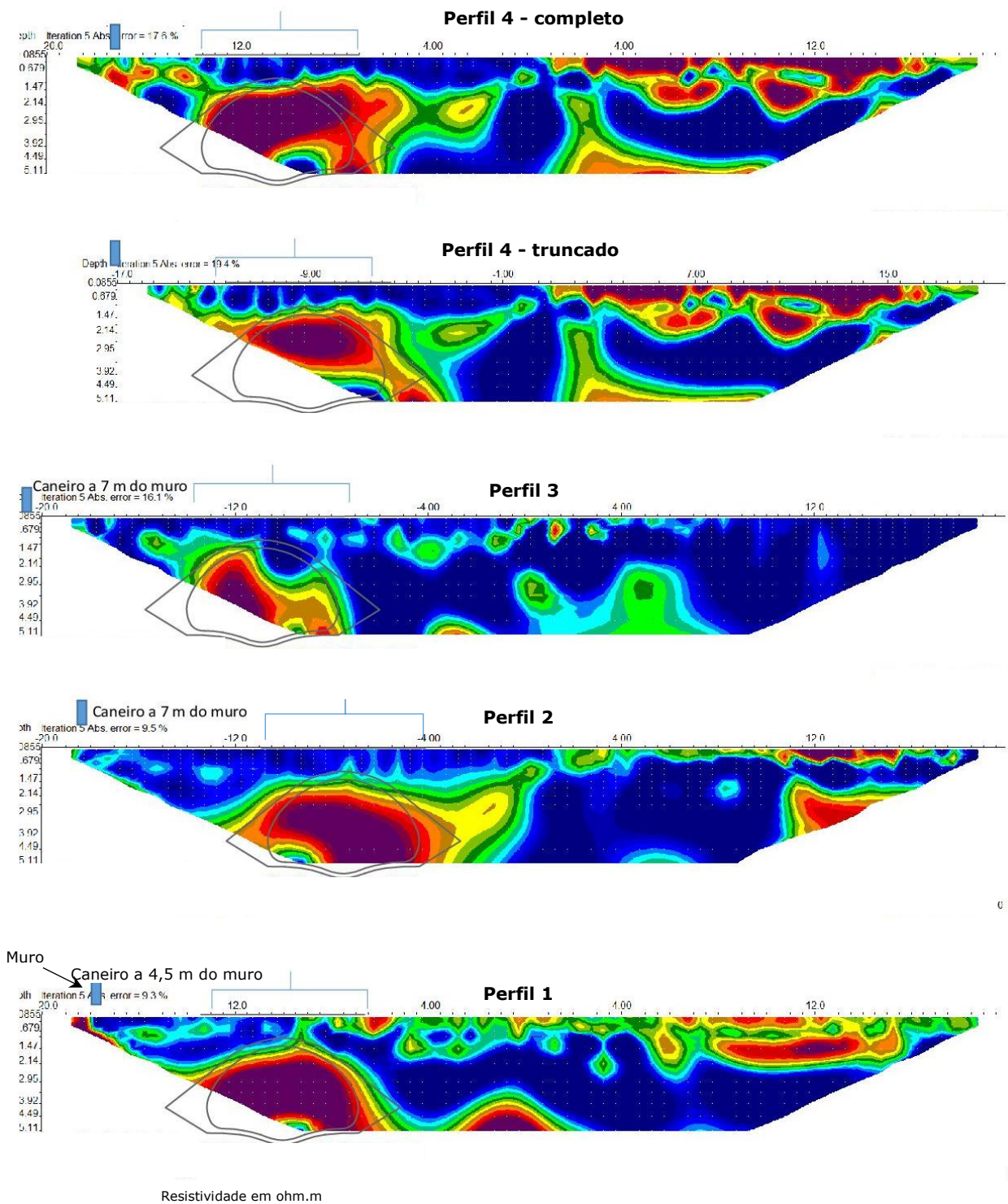


Figura 13 - Modelos de resistividade elétrica obtidos, com sobreposição da seção-tipo do caneiro (à escala)

Sobre uma imagem do Google Earth foram marcados os limites do caneiro em cada perfil e unidos esses pontos, permitindo, assim, visualizar no espaço o seu real posicionamento (Fig. 14).

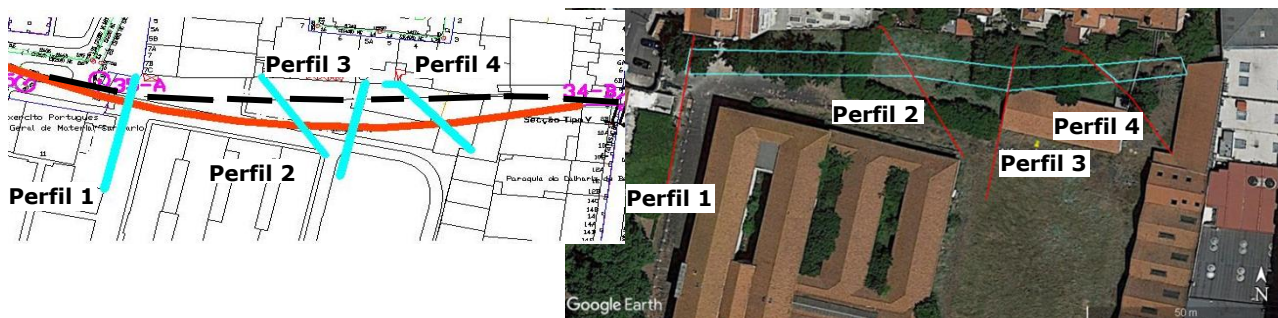


Figura 14 - Posicionamento do caneiro a partir da interpretação dos perfis de resistividade elétrica

Estando o espaço ocupado com um estacionamento automóvel, procedeu-se no terreno à marcação do local interpretado como sendo o centro do caneiro no Perfil 2, para posterior validação direta dos resultados obtidos (detecção do caneiro) através da execução de valas de prospeção. Com as valas executadas nesse local e em outros dois situados entre este e o perfil 3, foi possível confirmar os resultados obtidos com a prospeção geofísica, ou seja, que o caneiro se encontra a cerca de 1 m de profundidade e segundo o alinhamento mais a Norte.

3 - CONCLUSÕES

Resumem-se no Quadro 1 as diversas condições de aplicação do método da resistividade na deteção de alvos resistivos, nos casos de estudo apresentados. Da análise deste quadro, e dos resultados obtidos, conclui-se que:

- De entre os dispositivos mais simples de implementar no terreno – dipolo-dipolo e Wenner – para a realização de perfis de resistividade elétrica, o mais adequado para a deteção de estruturas resistivas enterradas é o de dipolo-dipolo;
- Uma elevada relação entre a profundidade a que se encontra o alvo e a sua dimensão, dificulta muito a sua clara identificação, sendo apenas possível detetar a sua presença, pela influência que provoca no campo elétrico gerado;
- Para se melhorar a definição lateral das estruturas com recurso ao dispositivo de dipolo-dipolo – o que melhor responde às variações laterais (verticais) da resistividade elétrica -, os dados de resistividade elétrica deveriam ser obtidos com leituras em ambos os sentidos do perfil, o que origina uma duplicação do trabalho e, conseqüentemente do tempo necessário à sua execução - considerando que o que se pretende é determinar o local onde, numa determinada área, se encontra uma estrutura vazada, então não haverá necessidade de se aumentar a precisão na definição lateral da estrutura, uma vez que isso implicaria um aumento do custo associado à prospeção, sem que ocorresse um incremento equivalente no objetivo do estudo;
- Os alvos não devem estar demasiado próximo dos limites inferiores da secção tomográfica, sob pena de elevada perda de resolução.

Quadro 1- Quadro resumo das características técnicas de cada caso de estudo

Alvo	A	B	C	D	E
Passagem hidráulica	0,5	DD, W			
	1,0	DD, W	2,0	0,825D e 1,86D	7
	2,0	DD, W			
Tubo	0,50	DD	0,25	12D	12
	0,75				
Auditório	1,0	DD, W	13,0	0,07D	>32
	2,5				
Aqueduto	0,5	DD, W	2,0	0,25D	6
	1,0				
Caneiro	1,0	DD	6,22*	<0,16D	>10

Notas: A – distância dipolar (m)

B – dispositivo utilizado (DD – dipolo-dipolo; W - Wenner)

C - dimensão lateral da estrutura (m)

D - razão profundidade/dimensão

E - razão ρ_{max}/ρ_{min}

(*) – a secção das paredes é variável, pelo que apenas se indica a secção vazada

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Prof. José Cardoso a confirmação das dimensões do Aqueduto das Francesas e à Câmara Municipal de Lisboa, a autorização para a publicação dos resultados respeitantes ao caneiro de Alcântara.

REFERÊNCIAS

- Apparao A., Srinivas, G.S. e Sarma, V.S. (1997a) - Physical modelling results on modified pseudodepth sections in exploration of highly resistive targets. *Pure Appl. Geophys.*, 150 (2), 341-352.
- Apparao A., Sastry R.S. e Sarma V.S. (1997b) - Depth of detection of buried resistive targets with some electrode arrays in electrical prospecting. *Geophys. Prospect.*, 45, 365-375.
- Cardoso, J.L. (2011) - Centro de Estudos Arqueológicos do Concelho de Oeiras (Câmara Municipal de Oeiras): balanço de vinte anos de actividade e perspectivas futuras de actuação. *Encontro Arqueologia e Autarquias*, Cascais.
- Centro Nacional de Cultura (2018) - http://www.e-cultura.sapo.pt/patrimonio_item/3561, acedido em 08/02/2018.
- DGPC (2018a) - <http://www.patrimoniocultural.gov.pt/pt/patrimonio/patrimonio-imovel/pesquisa-do-patrimonio/classificado-ou-em-vias-de-classificacao/geral/view/70216>, acedido em 08/02/2018.
- DGPC (2018b) - <http://www.patrimoniocultural.gov.pt/pt/patrimonio/patrimonio-imovel/pesquisa-do-patrimonio/classificado-ou-em-vias-de-classificacao/geral/view/70880>, acedido em 08/02/2018.
- Loke, M.H. e Barker, R. (1996) - Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523
- Mota, R. (2017) - Prospecção geofísica pelo método da resistividade elétrica. *Gazeta de Física*, Vol. 40, 3-4, 26-29.
- Nawawi, M.N.M. e Loke, M.H. (1995) - Mapping voids and other man-made subsurface structures using 2D resistivity imaging technique. *57th Annual Meeting, European Association of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts*, D033.
- Van Nostrand, R.G. (1953) - Limitations on resistivity methods as inferred from the buried sphere problem. *Geophysics*, 18, 423-433.