

# **APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS NA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS DE RESÍDUOS**

## **GEOPHYSICAL METHODS APPLIED TO THE DETECTION OF DEFECTS IN LANDFILL LINERS**

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

### **RESUMO**

As geomembranas constituem parte dos sistemas de impermeabilização dos aterros de resíduos. Apresentam defeitos, inerentes, na sua esmagadora maioria, aos trabalhos de instalação das geomembranas e da colocação da camada drenante (Lopes, 2006). A não-integridade das geomembranas constitui um dos problemas associados aos aterros de resíduos, devido à potencial contaminação das águas subterrâneas, pelo lixiviado proveniente destas instalações. A identificação dos caminhos preferenciais para a migração do lixiviado, e das conseqüentes plumas de contaminação, é uma das aplicações dos métodos geofísicos, nomeadamente dos geoeléctricos (e.g., Bernstone et al., 1996; Mota, 2006; Mota, 2007). Apresentam-se, na presente comunicação, exemplos de aplicação do método da resistividade eléctrica em aterros de resíduos e analisam-se os métodos de avaliação da integridade das geomembranas, com particular destaque nas suas vantagens e desvantagens.

### **ABSTRACT**

Lining system of landfills comprises geomembranes. These materials present defects mainly due to its installation works and drainage layer placement (Lopes, 2006). Damaged geomembranes his one of the main problems associated to landfills, due to the potential contamination of groundwater by the leachate that flows from the landfill. Identification of the preferential pathways for leachate migration and of the consequent contaminating plume is one of the applications of geophysical methods, namely the resistivity (e.g., Bernstone et al., 1996; Mota, 2006; Mota, 2007). Examples of results of application of the resistivity method to landfill surveys are presented and methods of detection of geomembrane defects are analysed.

### **1. INTRODUÇÃO**

As geomembranas constituem parte dos sistemas de impermeabilização dos aterros de resíduos. Apresentam defeitos, inerentes, na sua esmagadora maioria, aos trabalhos associados à sua instalação e à colocação da camada drenante (Lopes, 2006). A não-integridade das geomembranas constitui um dos problemas associados aos aterros de resíduos, devido à potencial contaminação das águas subterrâneas, pelo lixiviado proveniente destas instalações. A identificação dos caminhos preferenciais para a migração do lixiviado, e das conseqüentes plumas de contaminação, é uma das aplicações dos métodos geofísicos, nomeadamente dos geoeléctricos – electromagnéticos e de resistividade eléctrica por corrente contínua (e.g., Bernstone et al., 1996; Mota, 2006; Mota, 2007). A propriedade física, envolvida no método da resistividade eléctrica por corrente contínua, é a resistividade eléctrica do meio, a qual, será tanto mais baixa, quanto maior for a concentração de sais presentes no electrólito que preenche, total ou parcialmente, os vazios do meio em questão.

Os mesmos princípios básicos do método de prospecção geofísica pela resistividade eléctrica, nomeadamente a injeção de corrente eléctrica no meio, e medição da sua resposta, em termos de diferença de potencial eléctrico, têm vindo a ser utilizados na detecção de defeitos em geomembranas nos sistemas de impermeabilização dos aterros de resíduos (e.g., Lopes, 2006).

Até há cerca de 15 anos, os métodos de prospecção geofísica exigiam grandes meios e equipas alargadas – quase uma dezena de elementos para realizar um perfil, para além do tempo que demorava a sua execução. Hoje em dia, com os sistemas semi-automáticos de cabos multi-condutores, esta situação alterou-se substancialmente. No caso dos testes de integridade das geomembranas instaladas em aterros de resíduos, encontramos-nos na fronteira entre estas duas situações – existem sistemas automáticos (permanentes) e sistemas manuais, demorados e que exigem equipas numerosas para cobrir rapidamente a área a testar.

## 2. O MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉCTRICA

A prospecção geofísica por métodos eléctricos baseia-se na geração de um campo eléctrico, através da injeção de corrente eléctrica no terreno por meio de dois eléctrodos metálicos, e na medição da diferença de potencial eléctrico entre dois outros eléctrodos.

As variações mais significativas do campo eléctrico podem corresponder a heterogeneidades litológicas ou a anomalias de resistividade dos materiais. O grau de variação da distribuição de potenciais depende do contraste de resistividade entre as estruturas subsuperficiais anómalas e o meio envolvente, dependendo ainda, a detecção das anomalias, da sua posição relativa face ao dispositivo utilizado. Tendo em conta que a corrente eléctrica se propaga no terreno através do electrólito composto pela água existente nos vazios do solo e pelos sais nela dissolvidos, a resistividade depende não só da porosidade do material que compõe o terreno, como também do seu teor em água e do nível de iões nela dissolvidos.

### 2.1. Dispositivos de prospecção geoeléctrica

Existem diversos dispositivos de prospecção geoeléctrica todos eles tetraelectródicos, sendo dois eléctrodos de potencial ( $M$  e  $N$ ) e dois de corrente ( $A$  e  $B$ ), tal como se representa no esquema apresentado na Figura 1:

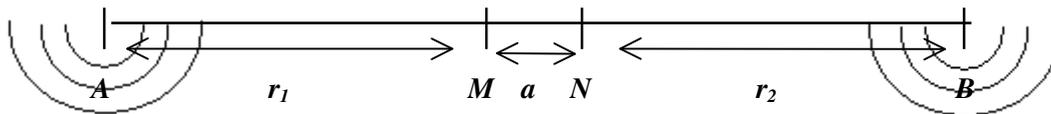


Figura 1 – Dispositivo tetraelectródico, com as equipotenciais teóricas correspondentes a um semi-espaço homogéneo e isotrópico.

Teoricamente, a diferença de potencial eléctrico  $\Delta V$  existente entre os pontos  $M$  e  $N$ , respectivamente às distâncias  $r_1$  e  $r_2$  dos eléctrodos  $A$  e  $B$ , onde é injectada a corrente eléctrica  $I$ , num semi-espaço de resistividade eléctrica  $\rho$ , homogéneo e isotrópico, é dada por:

$$\Delta V = G \frac{I \rho}{2\pi} \quad (1)$$

onde:

$\Delta V$  - diferença de potencial eléctrico, entre os pontos  $M$  e  $N$  (V);

$G$  - factor geométrico (depende da configuração electródica utilizada e tem por finalidade compensar a dependência do campo eléctrico criado, com a distância entre os pontos de injeção e os de medida – o campo eléctrico diminui à medida que aumenta a distância ao ponto de origem);

$I$  - intensidade da corrente eléctrica injectada no terreno (A (Amperes));

$\rho$  - resistividade eléctrica do meio (ohm.m);

$2\pi$  - constante correspondente ao semi-espaço considerado.

Uma vez que, apenas teoricamente, estamos perante um meio homogéneo e isotrópico, temos que considerar a contribuição da resistividade de todos os materiais que serão atravessados pela corrente eléctrica. Assim, a resistividade eléctrica do meio que se obtém, na realidade não é uma resistividade

óhmica, mas sim uma resistividade eléctrica aparente ( $\rho_a$ ), cuja expressão de cálculo se obtém da equação anterior:

$$\rho_a = 2\pi G \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

Uma sondagem eléctrica vertical pode ser realizada com um dispositivo do tipo Wenner, em que as distâncias entre eléctrodos (distância dipolar) são sempre iguais entre si ( $AM=MN=NB=a$ ), ou com o dispositivo de Schlumberger, onde a distância  $a$  é menor do que as distâncias  $AM$  e  $NB$ . As sondagens eléctricas verticais consistem na medição da resistividade aparente com intervalos crescentes das distâncias entre eléctrodos, mantendo fixo o ponto central. A interpretação das sondagens eléctricas verticais é feita a partir da representação das resistividades aparentes medidas, *versus* semi-espacamento entre eléctrodos de injeção ( $AB/2$ ), num gráfico bi-logarítmico.

Com qualquer destas configurações é possível efectuar-se mapeamentos de uma área, mantendo-se, para o efeito, o espaçamento entre os eléctrodos com uma dimensão fixa e percorrendo-se a área em estudo, segundo uma malha pré-definida.

O dispositivo de dipolo-dipolo (Figura 2) é, igualmente, um dispositivo tetraelectrónico, diferindo dos anteriores pelo facto de a injeção de corrente ser feita nos dois primeiros eléctrodos (dipolo de injeção) e de as leituras de potencial serem feitas nos dois seguintes (dipolo de leitura), avançando ao longo de um alinhamento, normalmente até perfazer, pelo menos, 10 leituras, após o que o dipolo de injeção avança para a posição seguinte no alinhamento, repetindo-se o processo de leituras, e assim sucessivamente até ao fim do alinhamento (perfil). Os valores de resistividade aparente assim obtidos são representados sob a forma de pseudo-secção bidimensional de resistividades.

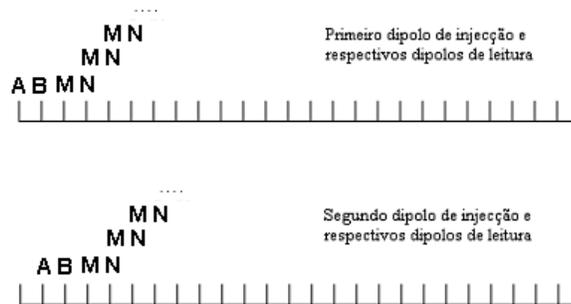


Figura 2 – Esquema de injeções de corrente e leitura de potenciais do dispositivo de dipolo-dipolo.

Normalmente, os dispositivos de Schlumberger e Wenner são utilizados para investigar locais onde se prevê que os contrastes de resistividade são mais significativos na vertical, enquanto que o dispositivo de dipolo-dipolo é mais utilizado em situações de maior gradiente da resistividade na direcção horizontal.

Na Figura 3 apresenta-se o exemplo de um meio dividido em três camadas distintas com resistividades que aumentam com a profundidade. É notória a influência que os contrastes de resistividade entre os três meios produzem nas equipotenciais do campo eléctrico. Estas deixam de ser superfícies semi-esféricas (situação ideal de um meio homogéneo) centradas nos eléctrodos de injeção de corrente eléctrica. Estas variações são detectadas à superfície com os eléctrodos de medição da diferença de potencial eléctrico. Processando os dados é possível detectar a que profundidade ocorre cada interface, e assim construir o modelo de resistividade eléctrica do meio (dá-se a este processo o nome de *resolução do problema inverso*).

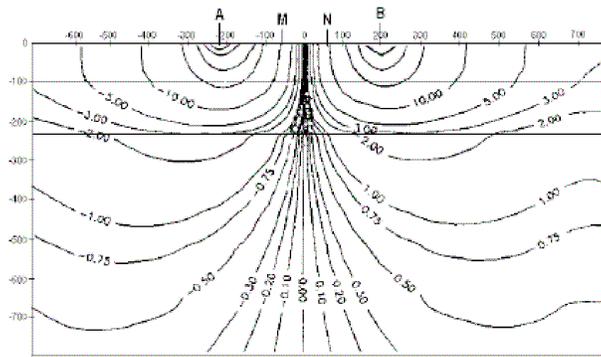


Figura 3 – Modelo de um meio constituído por três camadas de resistividade eléctrica crescente com a profundidade (Miranda et al, 2009).

## 2.2. Tomografias de resistividade eléctrica

As tomografias de resistividade eléctrica resultam da inversão da pseudo-secção de resistividades aparentes, obtidas com um dispositivo constituído por um alinhamento de eléctrodos, interligados através de um cabo multi-condutor, e representam, graficamente, uma imagem bidimensional do terreno em profundidade, em termos de resistividade.

A metodologia de trabalho consiste, basicamente, na disposição em linha de eléctrodos igualmente espaçados entre si e ligados ao cabo multi-condutor, encontrando-se este ligado ao resistivímetro. O sistema injecta automaticamente corrente eléctrica no terreno (eléctrodos  $C_1$  e  $C_2$ ) e procede à medição da diferença de potencial eléctrico assim gerado (eléctrodos  $P_1$  e  $P_2$ ). Estas leituras podem ser realizadas, entre outros, segundo os dispositivos dipolo-dipolo, polo-dipolo e Wenner. Se o perfil que se pretende executar, não fica totalmente coberto pelo dispositivo, então, após se concluir a leitura dos dados, com recurso a todos os pontos instalados, procede-se à recolha da última bobine de cabo e à sua instalação à frente da primeira bobine, repetindo-se todo o processo de leitura na nova posição, e, assim sucessivamente, até se atingir a dimensão desejada para o perfil. Este procedimento tem a designação de avanços sucessivos.

Na figura seguinte, apresenta-se, como exemplo, o modelo resultante da aplicação do método de resistividade eléctrica, com base no dispositivo de dipolo-dipolo, numa célula em exploração de um aterro sanitário.

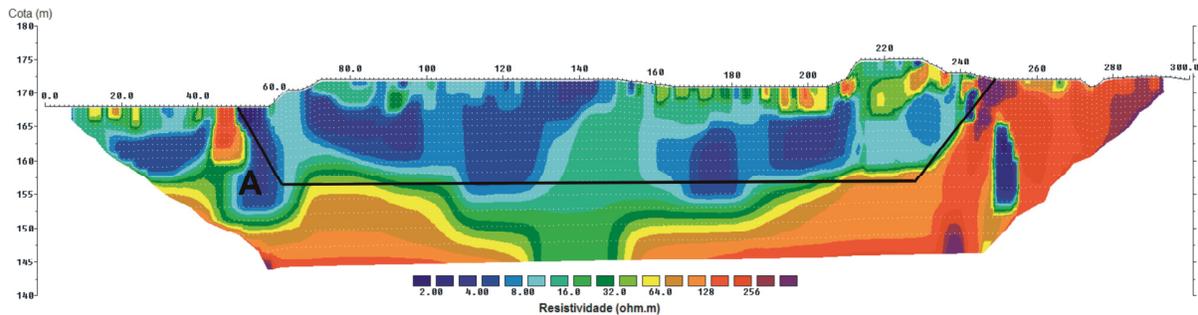


Figura 4 - Modelo de resistividade eléctrica, de um perfil realizado numa célula em exploração, com recurso ao dispositivo de dipolo-dipolo, com distâncias dipolares de 5 m.

Este perfil, que fez uso da técnica dos avanços sucessivos, demorou cerca de 4 horas a instalar e a proceder à recolha de dados, com recurso a um sistema de cabos com multi-condutores, e com uma equipa de 4 pessoas. Com os sistemas em uso até há uma década atrás, demoraria pelo menos 10 vezes mais tempo, e com recurso a uma equipa maior.

No modelo de resistividade eléctrica obtido, e apresentado na Figura 4, é identificável, no local assinalado pela letra A, uma região de baixa resistividade eléctrica. Esta região encontra-se fora da

célula e, portanto, além do sistema de confinamento. Dadas as características e posição desta anomalia de resistividade eléctrica, a mesma é correlacionada prioritariamente com uma pluma de lixiviado que migra a partir da pilha de resíduos. Este facto não deveria ocorrer, uma vez que existe um sistema basal de isolamento da célula, que tem por função impedir a migração de lixiviado para o seu exterior. A existência de fugas através de defeitos existentes no sistema de isolamento deveria ser avaliada previamente à fase de exploração do aterro, uma vez que é impossível remendar esses defeitos com pilhas de resíduos com vários metros de altura, para além de se desconhecer a sua localização precisa. O impacte para o meio ambiente resultante destes defeitos é por demais evidente, o que acentua a importância dos métodos de ensaio para detecção de defeitos das geomembranas que constituem parte do sistema de isolamento basal de um aterro de resíduos sólidos.

### 3. MÉTODOS DE ENSAIO PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM GEOMEMBRANAS QUE AFECTAM A SUA ESTANQUEIDADE

Existem cinco métodos de ensaio para verificação da integridade, em termos de estanqueidade, da geomembrana (Lopes 2006): dois são indicados para geomembrana não-coberta (ensaio da poça de água e ensaio da faísca eléctrica); o terceiro, apenas é utilizado com a geomembrana coberta (sonda eléctrica móvel) e, os restantes dois, podem ser utilizados em ambas as situações (sistema fixo de detecção de fugas e ensaio da geomembrana condutora). Todos estes métodos fazem uso da circulação de uma corrente eléctrica e, por consequência, baseiam-se no princípio que um defeito que afecta a estanqueidade da geomembrana se comporta de modo equivalente ao fecho de um circuito eléctrico, o que permite assim localizar a sua presença. Tendo em consideração que, cerca de 3/4 deste tipo de defeitos, ocorre durante o processo de colocação da camada drenante (Nosko et al. 1996 *in* Lopes 2006), torna-se evidente que os ensaios para utilização com a camada drenante já colocada, são os mais adequados, pelo que apenas estes serão aqui analisados.

O ensaio com o sistema fixo de detecção de fugas consiste na instalação de uma malha de sensores previamente à colocação da geomembrana (Figura 5). Estes sensores estão interconectados e ligados a um sistema de aquisição de dados, ao qual também se encontram ligados pares de eléctrodos, através dos quais se procederá à injeção de corrente eléctrica no terreno. Um dos eléctrodos encontra-se fora do sistema isolado e o outro na camada que cobre a membrana. Quando se aplica uma corrente eléctrica a estes eléctrodos é gerado um campo eléctrico que será medido pelos sensores. Dado que as camadas superior e inferior são homogéneas, este campo será homogéneo, apresentando o seu potencial eléctrico um decaimento natural com a distância aos eléctrodos de injeção. Qualquer variação diferente deste decaimento será devida a uma passagem de corrente por um defeito, cuja posição será identificada através de um programa informático adequado. Este método possui ainda a vantagem de permitir realizar a monitorização do comportamento da geomembrana durante o processo de exploração do aterro. No entanto, é o mais caro de todos os existentes.

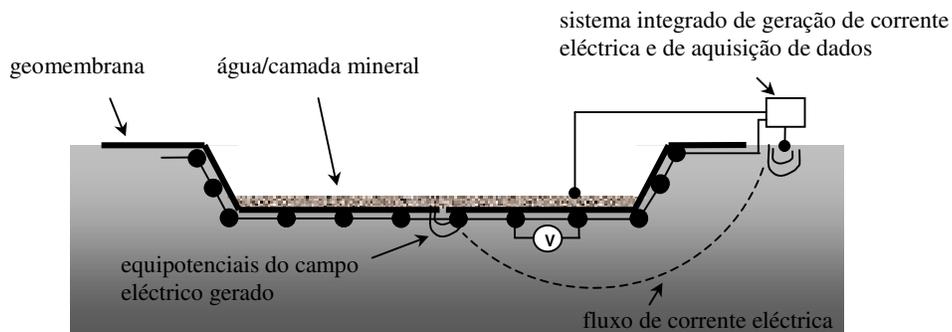


Figura 5 – Esquema do método de ensaio com sistema fixo de detecção de fugas (adaptado de CFGG, 2003).

O princípio do método de ensaio da sonda móvel é idêntico ao do sistema fixo, com a diferença que a medição do potencial do campo eléctrico gerado é realizada na camada superior, através de uma sonda

móvel constituída por um par de eléctrodos com uma distância fixa (Figura 6). As vantagens deste método face ao anterior são o seu custo e a maior flexibilidade, uma vez que, embora as medições do potencial ocorram segundo uma malha fixa, na presença de uma anomalia do potencial eléctrico a malha pode ser apertada para melhor localizar o defeito. A grande desvantagem deste método, face ao sistema fixo, é a sua morosidade, uma vez que as leituras são manuais e a sonda tem que ser deslocada entre cada nó da malha, enquanto que no sistema fixo, as leituras são automáticas.

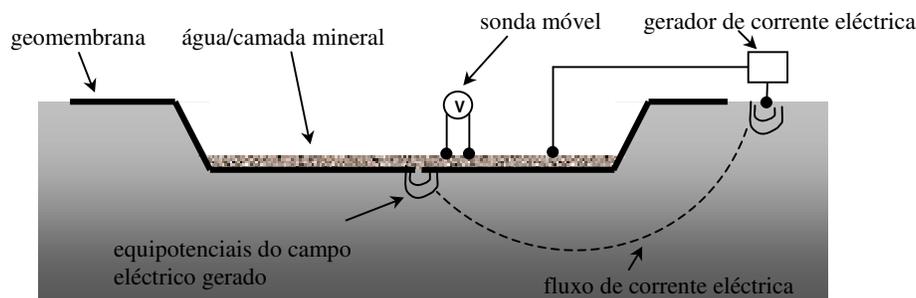


Figura 6 – Esquema do método de ensaio com sonda móvel (adaptado de CFGG, 2003).

Ambos estes métodos resultam da aplicação do já mencionado dispositivo de Wenner.

Em qualquer dos métodos mencionados, para ocorrer uma boa transmissão da corrente eléctrica, é essencial que o material que cobre a geomembrana, e aquele subjacente a esta, contenham alguma água. Experiências realizadas por Beck et al (2008), com geocompósitos bentoníticos, permitiram estimar um valor de teor em água que deverá variar entre 12 e 24 %.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tal como o perfil de resistividade eléctrica apresentado demonstrou, a avaliação da estanqueidade do sistema de confinamento de uma célula de deposição de resíduos é forçosamente necessária, para se garantir que, à partida, não será pela base desta estrutura que existirão riscos de contaminação do meio ambiente em que ela ficará inserida para sempre.

Considerando o desenvolvimento que os métodos geofísicos tiveram, e respectivas aplicações, devido ao aparecimento de equipamentos ligeiros e automáticos, e de programas informáticos capazes de lidar com inúmeros dados e produzir modelos fiáveis num curto espaço de tempo, afigura-se como um passo natural para os métodos de ensaio de estanqueidade de geomembranas, a sua evolução para dispositivos automáticos ou semi-automáticos. Estes dispositivos poderão combinar as vantagens de ambos os métodos fixo e de sonda móvel, permitindo reduzir o número de técnicos e o tempo necessário para realizar o ensaio das células de deposição de resíduos, ou outras estruturas idênticas, diminuindo assim os correspondentes custos de ensaio e tornando mais viável a sua utilização corrente.

#### AGRADECIMENTOS

A presente comunicação é uma contribuição para o projecto financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia PTDC/AAC-AMB/102846/2008.

#### REFERÊNCIAS

Beck, A., Kramer, E., Smith, M.. (2008). “Specifications for moisture content of GCL to perform electrical leak location surveys”, *EuroGeo4, Paper n° 279*.

- Bernstone, C., Dahlin e T. (1996). "Electromagnetic and DC resistivity mapping of waste deposits and industrial sites - experiences from Southern Sweden", EAGE-96, Amsterdam, pp. M014.
- CFGG (2003). "Présentation de méthodes de détection et de localisation de défauts dans les dispositifs d'étanchéité par géomembranes", Comité Français Géosynthétiques, France.
- Lopes, M.G.A. (2006). "Análise dos métodos de controlo de integridade de geomembranas de PEAD usadas em aterros de RSU", Geotecnia, nº 106, pp. 107-131.
- Miranda, J. M., Luís, J. F., Teves-Costa, P., Monteiro dos Santos, F. (2009). Fundamentos de Geofísica in [http://www.cgul.ul.pt/docs/Cap5\\_Geoelectricidade.pdf](http://www.cgul.ul.pt/docs/Cap5_Geoelectricidade.pdf).
- Mota, R. (2006). Metodologias de prospecção geofísica aplicadas a problemas ambientais e geotécnicos. Aplicação conjunta de métodos eléctricos e sísmicos. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, 215 p.
- Mota, R. (2007). Técnicas geofísicas aplicadas no reconhecimento e monitorização de aterros de resíduos in Actas do Seminário Geotécnico de Aterros de Resíduos, LNEC, Lisboa.
- Nosko, V., Andrezal, T., Gregor, T. e Ganier, P. (1996). "SENSOR damage detection system (DDS) – the geomembrane testing method". Proceedings of 1<sup>st</sup> European Geosynthetic Conference, Maastrich, pp. 743-748.

