

EQUIPAMENTO SEMIAUTOMÁTICO PARA DETEÇÃO DE ORIFÍCIOS EM SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS DE RESÍDUOS

SEMI-AUTOMATIC MOBILE SYSTEM FOR HOLES DETECTION ON LANDFILL LINNING SYSTEMS

Mota, Rogério; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, rmota@lnec.pt
Matutino, Pedro; Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, pmiguens@deetc.isel.pt
Barroso, Madalena; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, mbarroso@lnec.pt
Lopes, Maria da Graça; Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, glopes@dec.isel.ipl.pt
Dores, Rui; Empresa Geral de Fomento, r.dores@adp.pt
Silva, Francisco; Agência Portuguesa do Ambiente, francisco.silva@apambiente.pt
Coimbra, Luís; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, lcoimbra@lnec.pt

RESUMO

Os aterros de resíduos possuem sistemas de impermeabilização de fundo que incluem barreiras múltiplas, entre as quais uma geomembrana (GM). O sucesso destes sistemas depende, sobretudo, do desempenho das GMs, que constituem a barreira ativa à migração dos contaminantes. Este desempenho é condicionado pela presença de orifícios que constituem caminhos preferenciais para a migração de lixiviado. Com o objetivo de colmatar as principais desvantagens dos métodos existentes para deteção de orifícios em GMs, de entre as quais se destacam a morosidade e os custos associados, encontra-se em desenvolvimento um equipamento de ensaio baseado no método geofísico de resistividade elétrica. Este equipamento já foi testado, com sucesso, em laboratório e encontra-se em fase de ensaio numa instalação piloto no campus do LNEC. Nesta comunicação, apresentam-se o método de deteção de fugas em GM, o equipamento em desenvolvimento e alguns dos resultados obtidos.

ABSTRACT

Landfills have basal lining systems that include composite liners, among which a geomembrane (GM). The success of these systems depends mainly on the GM performance, which acts as the primary barrier to contaminants migration. GM performance is conditioned by the presence of holes, which represent preferential pathways for leachate migration. With the goal of overcome the main disadvantages of the existing methods for GM defects detection, mainly time spent to perform the test and the associated high costs, a prototype is in development based on the geophysical resistivity method. This prototype was already tested at a small scale in laboratory and now is being tested in a pilot plant at LNEC campus. This paper presents the prototype development and results so far obtained.

1 - INTRODUÇÃO

Os aterros de resíduos são obras de engenharia geotécnica, estruturalmente complexas, concebidas para minimizar o efeito poluente dos resíduos no meio ambiente. Para o efeito, contêm sistemas de impermeabilização de fundo e taludes, bem como sistemas de cobertura.

Os sistemas de impermeabilização de fundo incluem barreiras múltiplas, tipicamente constituídas, da base para o topo, por uma camada de solo argiloso compactado (CCL), uma barreira geossintética argilosa (GCL), uma geomembrana (GM) - geralmente de polietileno de alta densidade (PEAD), um geotêxtil de proteção da geomembrana (GTX) e uma camada de drenagem dos lixiviados (CDL) (Figura 1). O sucesso destas barreiras depende, sobretudo, do desempenho das GMs, pois estas constituem a barreira ativa à migração dos contaminantes.

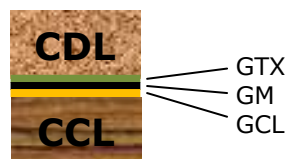


Figura 1 – Sistema de impermeabilização de fundo dos aterros de resíduos

O desempenho das GMs é condicionado pela presença de orifícios. Estudos realizados com base em métodos elétricos de deteção de fugas sugerem que os orifícios são inevitáveis, mesmo em aterros de resíduos nos quais foram implementados rigorosos programas de garantia de qualidade (Peggs, 1996; Nosko e Touze-Foltz, 2000; Rollin et al., 2002; Rollin et al., 2004; Peggs e Wallace, 2008).

Os orifícios estão, de um modo geral, relacionados com atividades construtivas inadequadas, em particular com a colocação da camada de drenagem de lixiviados sobre as barreiras do sistema de impermeabilização (Nosko e Touze-Foltz, 2000; Colucci e Lavagnolo, 1995). Efetivamente, de acordo com os estudos realizados por Nosko e Touze-Foltz (2000), 71 % dos orifícios foram causados pelos materiais da camada de drenagem (punçoamento por pedras angulosas, inaceitáveis dimensões das partículas constituintes da camada drenante, ou deficiente dimensionamento do geotêxtil de proteção). Segundo Needham et al. (2004), num estudo realizado em mais de 50 aterros de resíduos (cerca de 102 ha), apontam para uma frequência de 14,3 orifícios/ha.

Os orifícios na GM representam caminhos preferenciais para a migração de lixiviado para as camadas subjacentes, com potencial contaminação do subsolo e águas subterrâneas. Considerando que a maior maior produção de orifícios na GM ocorre durante a colocação da camada de drenagem, a verificação da integridade da GM, após a colocação desta camada, afigura-se indispensável.

Embora, noutros países, existam já métodos para deteção de orifícios em GM, como por exemplo o método da fâisca elétrica, estes apresentam várias desvantagens, das quais se destacam a morosidade e o subsequente elevado custo, devido ao facto de serem métodos operados manualmente.

Procurando colmatar estas desvantagens dos métodos existentes, encontra-se em desenvolvimento um equipamento de ensaio baseado no método geofísico da resistividade elétrica (dois elétrodos de injeção e dois elétrodos de medição) e na técnica de multicabos utilizada nos equipamentos geofísicos mais recentes. O sistema em desenvolvimento é composto por uma malha formada por vários pares de elétrodos instalada numa estrutura móvel, equipada com um sistema de georreferenciação por satélite e uma interface de controlo, seleção e armazenamento de dados.

O equipamento de ensaio em desenvolvimento realizará uma aquisição semiautomática de dados e o seu processamento em tempo real, incluindo a georreferenciação de todos os pontos que constituem a malha de ensaio, para produção de um mapa de anomalias elétricas, indicadoras da existência de orifícios. Foi testado, numa primeira fase, em laboratório e teve início, recentemente, a segunda fase das três previstas, numa instalação piloto de grande escala. A última fase será a sua aplicação num aterro de resíduos.

2 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO ELÉTRICO PARA DETEÇÃO DE FUGAS EM GM

O equipamento em desenvolvimento utiliza, tal como os métodos geofísicos da resistividade elétrica, dois pares (dipolos) de elétrodos: um dipolo fixo, para injeção, e o segundo dipolo montado numa estrutura móvel, para prospectar, ponto a ponto, toda a base do aterro de resíduos (Figura 2).

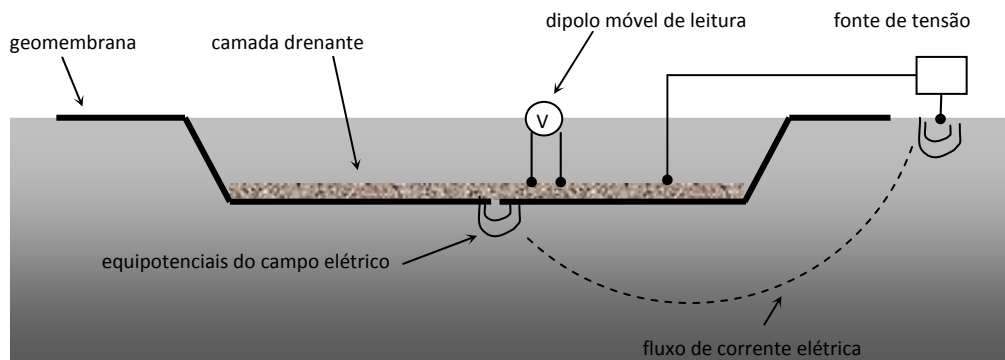


Figura 2- Princípio de funcionamento do método elétrico para avaliação da integridade das GMs

De entre as diversas configurações tetraelectródicas utilizadas no método geofísico da resistividade elétrica as que mais se aproximam do método elétrico para avaliação da integridade das GMs (o qual é semelhante ao descrito na norma ASTM D7007-03) são os dispositivos radial, azimutal e axial (Figura 3).

Enquanto, no método da resistividade elétrica se procura conhecer como é que a resistividade elétrica do meio varia de ponto para ponto, para o que é necessário conhecer três parâmetros que entram na fórmula [1] de cálculo da resistividade elétrica - a distância entre ambos os dipolos, a intensidade da corrente elétrica injetada no terreno e a diferença do campo elétrico gerado pela circulação da corrente elétrica - no método elétrico para avaliação da integridade das GMs (de ora em diante abreviadamente designado por dipolo móvel de leitura) apenas interessa saber como é que varia o campo elétrico na área prospectada.

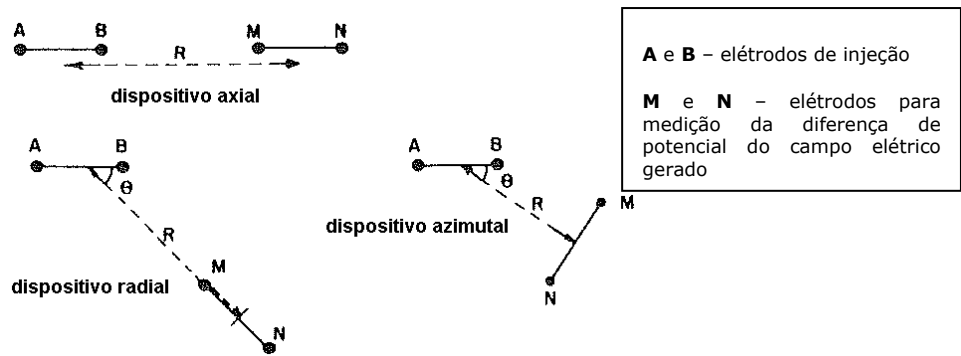


Figura 3 - Alguns dos dispositivos tetraeletródicos utilizados no método geofísico da resistividade elétrica (Sheriff, 1990)

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN}\right)} \quad [1]$$

Onde: ΔV é a diferença de potencial elétrico medido em cada dipolo, I o valor da corrente elétrica injetada no terreno e AM, NA, BM e BN são as distâncias entre os eletrodos. O fator multiplicativo onde constam as distâncias entre os eletrodos tem por objetivo compensar o decaimento do campo elétrico com a distância entre a fonte e o receptor.

No método do dipolo móvel de leitura um dos eletrodos do dipolo de injeção é instalado no exterior do sistema de confinamento e o segundo está em contacto com a camada drenante colocada no interior do sistema, a uma distância entre si que não é necessário conhecer. Este método baseia-se no princípio de que, sendo a GM constituída por material isolante ao fluxo da corrente elétrica entre os dois eletrodos de injeção, então esta apenas poderá fluir de um para o outro se existir um orifício na GM e se ocorrer contacto entre os dois meios – camada drenante e terreno de fundação. Esta última condição é análoga a um interruptor num circuito elétrico – o interruptor apenas deixa passar a corrente elétrica, para ligar algo, quando fecha o circuito.

A detecção da passagem da corrente elétrica pelo orifício da GM é efetuada através da medição, com recurso a um multímetro, da variação da diferença de potencial entre os dois eletrodos do dipolo de medição (tipicamente com 1 m de distância entre si), quando este percorre, de modo sistemático a camada drenante do aterro de resíduos. Sendo homogéneo o material que constitui a camada drenante e mantendo-se sempre constante a tensão aplicada, a diferença de potencial medida com o dipolo móvel deverá ser sempre reduzida e equivalente ao potencial espontâneo natural dos terrenos; apenas em presença de um orifício é que ocorrerá uma alteração. Com efeito, à medida que o dipolo de leitura se aproxima de um orifício (rasgo, corte ou perfuração da GM) o potencial elétrico medido aumenta em termos absolutos, ocorrendo uma inversão de polaridade após passagem pelo orifício (Figura 4). No entanto, há que acautelar o já mencionado efeito do decaimento do campo elétrico com a distância entre fonte e recepção, assim como as condições de condução da corrente elétrica na camada drenante, para que a interrupção do circuito elétrico não seja devido a deficiente capacidade condutora deste meio.

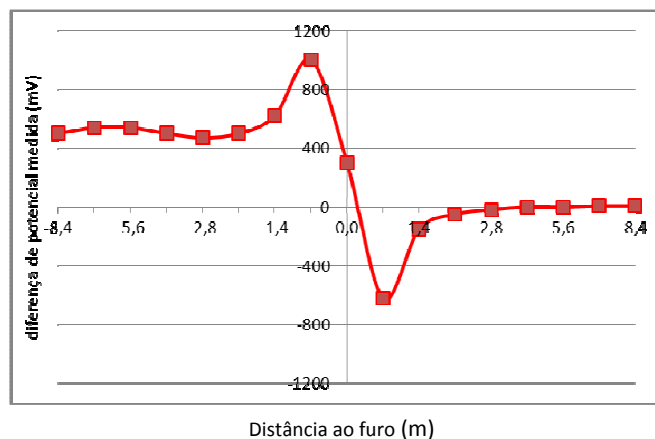


Figura 4- Variação do potencial elétrico próximo de um orifício com 0,635 cm de diâmetro (adaptado de Peggs e Beck, 2010)

3 - PROTÓTIPOS

3.1 - Protótipos de pequena escala (laboratório) – ISEL

Na primeira fase de desenvolvimento do equipamento de ensaio, testado em laboratório (ISEL), construíram-se vários protótipos (Figura 5), que consistiam basicamente em barras onde se montaram elérodos a distâncias fixas (Mota et al, 2011). Estes elérodos constituem diferentes dipolos de leitura do potencial elétrico.

Uma vez que no dipolo móvel de leitura os elérodos estão montados tipicamente com uma distância de 1m entre si, quando se deteta um orifício é necessário ir dando pequenos avanços em torno do local identificado, para diminuir a incerteza na localização do orifício. Este processo não é possível de reproduzir com um sistema semiautomático.

Para contornar esta dificuldade o primeiro protótipo construído (Figura 5A) possuía 101 elérodos com espaçamento de 1 cm entre si. Constatou-se que este afastamento não era prático e passou-se para um segundo protótipo com 8 dipolos com distância dipolar de 15 cm (Figura 5B). A utilização prática deste protótipo foi positiva, apesar da estrutura frágil utilizada. O terceiro protótipo foi construído com 20 dipolos com distâncias dipolares menores – 5 cm – mas que permitiram a utilização de distâncias dipolares com distâncias múltiplas desta – 10, 15 e 20 cm. Os resultados obtidos com este protótipo foram positivos, pelo que é possível utilizar com o equipamento semiautomático uma distância dipolar da mesma ordem de grandeza da do dipolo móvel de leitura e, quando da deteção de um orifício, apertar a malha de leitura para melhor o localizar.

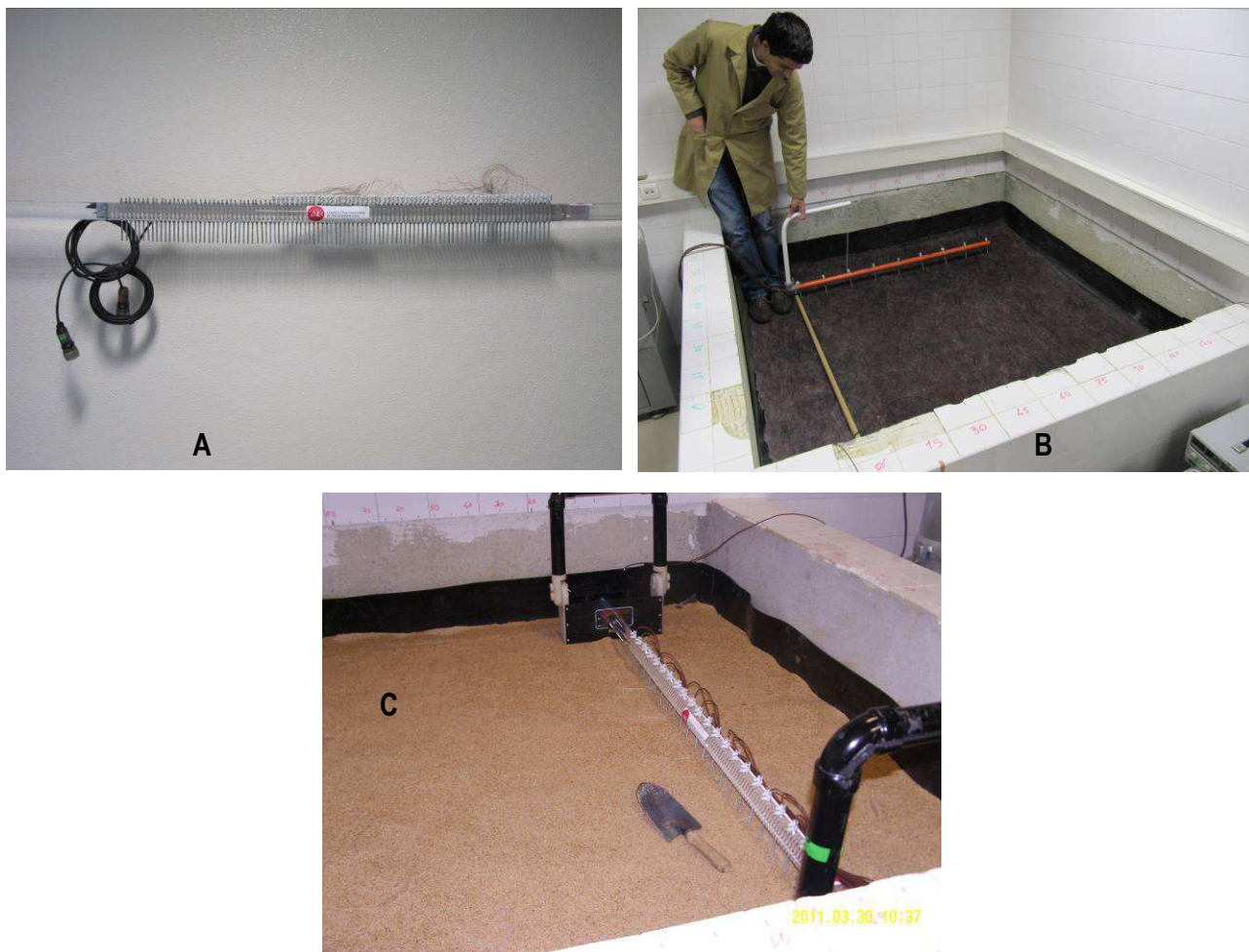


Figura 5 – Protótipos de pequena escala. **A** – Espaçamento entre elérodos de 1 cm; **B** – Espaçamento entre elérodos de 15 cm; **C** – Espaçamento entre elérodos de 5 cm.

Inicialmente utilizou-se um resistímetro como fonte de tensão e equipamento de leitura das diferenças de potencial (Figura 6A). Contudo, como as suas características de funcionamento não permitem que a tensão se mantenha constante ao longo de toda a base da célula, para além de apenas possuir 4 canais de leitura simultânea, optou-se por utilizar uma fonte de tensão fixa (primeiro uma de 60 V e, posteriormente, uma de aproximadamente 600 V) e um multímetro, para leitura das diferenças de potencial elétrico (Figura 6B).

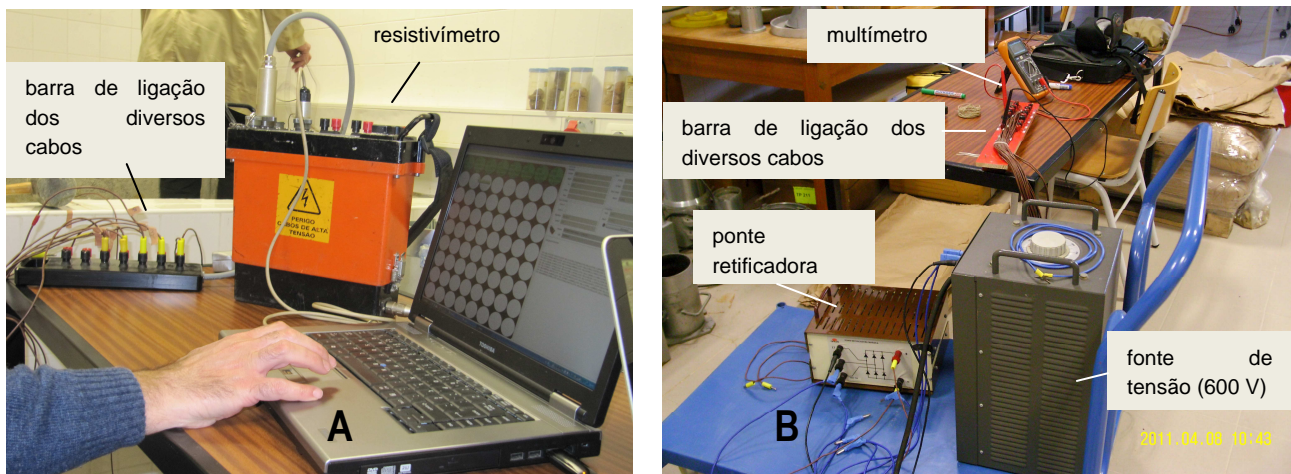


Figura 6 - Equipamento de injeção e medição utilizado na célula experimental do ISEL. **A** – resistivímetro; **B** – fonte de tensão de 600V.

3.2 - Protótipo de grande escala

Com base nos resultados obtidos com os protótipos de pequena escala foi desenvolvido um protótipo de grande escala, no qual os elétrodos são montados segundo uma quadrícula de 4 x 4 em módulos de 1 m x 1 m, com o objetivo de facilitar o seu transporte e para ser escalável (Figura 7). O espaçamento d entre módulos é igual à distância entre elétrodos (30 cm). Com este modo de instalação dos elétrodos é possível com um único posicionamento do dispositivo de leitura (equipado com 4 módulos de elétrodos) cobrir 6 posições do dipolo móvel de leitura, no caso de montagem dos módulos em quadrícula, ou 8 posições, quando montados uns ao lado dos outros.

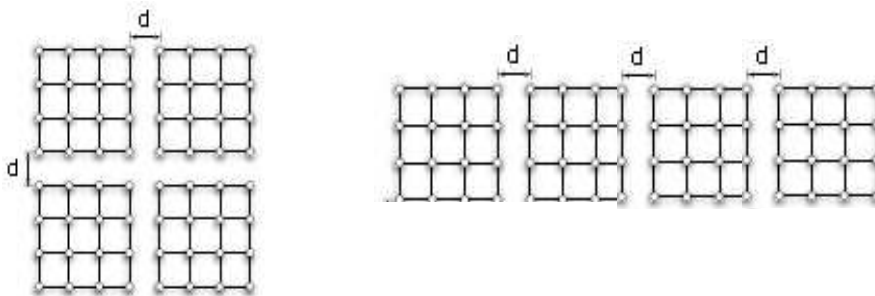


Figura 7 - Configurações de montagem possíveis para o dispositivo

O protótipo do equipamento em fase de verificação (Figura 8) encontra-se equipado com elétrodos de aço instalados de modo a permitirem movimento vertical independente entre si, para se superar os obstáculos que constituem alguns materiais utilizados para a camada drenante – seixos, por exemplo.

O equipamento em desenvolvimento é composto, para além do já mencionado dispositivo de elétrodos de leitura, por um módulo de controlo, leitura e armazenamento de dados e um sistema de georreferenciação por satélite GNSS, com precisão centimétrica, georreferenciado ao referencial PT-TM06/ETRS89 – *European Terrestrial Reference System 1989*, e método de posicionamento relativo com medição da fase e cálculo em tempo real (RTK - *Real Time Kinematic*).

Os valores da diferença de potencial medida pelos diversos dipolos e a sua localização serão armazenados numa base de dados a desenvolver no âmbito do projeto. No fim do ensaio de toda a base do aterro de resíduos, será assim possível obter uma carta de potencial, onde serão identificáveis os orifícios detetados, constando as suas coordenadas no relatório produzido, para fácil localização das áreas a reparar.

Encontra-se em fase de conclusão o módulo de controlo, leitura automática do potencial elétrico e armazenamento dos dados colhidos, igualmente desenvolvido de forma modular – cada placa eletrónica controla 16 elétrodos. As principais componentes deste módulo, que será instalado na estrutura do equipamento de ensaio, são um ecrã tátil, para fácil interface com o utilizador, e um seletor de elétrodos (Figura 9). Mais pormenores sobre um protótipo deste módulo podem ser consultados em Matutino et al. (2011).



Figura 8 – Módulo de elétrodos com o sistema de georreferenciação geográfica

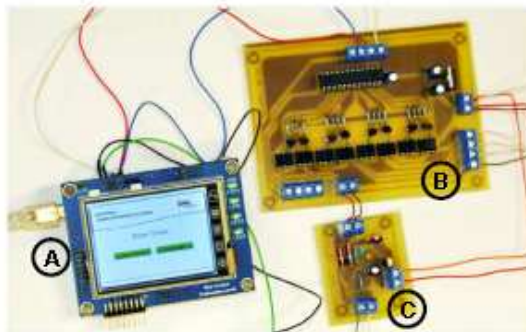


Figura 9 – Módulo de controlo, leitura e armazenamento: A – ecrã tátil; B – seletor de elétrodos e C – condicionador de sinal (Matutino et al., 2011)

4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na primeira instalação piloto, construída em laboratório (ISEL), com as dimensões de 1,80 m x 1,80 m x 0,75 m, variaram-se os materiais em contacto com a GM (geotêxtil e areia) e o seu teor em água e produziram-se orifícios na GM com diferentes formas e dimensões, em localizações conhecidas (Figura 10). O objetivo desta abordagem foi estudar a eficácia do protótipo, em versão reduzida. Detalhes dos ensaios realizados encontram-se descritos em Lopes et al. (2011 e 2012).

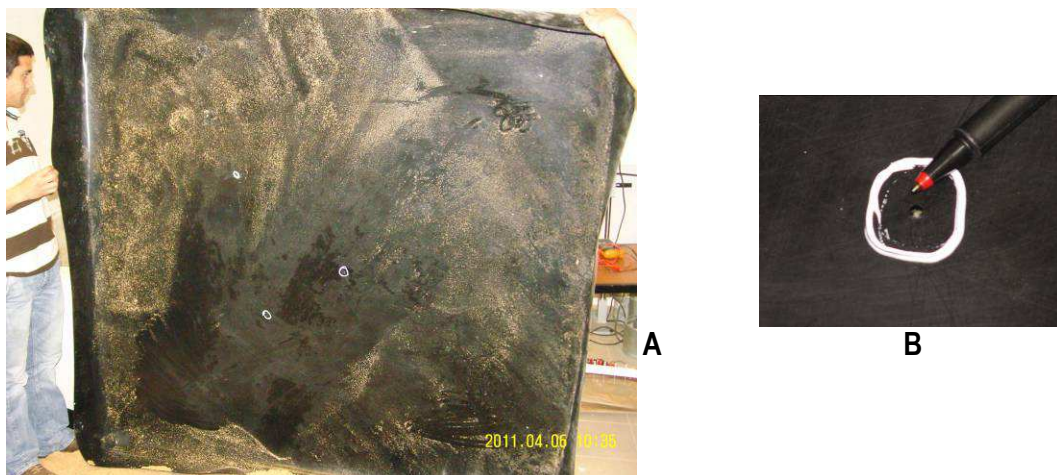


Figure 10 – **A** - geomembrana com três furos. **B** - exemplo de um furo com 2 mm

Realizaram-se inúmeros ensaios com os vários protótipos apresentados na secção anterior e sob diversas condições. Em cada ensaio, os protótipos foram deslocados ao longo de linhas marcadas na instalação piloto com espaçamento igual ao dos dipolos de leitura utilizados. Foram efetuadas leituras da diferença de potencial elétrico em cada dipolo de leitura ao longo de cada uma destas linhas, e em combinações de dipolos, para utilização de diferentes distâncias dipolares com o mesmo dispositivo. Constituíram-se assim, para cada modelo, diversos perfis de leitura igualmente espaçados em toda a superfície útil da instalação – 1,0 m x 1,0 m (afastou-se sempre o dispositivo 0,40 m de cada lado das paredes, para evitar efeitos de fronteira e a influência da curvatura da GM junto às paredes).

Por forma a ilustrar os resultados obtidos e a comprovar a eficácia da metodologia seguida selecionaram-se dois dos vários ensaios realizados. Assim, apresentam-se na Figura 11 os resultados obtidos num ensaio em que foi executado um orifício com 2 mm na GM e, na Figura 12, aqueles obtidos num ensaio em que a GM possuía dois orifícios com 2 mm de diâmetro. Em cada exemplo os resultados são apresentados em perspetiva 3D, para melhor compreensão do comportamento do campo elétrico na proximidade do orifício ao longo dos vários perfis de leitura, e em 2D.

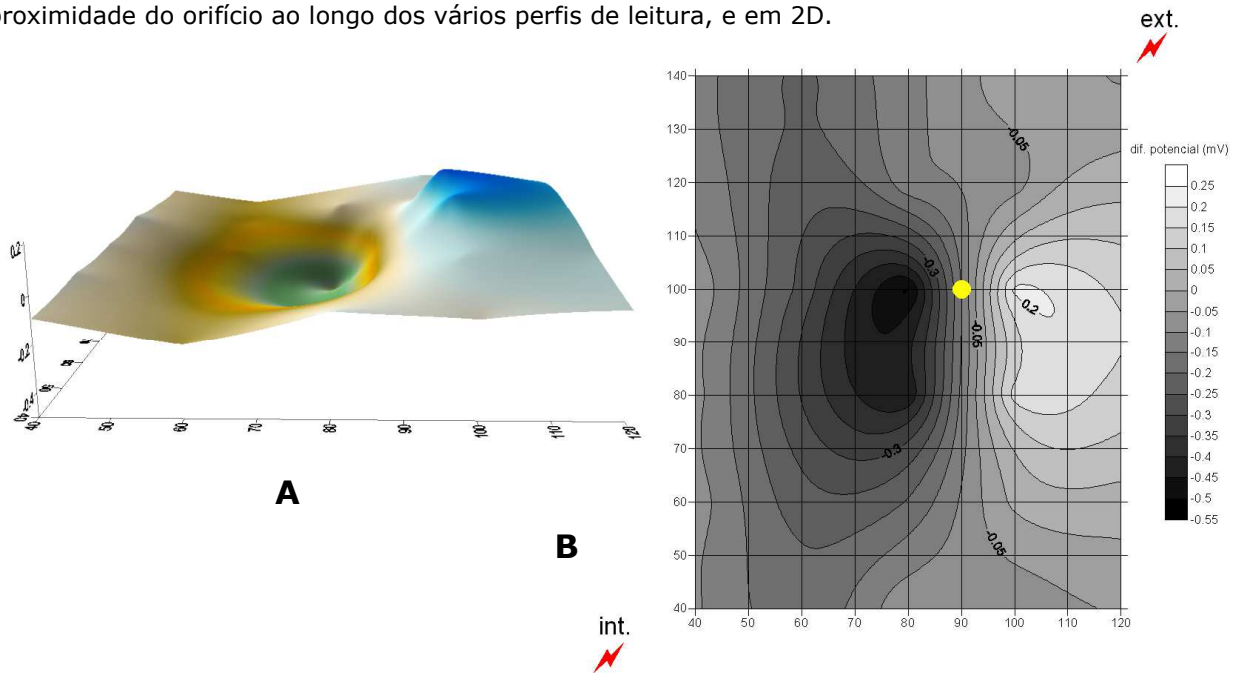


Figura 11 - Resultados obtidos com dipolos de leitura de 0,20 m: **A** – imagem 3D dos valores medidos; **B** – mapa com as diferenças de potencial medidas (o ponto a cor amarela marca o local onde foi executado o furo com 2 mm de diâmetro; assinalam-se a cor encarnada as posições relativas entre os eléctrodos de injeção – interior e exterior)

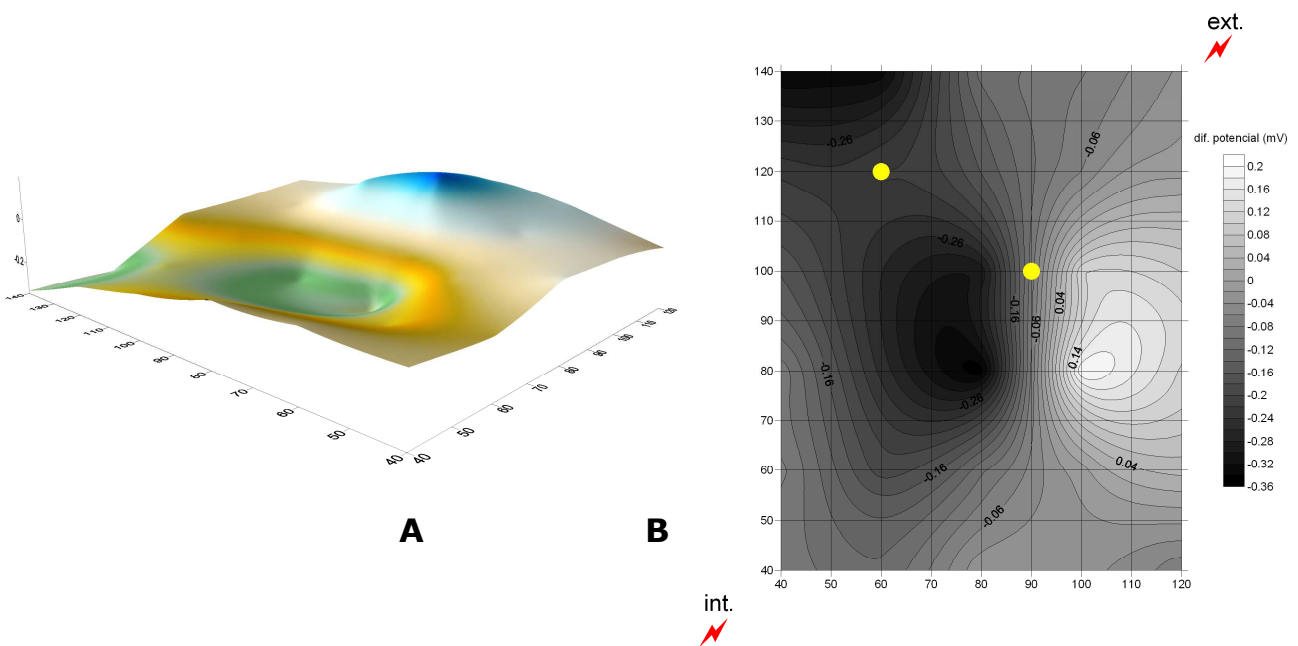


Figura 12 - Resultados obtidos com dipolos de leitura de 0,20 m: **A** – imagem 3D dos valores medidos; **B** – mapa com as diferenças de potencial medidas (os ponto a cor amarela marcam os locais onde foram executados os furos com 2 mm; assinalam-se a cor encarnada as posições relativas entre os eléctrodos de injeção – interior e exterior)

A comparação entre a apresentação dos resultados em gráfico diferença de potencial *versus* distância, constante na Figura 4 e aquelas presentes nas Figuras 11 e 12, sob a forma 2D e 3D, mostra que a melhor visualização, i.e. aquela onde mais facilmente se identificam os orifícios na geomembrana, é a bidimensional. Com base nos mapas bidimensionais identificam-se os orifícios como sendo os locais onde ocorre o maior gradiente das diferenças de potencial elétrico.

5 - CONCLUSÕES

Os resultados já obtidos com os protótipos desenvolvidos, dotados com um sistema fixo de múltiplos dipolos de leitura e com georreferenciação, permitiram efetuar um varrimento uniforme de toda a base da instalação piloto com uma clara identificação dos orifícios presentes na geomembrana.

Foi ainda possível concluir que a existência de mais do que um orifício reduz a amplitude do sinal respeitante a cada um deles, podendo mesmo mascarar-los se se encontrarem demasiado próximos.

Os resultados obtidos até ao momento sugerem que o equipamento em desenvolvimento poderá realizar em 1/8 do tempo, o mesmo trabalho que um dipolo móvel de leitura ou, em alternativa, um único operador deste equipamento conseguirá fazer no mesmo tempo o mesmo que 8 operadores com um dipolo móvel de leitura, o que constitui um significativo incremento na produtividade do método de ensaio descrito na norma ASTM D7007-03, com claras vantagens do ponto de vista económico.

Por fim, é de destacar que o armazenamento dos valores medidos das diferenças de potencial elétrico e respetivas localizações permitem a produção de mapas onde as anomalias do campo elétrico indicam a localização dos orifícios existentes na geomembrana. Com o dipolo móvel de leitura não é possível obter estes mapas, uma vez que este apenas está equipada com um multímetro, que poderá ter capacidade de armazenamento dos dados, mas não tem capacidades de georreferenciação.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento concedido no âmbito do Projeto PTDC/AAC-AMB/102846/2008.

REFERÊNCIAS

- ASTM D7007-03. (2003). Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials.
- Colucci, P. e Lavagnolo, M. C. (1995). Three Years Field Experience in Electrical Control of Synthetic Landfill Liners. *Proceedings of Fifth International Landfill Symposium: Sardinia'95*, Vol. 2, Cagliari, Sardinia, Italia, pp. 437-452.
- Lopes, M. G., Barroso, M., Mota, R., Matutino, P., Silva, F. e Dores, R. (2011). Protótipo laboratorial para detecção de orifícios em geomembranas: ensaios na instalação piloto do ISEL. *4º Seminário Português sobre Geossintéticos*, UA, Aveiro, Portugal, CD-ROM, 8 p.
- Lopes, M. G., Barroso, M., Mota, R., Matutino, P., Dores, R. e Silva, F. (2012). Suitability of a semi-automatic mobile system for detecting defects of different sizes and shapes in landfill liners. *Comunicação aceite para apresentação no 2nd Pan American Geosynthetics Conference y Exhibition GeoAmericas 2012*, 9 p.
- Matutino, P. M., Dias, T., Cigarro, A., Vitorino, C., Mota, R., Lopes, M. G., Barroso, M., Dores, R. e Silva, F. (2011). Embedded data acquisition system for effectiveness of lining systems, *Proceedings CETC 2011*, ISEL, Paper nº 83.
- Mota, R., Matutino, P. M., Barroso, M., Lopes, M. G., Dores, R. e Silva, F. (2011). Laboratorial prototype for detection of defects on geomembranes – the geophysical approach. *Proceedings 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Leicester, Reino Unido, 4 p.
- Needham, A. D., Gallagher, E. M. G. e Smith, J. W. N. (2004). Prediction of the Long Term Generation of Defects in HDPE Liners. *Proceedings of EuroGeo 3*, Vol. 2, Munich, Germany, pp. 507-514.
- Nosko, V. e Touze-Foltz, N. (2000). Geomembrane Liner Failure: Modelling of its influence on contaminant transfer. *Proceedings of EuroGeo 2*, Vol. 2, Bologna, Italy, pp. 557-560.
- Peggs, I.D. (1996). Defect Identification, Leak Location, and Leak Monitoring in Geomembrane. *Proceedings of Geosynthetics: Applications, Design and Construction*, Balkema, Rotterdam, Nederland, pp. 611-618.

- Peggs, I. D. e Wallace, R. B. (2008). Challenges and lessons learned during geoelectric leak location surveys on a complex triple lining system. *Proceedings of the 1st Pan American Geosynthetics Conference*, Cancun, Mexico, pp. 705-711.
- Peggs, I.D. e Beck, A. (2010). Liner Integrity Surveys and Assessments - Short Course Notes.
- Rollin, A.L., Marcotte, M. e Chaput, L. (2002). Lessons Learned from Geo-electrical Leaks Surveys. *Proceedings of Seventh International Conference on Geosynthetics*, Vol. 2, Nice, France, pp. 527-530.
- Rollin, A.L., Jacquelin, T., Forgot, B. e Saunier, P. (2004). A guide to detect leaks on installed geomembranes. *Proceedings of EuroGeo 3*, Vol. 1, Munich, Germany, pp. 235-240.
- Sheriff, R. (1990). *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics*. Society of Exploration Geophysics, 3ª Edição, 376 p.