

MARTIM PORTUGAL V. FERREIRA
Coordenação

A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos

VOL. 1 • GEOLOGIA DE ENGENHARIA



Coimbra • Imprensa da Universidade

MONITORIZAÇÃO DO ATERRO MULTIMUNICIPAL DO CENTRO, COIMBRA

F. P. O. FIGUEIREDO¹, N. E. V. RODRIGUES² e A. I. S. ANDRADE³

PALAVRAS CHAVE: aterro sanitário, monitorização, método eléctrico de resistividade e dispositivos tripotenciais.

KEYWORDS: landfill, monitorization, resistivity method and tripotencial array.

RESUMO

Este trabalho descreve a instalação de um sistema protótipo de monitorização da célula A do Aterro Multimunicipal do Centro, com utilização do método eléctrico de resistividade e apresentam-se os resultados obtidos com o sistema referido. Com este sistema pretendeu-se localizar e avaliar o avanço de plumas de contaminação, no caso de fuga de lixiviados, e detectar possíveis rupturas na tela de impermeabilização. O sistema instalado é o primeiro do género em Portugal, consistindo basicamente num conjunto de 72 eléctrodos dispostos segundo uma malha quadrada de $17.5 \times 17.5 \text{ m}^2$, colocados sob a tela de impermeabilização, na base do aterro, e ligados por cabos eléctricos a uma caixa central onde são efectuadas as medidas eléctricas. Após a instalação do sistema foram efectuadas as medidas iniciais para definir os valores de 'background' da resistividade do terreno onde o aterro está implantado. Os possíveis pontos de fuga de lixiviados são detectados pela delimitação de zonas de menor resistividade eléctrica, em relação aos valores de 'background'. A evolução dessas zonas permite planejar eficazmente soluções minimizadoras dos efeitos da contaminação induzida pelo aterro sanitário, no caso de ocorrerem rupturas na tela de impermeabilização.

¹ Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, fpedro@ci.uc.pt

² Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, nelsonr@ci.uc.pt

³ Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, aandrade@ci.uc.pt

ABSTRACT: Monitoring the inter-municipal landfill of the Centre, Coimbra

This work describes the installation of a prototype system for monitoring the "A" Cell of the multi-municipal landfill of the Centre (Coimbra, Portugal) by resistivity electrical methods. The results obtained with this system are presented and discussed. This system is intended to locate and evaluate the evolution of contaminant plumes which may occur as a result of leaks of lixiviates and to detect possible ruptures in the geomembrane. In the present case this system was also intended to follow probable contamination plumes from an old waste damp which is located next the longer side of the landfill. This monitoring system is the first of its kind in Portugal and it consists of a set of 72 electrodes each of them positioned in the nodes of a network of squares and below the geomembrane covering the base of the landfill. The electrodes are connected to a central box where the resistivity measurements are taken. After the initial installation of the system a set of measurements was made in order to define the background resistivity of the emplacement of the landfill (average measured value $\cong 7,5$ ohm.m). At later times zones of lower resistivity as compared to the initial values would be used to detect possible flow paths of lixiviates. In the present case it is observed a general increase, with time, of the resistivity which we attribute to the consolidation of soil (average value in 2003 $\cong 30$ ohm.m). It is observed that contamination from the old damp still flows below the geomembrane even though in a smaller scale.

1. INTRODUÇÃO

Com a selagem das lixeiras em Portugal, ocorrida na década de 90, a gestão dos resíduos sólidos deixou de ser da responsabilidade local e tornaram-se numa responsabilidade regional (PINTO e COUSENS, 1996), passando a gestão desses resíduos a ser feita por empresas especializadas. Sob o ponto de vista de ordenamento do território tornou-se também mais rentável construir e gerir um número menor de aterros sanitários, em relação às lixeiras existentes, mas de maior dimensão, situados em locais estratégicos que permitem a sua utilização por diversas autarquias. A diminuição de locais de deposição de resíduos urbanos permite a instalação de equipamentos diversos que vão minimizar a dispersão e a diluição dos lixiviados no meio ambiente, bem como a contratação de pessoal especializado (PINTO e COUSENS, 1996).

Esses aterros de grandes dimensões, e que podem estar a funcionar em condições deficientes, são uma preocupação para as populações, as autarquias, as empresas que gerem os aterros e os organismos governamentais. Os problemas surgidos nos aterros sanitários têm conduzido ao desenvolvimento de técnicas de monitorização, das quais destacamos os métodos eléctricos aplicados à delineação

das potenciais plumas de contaminação (MERLEVEDE, 1996; REYNOLDS e TAYLOR, 1996; FIGUEIREDO *et al.*, 1999).

É importante que estes sistemas tenham um tempo de vida superior ao período de funcionamento do aterro, de modo a permitir a sua monitorização após a sua selagem.

Um exemplo da aplicação desta técnica é o sistema de monitorização instalado num aterro construído perto da cidade de Birmingham, no Reino Unido. Este sistema foi instalado pelo Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Birmingham em 1996. O sistema baseado no método eléctrico da resistividade foi a primeira instalação deste tipo a ser instalado no Reino Unido (www.bham.ac.uk/EarthSciences/tests/enviro2.html, 1997).

Este primeiro sistema de monitorização baseado na resistividade eléctrica foi testado com sucesso e demonstrou ser capaz de localizar rupturas na tela de impermeabilização, fugas de lixiviados que possam ocorrer, bem como quantificar a evolução das plumas de contaminação inerentes a essas fugas. Com estes sistemas de monitorização as medidas devem ser repetidas com uma certa periodicidade de modo a verificar possíveis rupturas e evolução da plumas de contaminação, considerando-se que a evolução no tempo vai provocar variações dos valores de resistividade (SENOS MATIAS, 2003).

Na figura 1 está representado um esquema simplificado do sistema instalado e do dispositivo de medida.

Em Maio de 1997 o Instituto de Investigação da Água da Universidade de Coimbra propôs à Câmara Municipal de Coimbra a instalação de um protótipo de um sistema de monitorização semelhante ao instalado no aterro de Birmingham (RODRIGUES *et al.*, 1997). O sistema foi montado durante os meses de Junho e Julho de 1997, tendo as primeiras medidas sido efectuadas no mês de Agosto desse mesmo ano.

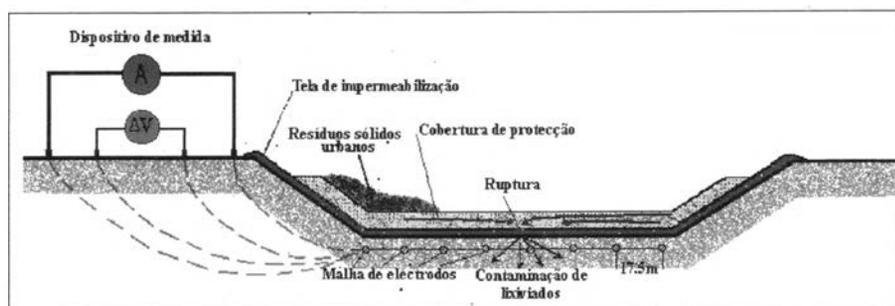


Fig. 1 – Esquema simplificado do sistema de monitorização instalado na Célula A do Aterro Multimunicipal do Centro (Figueiredo *et al.*, 1999).

2. LOCALIZAÇÃO E ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DO ATERRO

O aterro sanitário localiza-se a cerca de 4km a Sul da povoação de Taveiro e a 2,5km a NE da povoação de Anobra, no limite do concelho de Coimbra, figura 2.

Foi construído imediatamente a Sul da antiga lixeira que serviu este concelho e os concelhos limítrofes no período entre 1984 a 1997, ocupando uma área de aproximadamente 10000m², com uma capacidade total de 1000000m³ e funcionando desde o final do ano de 1997.

Sob o ponto de vista geológico, o aterro está implantado sobre uma camada de argilas pertencentes ao topo da Formação de Taveiro (Campaniano superior-Paleocénico?) que apresentará neste local uma espessura superior a 90m, podendo atingir uma espessura máxima provável de 150m (REIS, 1979, 1983; CUNHA e REIS, 1995). Esta formação, com uma atitude sub-horizontal, é constituída nesta zona por camadas métricas ($\leq 4m$) de arenitos, com granulometria média a grosseira, bem calibrados, alternantes com camadas de argila de espessura considerável ($\leq 20m$).

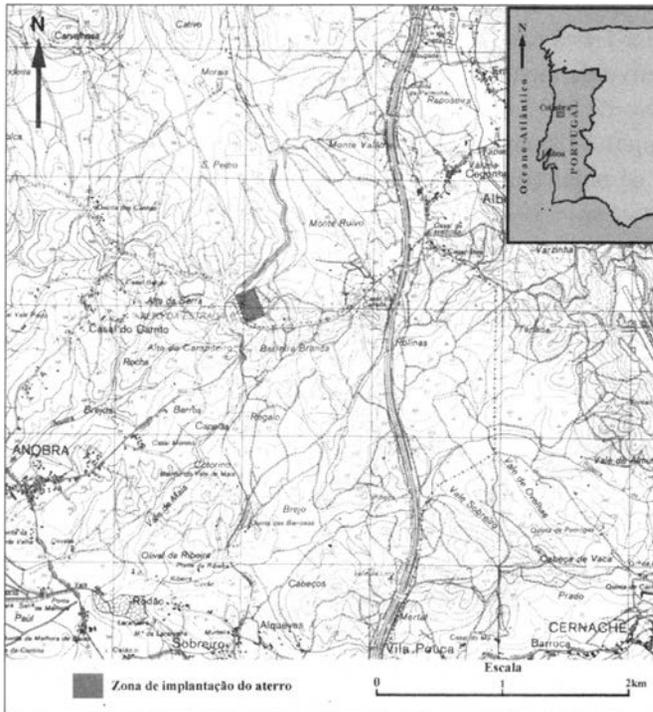


Fig. 2 – Localização geográfica do Aterro Multimunicipal do Centro (extracto da Carta Militar de Portugal, folhas n.º 240 e n.º 241, Serv. Cart. do Exército, 1984).

3. O MÉTODO DE RESISTIVIDADE ELÉCTRICA

O método de resistividade eléctrica consiste no estudo do campo eléctrico criado artificialmente pela introdução de uma corrente eléctrica no terreno, através de dois eléctrodos, A e B, colocados na superfície, sendo a diferença de potencial medida noutros dois eléctrodos, M e N. Através da medição dos potenciais eléctricos induzidos, à superfície do terreno, pelo fluxo dessa corrente eléctrica e com base nos princípios estabelecidos pela Lei de Ohm determina-se a resistividade eléctrica do volume de terreno influenciado pela passagem da corrente eléctrica (ORELLANA, 1972).

A resistividade eléctrica dos terrenos depende do tipo e natureza das suas formações geológicas, da quantidade de água contida na sua estrutura, bem como dos sais minerais dissolvidos nessa água. Os poros e fracturas das formações geológicas estão vulgarmente preenchidos com água que contém sais minerais dissolvidos, conferindo uma maior ou menor aptidão para estas conduzirem a corrente eléctrica, verificando-se que, em geral, quando a porosidade e a fracturação diminuem a resistividade aumenta e vice-versa. Na figura 3 pode-se observar a variação da resistividade de águas de natureza diversa incluindo águas contaminadas.

A análise da resistividade eléctrica e da sua distribuição à superfície permite localizar e identificar estruturas geológicas, bem como plumas de contaminação em profundidade.

A quantidade de sais dissolvidos na água, depende da natureza das rochas com que a água esteve em contacto e fundamentalmente da mistura de contaminantes introduzidos nos aquíferos. Essa quantidade varia geralmente entre 0,1 g/l e 35 g/l, correspondendo este último valor à água do mar. No entanto, este valor é superado por algumas águas de escorrências de minas, lagos salgados e lixiviados de aterros e lixeiras.

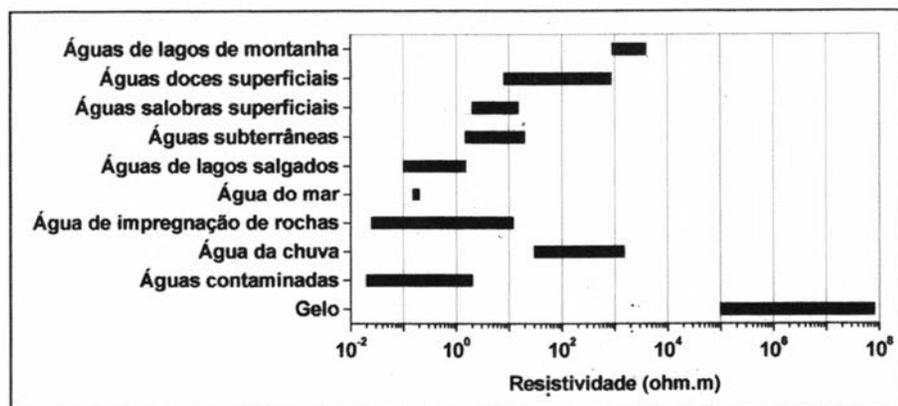


Fig. 3 - Valores de resistividade para águas de diversas naturezas (adaptado de ORELLANA, 1972; TELFORD *et al.*, 1988).

4. DISPOSITIVO DE MEDIDA QUADRADO TRIPOTENCIAL

Existem vários dispositivos de medida, podendo estes ser classificados em dois grupos. Os dispositivos a partir dos quais se obtém um único valor de resistividade por ponto de medida e os dispositivos tripotenciais em que se obtém três valores de resistividade por ponto de medida. Destes últimos dispositivos referimos os dispositivos Wenner Tripotencial (CARPENTER e HABBERJAM, 1956) e o Quadrado Tripotencial (HABBERJAM, 1979). Estes dois dispositivos permitem o controlo da qualidade dos dados de campo e a determinação das heterogeneidades do terreno.

O sistema de monitorização instalado no aterro permite efectuar as medidas utilizando vários dispositivos. Após a realização de vários conjuntos de medidas efectuados com diferentes dispositivos concluiu-se que o dispositivo Quadrado Tripotencial adapta-se melhor aos objectivos deste projecto por permitir cobrir uma maior área de medidas quando comparado com o Wenner Tripotencial, sendo essa diferença devida à geometria dos dispositivos.

Na figura 4 está representado o esquema do dispositivo Quadrado tripotencial, sendo as leituras efectuadas com este dispositivo referidas ao ponto central do dispositivo.

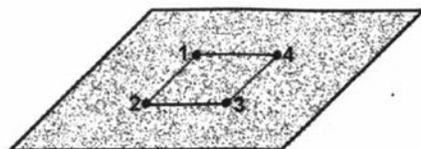
Através das equações seguintes são calculados as resistividades $\rho_\alpha(a)$, $\rho_\beta(a)$ e $\rho_\gamma(a)$, equações 1, 2 e 3, respectivamente, para as três configurações deste dispositivo, sendo a a dimensão do lado do quadrado, R_α e R_β as resistências medidas com as configurações α e β , respectivamente.

(Eq. 1)

$$\rho_\beta(a) = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{2 - \sqrt{2}} \cdot R_\beta \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\rho_\gamma(a) = 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

A, B - Eléctrodos de corrente
M, N - Eléctrodos de potencial



	Posição dos eléctrodos			
	1	2	3	4
Configuração α	A	M	N	B
Configuração β	A	B	N	M
Configuração γ	A	M	B	N

Fig. 4 - Dispositivo Quadrado Tripotencial. Localização dos eléctrodos nas configurações α , β e γ .

O valor de $\rho_{\gamma}(a)$ é igual a zero, devido ao valor da resistência gama ser zero. Esta resistência tem valor zero porque a diferença de potencial é nula, visto que nesta configuração os eléctrodos de potencial se encontram localizados segundo uma linha de equipotencial.

Outros dois parâmetros que se calculam através destes valores são a resistividade média, $\rho_m(a)$, equação 4, e o Coeficiente de Heterogeneidade Azimutal, $CHA(a)$, equação 5 (HABBERJAM, 1979).

$$\rho_m(a) = \frac{\rho_{\alpha}(a) + \rho_{\beta}(a)}{2} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$CHA(a) = 2 \cdot \frac{\rho_{\alpha}(a) - \rho_{\beta}(a)}{\rho_{\alpha}(a) + \rho_{\beta}(a)} \quad (\text{Eq. 5})$$

Os valores $CHA(a)$ permitem localizar as zonas anisotrópicas do terreno, zonas essas que poderão corresponder a locais onde ocorrem a fuga de lixiviados através da tela.

5. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO INSTALADO

O sistema de monitorização instalado consiste num conjunto de 72 eléctrodos dispostos em malha regular quadrada de $17,5 \times 17,5 \text{m}^2$, colocados na base do aterro sanitário, a uma profundidade de 0,5m abaixo da tela de impermeabilização, figura 5.

Cada um destes eléctrodos está ligado a um painel de controlo por um cabo eléctrico multifilar de $2,5 \text{mm}^2$, num total de 32000m de fio eléctrico. Os eléctrodos são de aço inoxidável para garantir que o sistema de leitura funcionará durante o período de vida do aterro e após a sua selagem.

Os cabos de ligação entre os eléctrodos e o painel de controlo foram colocados dentro de tubarias, seleccionadas pela garantia de resistência e facilidade de instalação oferecidas. Todas as possíveis entradas dos tubos foram seladas para impedir que constituíssem um sistema privilegiado para a condução de água e lixiviados.

Com os 72 eléctrodos instalados e com o dispositivo de medida quadrado podem-se fazer 53 medidas, sendo os valores obtidos através deste sistema de monitorização utilizados para a construção dos mapas de valores de resistividade média, $\rho_m(a)$ e dos Coeficientes de Heterogeneidade Azimutal, $CHA(a)$.

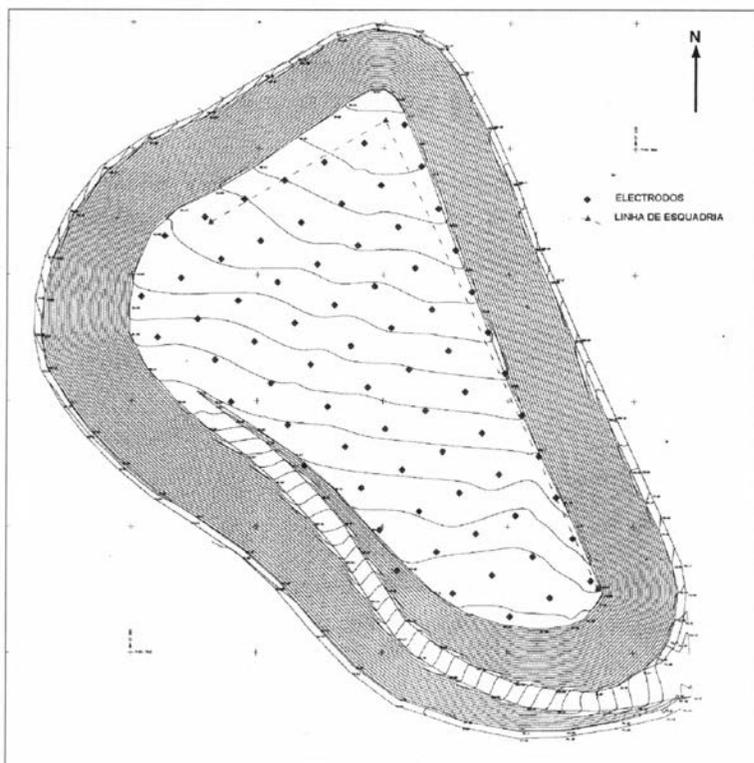


Fig. 5 – Planta da Célula A do aterro sanitário e localização dos electrodos utilizados no sistema de monitorização instalado.

No último conjunto de medidas, efectuado em Setembro de 2003, não foi possível fazer sete medidas devido a problemas com alguns dos electrodos, no entanto isso não inviabilizou a construção dos mapas referentes a essa data.

A análise dos mapas obtidos em diferentes alturas do ano permite detectar a existência de possíveis rupturas na tela e a libertação de lixiviados através das mesmas; a avaliação da propagação das plumas de contaminação é possível tendo em consideração os baixos valores de resistividade associados à presença dos lixiviados no terreno, quando comparados com o meio envolvente. Estes mapas constituem uma base sólida para o planeamento de medidas de minimização de impactes.

No caso de ser detectada alguma ruptura, serão efectuadas medidas de resistividade na área em questão, na área envolvente e em profundidade, para uma melhor avaliação da evolução da contaminação.

Não havendo rupturas na tela os valores da resistividade eléctrica medidos serão constantes ao longo do tempo de vida do aterro, existindo no entanto variações sazonais devido à variação do nível freático.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os valores da resistividade obtidos inicialmente, Agosto e Outubro de 1997, figura 6(a) e (b), respectivamente, mostram os valores de 'background' da resistividade da base do aterro. Estes dois mapas mostram resultados diferentes, apresentando o mapa de Outubro de 1997, figura 6(b), valores de resistividade inferiores, porque nesta data as telas já estavam totalmente colocadas, o que provocou uma homogeneização da humidade no terreno sob as telas.

Junto do talude do lado Este do aterro os valores da resistividade são inferiores aos obtidos no talude Oeste. Este facto é devido à contaminação induzida pelos lixiviados da antiga lixeira que contacta lateralmente com a Célula A do aterro no talude Este.

Junto deste talude, pode-se observar um canal preferencial de propagação de lixiviados entre os 120 e os 140 m, com uma resistividade média de 4,5 ohm.m, correspondente a uma zona identificada à data da instalação do sistema e das telas de impermeabilização, como uma zona preferencial de escoamento dos lixiviados da lixeira antiga.

Da análise dos gráficos das figuras 6 e 7, obtidos sequencialmente no tempo, podemos verificar que ocorreu uma diminuição gradual nos valores de resistividade da base do aterro desde o início do seu funcionamento. Os valores de resistividade máxima medidos decresceram dos 12,5 ohm.m em Agosto de 1997, figura 6(a), para valores de 6,5 (Fevereiro de 1998) e 7,5 ohm.m (Julho de 1999), figura 7(a) e (b), respectivamente, sendo esse decréscimo atribuído ao lixiviados da antiga lixeira que se introduzem sob a tela do aterro.

A figura 8 corresponde a leituras feitas em Julho de 2000 (a) e em Setembro de 2003 (b), sendo notória a diferença de resultados obtidas nestes dois períodos. Sob o ponto de vista de resistividade do terreno verifica-se que houve um aumento significativo dos valores da resistividade, que pode ser explicado pela diminuição do fluxo de lixiviados provenientes da antiga lixeira. Uma outra explicação para este facto pode ser a diminuição da circulação de lixiviados entre a tela de impermeabilização e a base do aterro devido aos aterro se encontrar quase a atingir a sua capacidade máxima, provocando o peso dos resíduos um contacto mais efectivo entre a tela e a base do aterro, que impede a circulação dos lixiviados.

Em relação ao mapa do Coeficiente de Heterogeneidade Azimutal os valores também são mais elevados o que pode ser explicado pela heterogeneidade do terreno (argiloso e arenoso) com diferentes permeabilidades, verificando-se, no entanto, que a área corresponde à zona preferencial de entrada de lixiviados da antiga lixeira continua presente.

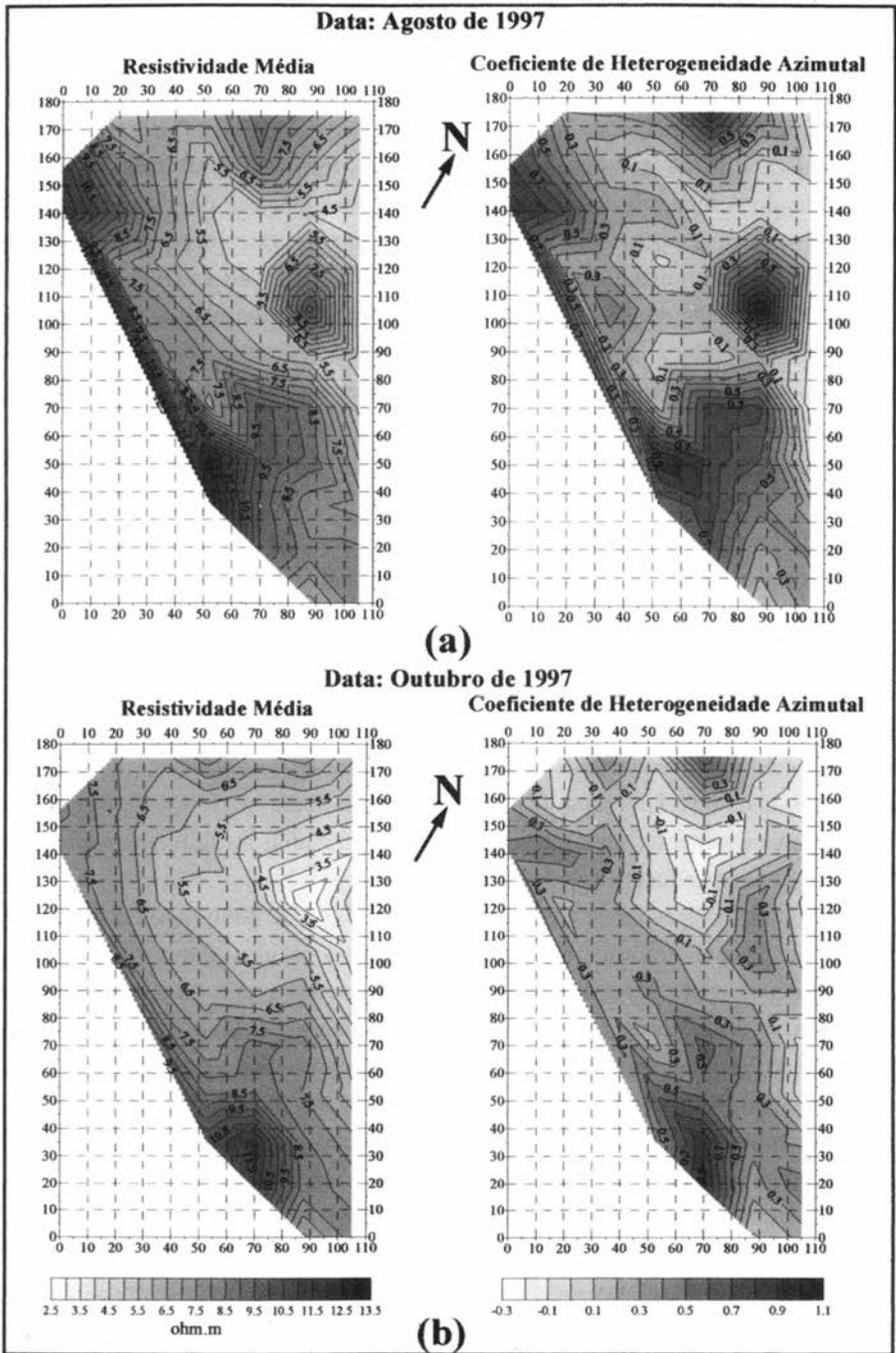


Fig. 6 – Mapas da resistividade média e do Coeficiente de Heterogeneidade Azimutal, correspondentes a Agosto (a) e Outubro (b) de 1997.

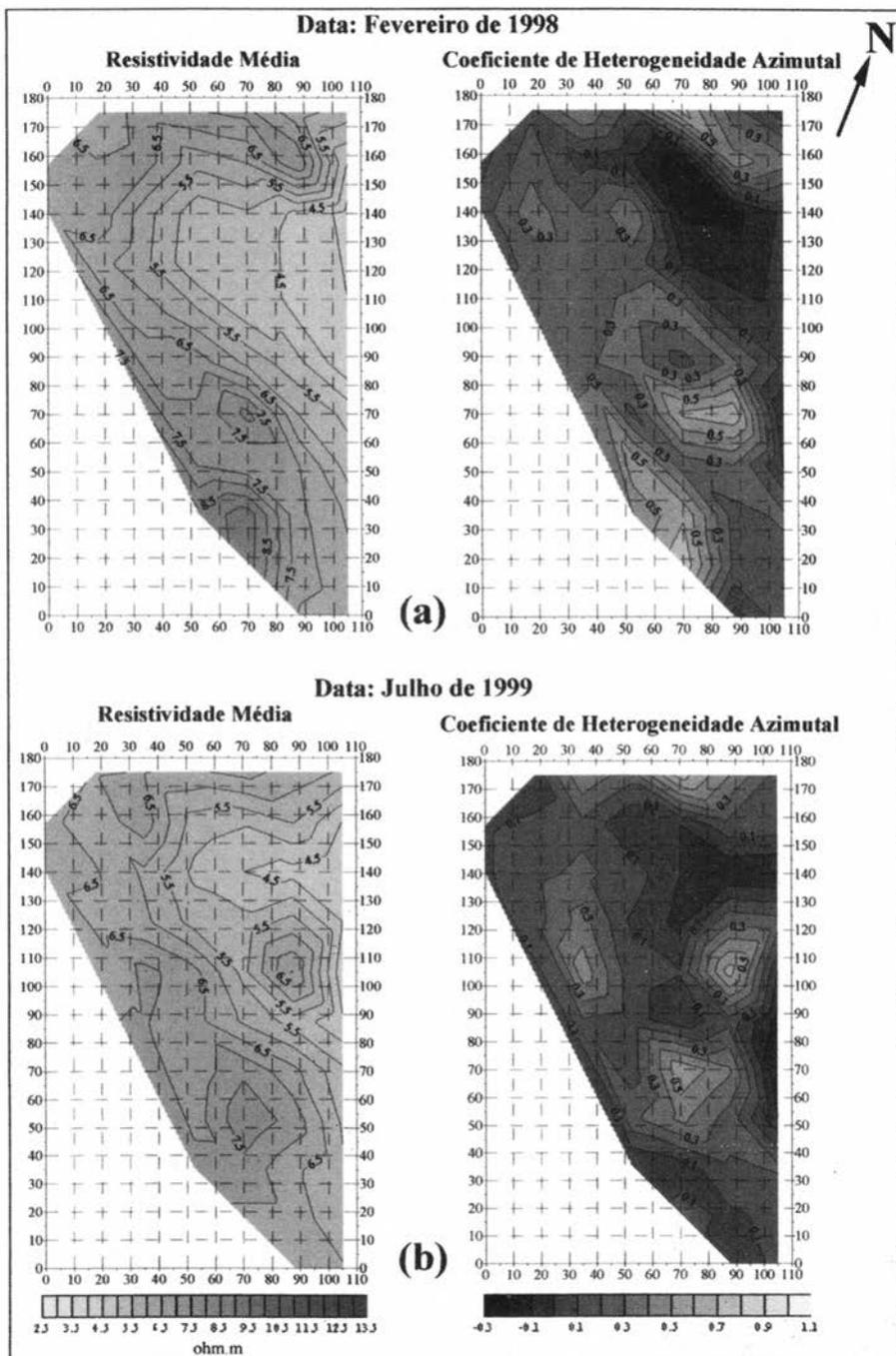


Fig. 7 – Mapas da resistividade média e do Coeficiente de Heterogeneidade Azimutal, correspondentes a Fevereiro 1998 (a) e Julho de 1999 (b).

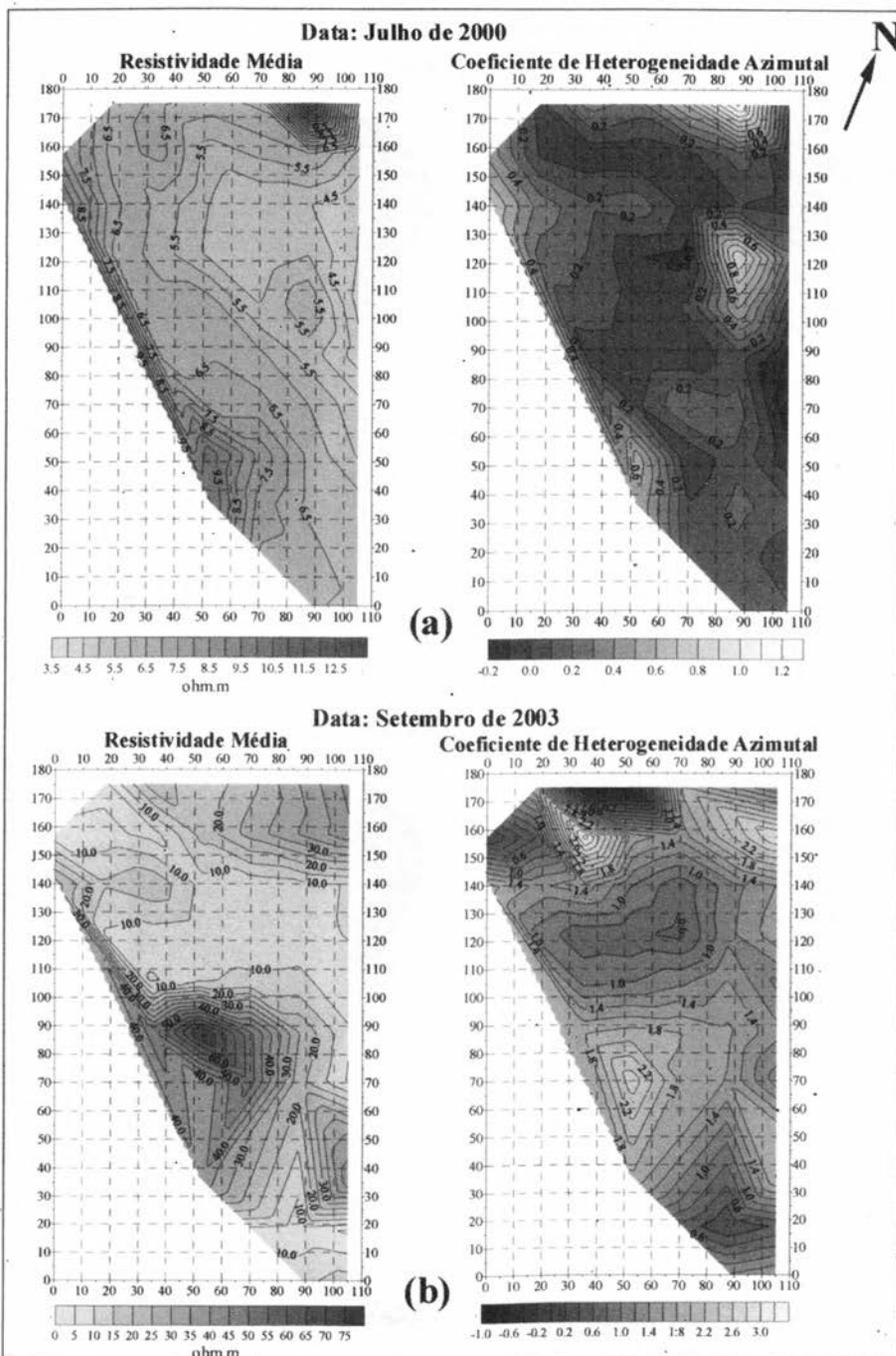


Fig. 8 – Mapas da resistividade média e do Coeficiente de Heterogeneidade Azimutal, correspondentes a Julho de 2000 (a) e Setembro de 2003 (b).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na base do aterro, não foi detectada nenhuma ruptura significativa da tela de impermeabilização uma vez que a distribuição geométrica das curvas de igual resistividade se mantiveram inalteradas, ao longo do tempo de vida do aterro.

O canal preferencial de propagação dos lixiviados da lixeira antiga continua a verificar-se à data das últimas medidas efectuadas.

O sistema instalado é um pouco dispendioso, quando comparado com outros sistemas, e fornece resultados fiáveis e de boa qualidade. Quanto maior o número de eléctrodos instalados melhor será a resolução e mais rápida será a detecção de fugas de lixiviados.

Após sete anos de funcionamento o sistema de monitorização continua operacional, permitindo o registo e a construção dos mapas apresentados.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à Câmara Municipal de Coimbra, ao Prof. Doutor Martim Portugal Ferreira, à ERSUC - Resíduos Sólidos do Centro, S.A., em especial ao actual administrador Dr. Alberto Santos e ao anterior, Eng. Humberto Conceição, ao Instituto de Investigação da Água - U.C., Departamento de Ciências da Terra - U.C., ACORIL S.A., Agroman S.A., SERIAL Lda. e GÓTOP Lda., bem como aos nossos colegas Fernando Pita, Lídia Catarino e Sara Renca, e ao electricista do nosso departamento Armando Silva todo o apoio dado durante a instalação do sistema e os dados técnicos fornecidos para a realização deste trabalho e apresentação desta comunicação.

9. BIBLIOGRAFIA

- CARPENTER, E. C. e HABBERJAM, G. M. (1956) - A tripotencial method of resistivity prospecting. *Geophysics* 21, pp. 455-469.
- Carta Militar de Portugal, folhas n.º 240 e n.º 241 (1984) - S. C. do Exército, Lisboa.
- CUNHA, P. P. e REIS, R. P. P. (1995) - Cretaceous sedimentary and tectonic evaluation of the northern sector of the Lusitanian Basin (Portugal). *Cretaceous Research*, 16, pp. 155-170.
- FIGUEIREDO, F. P. O., ANDRADE, A. I. A. S. S. e RODRIGUES, N. E. V. (1999) - Protótipo de um sistema de monitorização de aterros sanitários por métodos eléctricos - Aterro Intermunicipal do Centro. *6.ª Conferência Nacional Sobre a Qualidade do Ambiente*, Vol. 2, pp. 179-188, Univ. Nova de Lisboa, Portugal.
- HABBERJAM, G. M. (1979) - *Apparent resistivity observations and the use of square array techniques*. Geoexploration Monographs, Gebrüder Borwtraeger, Berlin-Stuttgart, Alemanha.

- MERLEVEDE, P. (1996) – Developments in the use of an Electronic Leak Detection Geotextile (ELDEG®) for civil engineering and waste disposal purposes. *Geosynthetics: Applications, Design and Construction*, De Groot, Den Hoesdt e Termaat (editores). Balkema, Roterdão.
- ORELLANA, E. (1972) – *Prospeccion geoelectrica en corriente continua*, Paraninfo, Madrid, Espanha.
- PINTO, M. I. e COUSENS, T. W., (1996) – Aterros sanitários no Reino Unido - Exemplos dos aterros de Honley Old Wood e Howley Park em West Yorkshire. *Estudos de Engenharia Civil*, Vol. 8, nº.2, pp. 161-170. Dep. de Eng^a. Civil, F.C.T.U.C., Coimbra.
- REIS, R. P. P. (1979) – La Formation Argilo-Greseuse et Conglomeratique de Senhora do Bom Sucesso (Portugal). Etude sedimentologique. *Memórias e Notícias* 87, Publ. Mus. Lab. Min. Geol., pp. 3-18, Univ. Coimbra, Portugal.
- REIS, R. P. P. (1983) – *A sedimentologia de depósitos continentais. Dois exemplos do Cretácico Superior-Miocénico de Portugal*. Tese de Doutoramento, Univ. de Coimbra.
- REYNOLDS, J. M. e TAYLOR, D. I. (1996) – Use of geophysical surveys during the planning, construction and remediation of landfills. *Engineering Geology of Waste Disposal*, Bentley, S. P. (editor). Geological Society Engineering Geology Special Publication, nº. 11, pp. 93-98.
- RODRIGUES, N. E. V., FIGUEIREDO, F. P. O. e ANDRADE, A. I. S. (1997) – *Sistema de Monitorização da Célula A do Aterro Sanitário de Coimbra*. Relatório interno não publicado. Instituto de Investigação da Água-Secção de Hidrogeologia, Universidade de Coimbra.
- SENOS MATIAS, M. J. (2003) – Geofísica e ambiente: O desafio 4D. *3º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG*, Universidade de Aveiro, 10 a 13 de Fevereiro de 2003, Aveiro.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. e KEYS, D. A. (1988) – *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Endereço (URL) de documentos Internet consultados:

<http://www.bham.ac.uk/EarthSciences/tests/enviro2.html>, 1997