

SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS DE RESÍDUOS: EQUIPAMENTO SEMIAUTOMÁTICO PARA DETEÇÃO DE ORIFÍCIOS EM GEOMEMBRANAS (GeoSafe)

WASTE LANDFILL LINING SYSTEMS: SEMIAUTOMATIC EQUIPMENT FOR DETECTING HOLES IN GEOMEMBRANES (GeoSafe)

Barroso, Madalena; *LNEC, Lisboa, Portugal, mbarroso@lnec.pt*
Lopes, Maria da Graça; *ISEL, Lisboa, Portugal, glopes@dec.isel.pt*
Mota, Rogério; *LNEC, Lisboa, Portugal, rmota@lnec.pt*
Coimbra, Luís; *LNEC, Lisboa, Portugal, lcoimbra@lnec.pt*
Matutino, Pedro; *ISEL, Lisboa, Portugal, pmiguens@deetc.isel.pt*
Dores, Rui; *EGF, Lisboa, Portugal, r.dores@adp.pt*
Silva, Francisco; *APA, Lisboa, Portugal, francisco.silva@apambiente.pt*

RESUMO

Os aterros de resíduos são obras concebidas para minimizar o efeito poluente dos resíduos no meio ambiente, mediante a utilização de sistemas basais de impermeabilização que incluem geomembranas, cujo desempenho é fundamental para garantir a eficácia de tais sistemas. O desempenho da geomembrana pode, porém, ser comprometido pela presença de orifícios, resultantes, sobretudo, de atividades construtivas inadequadas o que potencia a migração de contaminantes para o subsolo e para as águas subterrâneas, pelo que é indispensável proceder à deteção dos orifícios e à sua reparação, antes do início da exploração do aterro. Não existindo em Portugal um equipamento que permitisse a realização de ensaios expeditos e pouco onerosos para a deteção de orifícios em geomembranas, foi desenvolvido um equipamento designado por GeoSafe. Neste artigo apresenta-se o equipamento, bem como os resultados obtidos até agora.

ABSTRACT

Landfills contain basal lining systems that include composite liners, among which a geomembrane. The success of these systems depends mainly on the geomembrane performance, which acts as the primary barrier to contaminants migration. Geomembrane performance is conditioned by the presence of holes, which represent preferential pathways for leachate migration. In Portugal there was no device to allow expeditious and inexpensive tests for detecting holes in geomembranes, so an equipment designed by GeoSafe was developed. This paper presents this equipment and results so far obtained.

1 - INTRODUÇÃO

Os aterros de resíduos são obras de engenharia geotécnica concebidas para minimizar o efeito poluente dos resíduos no meio ambiente, mediante a utilização de sistemas de impermeabilização e drenagem na base, nos taludes e na cobertura final (sistema de encerramento).

Os sistemas de impermeabilização e drenagem incluem diversas camadas, com diferentes funções, destacando-se o papel das barreiras, em particular da geomembrana, cujo desempenho é fundamental para garantir a funcionalidade de tais sistemas.

O desempenho da geomembrana pode, porém, ser comprometido pela presença de orifícios, resultantes, sobretudo, de atividades construtivas inadequadas, em particular, da colocação da camada de drenagem de lixiviados sobre as barreiras do sistema de impermeabilização.

A presença de orifícios na geomembrana potencia a migração de contaminantes para o subsolo e para as águas subterrâneas, sendo indispensável proceder à sua reparação, antes do início da exploração do aterro de resíduos, para não se pôr em risco a eficácia desta barreira. Assim, após a colocação da camada de drenagem, é necessário proceder à deteção e localização dos orifícios na geomembrana.

Em Portugal, não existia nenhum equipamento que permitisse a realização de ensaios expeditos e pouco onerosos para deteção e localização de orifícios em geomembranas, pelo que foi desenvolvido um equipamento, abreviadamente designado por GeoSafe, com esse objetivo.

Este equipamento constitui o primeiro passo para a realização de ensaios de deteção e localização de orifícios, no nosso país, ensaios que, a serem integrados nas atividades de controlo e garantia de qualidade da construção, contribuirão para o eficaz desempenho das geomembranas, com os benefícios daí decorrentes para o meio ambiente.

O presente artigo visa divulgar as potencialidades do GeoSafe na realização de ensaios de deteção e localização de orifícios em geomembranas, relativamente a outros equipamentos estrangeiros existentes.

O desenvolvimento do GeoSafe e da correspondente metodologia de ensaio ocorreu no âmbito do projeto PTDC/AAC-AMB/102846/2008, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), envolvendo o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC), que coordenou o projeto, o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) e a Empresa Geral do Fomento (EGF).

2 - MÉTODOS DE ENSAIO PARA DETEÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE ORIFÍCIOS EM GEOMEMBRANAS COBERTAS

Os métodos de ensaio (não-destrutivos) desenvolvidos para verificar a estanqueidade de geomembranas cobertas, destinam-se só a detetar danos que impliquem a subsequente fuga de fluidos, ou seja, aqueles que afetam a geomembrana em toda a sua espessura. Estes métodos podem ser permanentes ou temporários.

2.1 - Método permanente

O método utiliza um sistema com sensores fixos/permanentes para deteção e localização de orifícios e permite a realização de ensaios (*grid test*) segundo a norma ASTM D 6747 (2012), para verificação da estanqueidade da geomembrana. Para a realização destes ensaios, antes da colocação da geomembrana, é necessária a colocação no solo, a pequena profundidade, de uma rede de sensores, segundo uma quadrícula pré-definida (fixa/permanente). Cada sensor é ligado através de um cabo elétrico a um aparelho de aquisição de dados, situado na proximidade da obra. Depois da colocação da geomembrana (ou após a colocação da camada drenante) instala-se um gerador de corrente elétrica, ao qual se ligam dois eléctrodos, um colocado acima da geomembrana e outro (o eléctrodo terra) colocado no solo de fundação. Quando uma corrente elétrica é aplicada, a densidade de corrente sob a geomembrana pode ser medida pelos diferentes sensores. Qualquer perfuração da geomembrana provoca uma anomalia na distribuição da densidade da corrente elétrica (Figura 1).

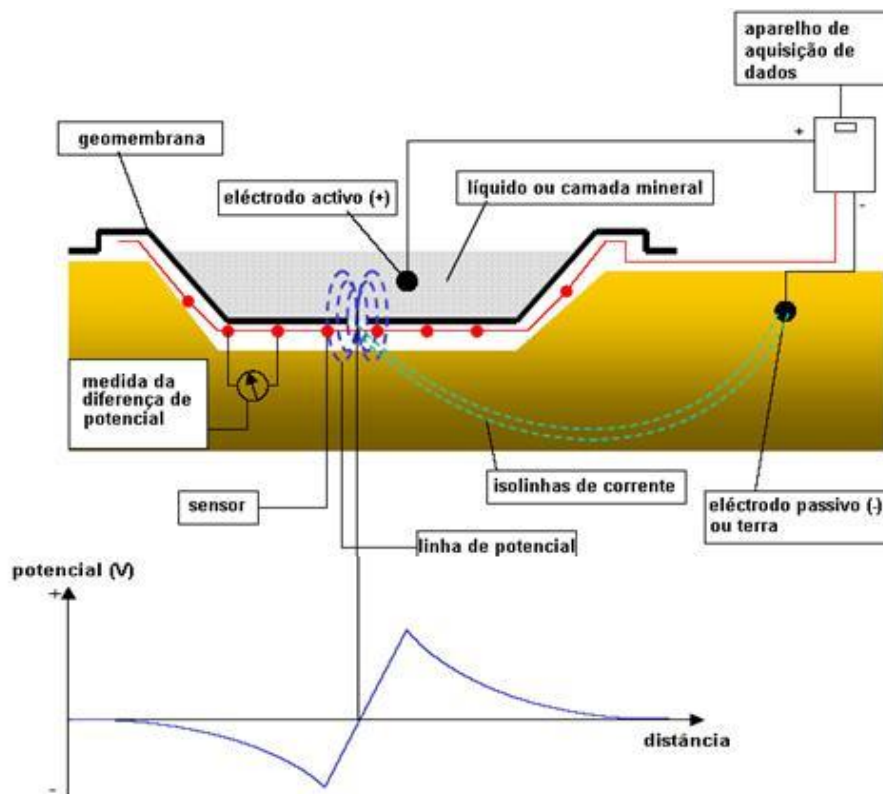


Figura 1 - Esquema do Ensaio que Utiliza um Sistema de Sensores Fixos para Deteção e Localização de Orifícios na Geomembrana (CFG, 2003)

Através de uma aplicação informática específica podem localizar-se os orifícios da geomembrana com bastante precisão. Este método permite localizar orifícios com uma precisão correspondente a 15% do espaçamento entre dois sensores, que varia normalmente entre 0,5 a 1 m. A área máxima de ensaio não deve ser superior a 10 000 m² (compreendendo em média entre 130 a 200 sensores), sendo necessário

entre 5 e 12 minutos para se efetuarem as leituras, após calibração do equipamento. Este ensaio pode ser realizado em geomembranas (não condutoras), cobertas ou não, desde que os materiais em contacto com as suas superfícies inferior e superior sejam condutores e o mais homogêneos possível. A principal desvantagem deste método relaciona-se com a necessidade de colocação prévia da rede de sensores no solo. Uma vantagem deste método é permitir a realização de ensaios não só após a colocação da camada drenante, mas também durante o período de exploração do aterro, apesar de, neste período, já ser difícil implementar medidas corretivas, caso sejam detetados orifícios na geomembrana.

2.2 - Métodos temporários

2.2.1 - Ensaio da geomembrana condutora

Neste ensaio é necessário utilizar uma geomembrana com uma camada inferior condutora fina (com cerca de 0,1 mm). Essa camada consegue ser eletricamente condutora por possuir um elevado teor em negro de carbono. Este ensaio realiza-se de acordo com a norma ASTM D 6747 (2012), começando por carregar uma placa condutora de neoprene, colocada na superfície superior da geomembrana, com uma tensão entre 15 a 30 kV. A carga é transferida para a camada condutora da geomembrana através do efeito capacitivo. De seguida, com a ajuda de uma vassoura elétrica faz-se a prospeção da superfície superior não condutora da geomembrana. Quando existe um orifício estabelece-se uma corrente, gerando uma faísca e/ou um sinal sonoro (Figura 2). A velocidade de prospeção é da ordem dos 500-1500 m²/hora/aparelho por equipa de dois operadores, podendo detetar-se orifícios da ordem do milímetro. Uma das vantagens deste ensaio é que não é necessário bombear água para a zona de ensaio, aliás a geomembrana tem estar seca (não devendo realizar-se o ensaio em dias de chuva) e funciona bem para qualquer inclinação dos taludes. Em geomembranas cobertas embora se consiga detetar o orifício a sua localização precisa é difícil. Uma das vantagens da utilização de geomembranas condutoras é que não é necessário garantir um bom contacto com a camada subjacente à geomembrana, no entanto a realização do ensaio é limitada a este tipo de geomembranas. A presença de rugas na geomembrana pode diminuir a velocidade do ensaio.



Figura 2 – Esquema do Ensaio da Geomembrana Condutora (adaptado de ASTM D 6747, 2012)

2.2.2 - Ensaio da sonda elétrica móvel

Em geomembranas cobertas, e não condutoras, usa-se o ensaio da sonda elétrica móvel, segundo a norma ASTM D 7007 (2009). Neste ensaio utilizam-se dois elétrodos, um colocado no solo subjacente à geomembrana e outro colocado no material que cobre a superfície superior da geomembrana, de modo a estabelecer-se entre eles uma diferença de potencial. Os dois elétrodos são ligados a um gerador de corrente contínua. Com a ajuda de uma sonda elétrica móvel efetuam-se medidas de potencial elétrico, segundo uma malha pré-definida. Uma mudança de sinal nos valores medidos pode indicar a existência de um orifício. Como o campo de potencial diminui à medida que a sonda se afasta do elétrodo, se tal não acontecer e se pelo contrário se verificar um aumento do potencial, significa que a sonda está na proximidade de um orifício. O potencial é máximo quando a sonda se encontrar mesmo por cima do orifício (Figura 3).

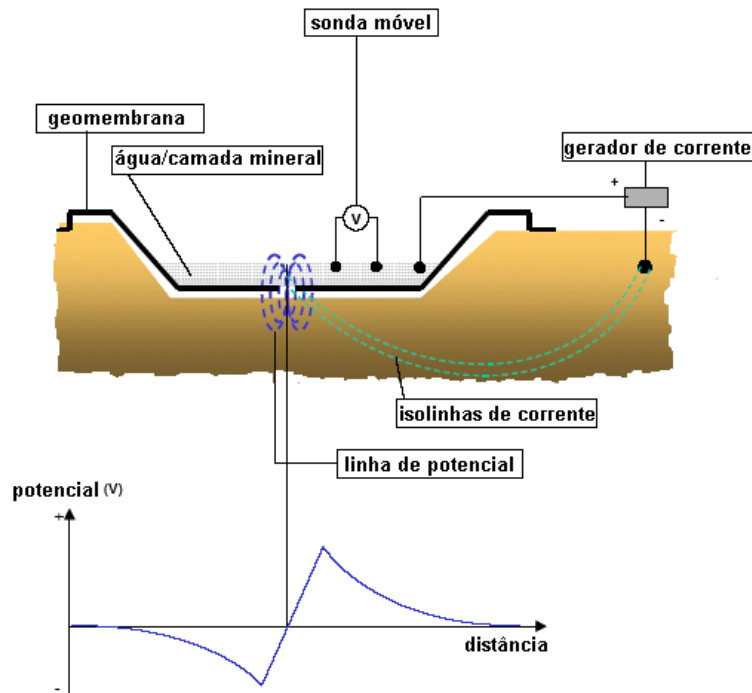


Figura 3 – Esquema do Ensaio da Sonda Elétrica Móvel (CFG, 2003)

Depois da colocação e calibração do aparelho de aquisição de dados, o tempo de leitura é imediato e a interpretação dos resultados é de cerca de 10 minutos. A velocidade de prospeção depende do tipo de material que cobre a geomembrana, da geometria do local e das condições meteorológicas, variando entre 400 a 1000 m²/hora por operador, podendo detetar orifícios superiores a 2-3 mm. A grande vantagem deste ensaio é poder ser realizado, mesmo com tempo chuvoso, em geomembranas (não condutoras) cobertas, sem necessidade de colocação de uma rede de sensores na camada subjacente à geomembrana. Uma limitação do ensaio é que só é possível realizar-se quando os materiais em contacto com as superfícies inferior e superior da geomembrana tenham alguma humidade (1 a 2% do peso é suficiente). A existência, por exemplo, de uma argila muito seca, ou de uma geogrelha pode comprometer os resultados das medidas. Outra limitação é que a existência de orifícios maiores pode mascarar a existência de outros mais pequenos.

2.3 - Vantagens e limitações dos métodos

No Quadro 1 apresenta-se uma síntese dos métodos referidos e respetivas vantagens e limitações.

Quadro 1- Métodos de Ensaio para Detecção e Localização de Orifícios de Geomembranas Cobertas: Vantagens e Limitações

	métodos de ensaio	Vantagens	Limitações
Método permanente	ensaio com sistema fixo de deteção e localização de orifícios (<i>the grid test</i>)	* utilização não só após a colocação da camada drenante, mas também durante o período de exploração do aterro	* necessidade de colocação prévia de uma rede de sensores no solo subjacente à geomembrana * os materiais em contacto com as superfícies inferior e superior da geomembrana têm de ser condutores
	ensaio da geomembrana condutora (<i>electrically conductive geomembrane test</i>)	* não é necessário bombear água para a zona de ensaio * não é necessário garantir um bom contacto com a camada subjacente à geomembrana	* necessidade de geomembrana condutora * a geomembrana deve estar seca * permite detetar o orifício mas a sua localização não é muito precisa
Métodos temporários	ensaio da sonda eléctrica móvel (<i>the soil covered geomembrane test</i>)	* não há necessidade de colocação prévia de uma rede de sensores no solo subjacente à geomembrana * pode ser realizado durante o tempo chuvoso	* os materiais em contacto com a superfície inferior da geomembrana têm de ser condutores e estarem húmidos * a existência de orifícios maiores pode mascarar a existência de outros mais pequenos

3 - EQUIPAMENTO SEMIAUTOMÁTICO DESENVOLVIDO PARA DETEÇÃO DE ORIFÍCIOS EM GEOMEMBRANAS (GeoSafe)

Face às limitações dos métodos referidos no item anterior, procurou-se desenvolver um equipamento que fosse vantajoso comparativamente com os equipamentos existentes no estrangeiro e, nomeadamente, permitisse a realização de ensaios de forma rápida e, conseqüentemente, menos onerosa. Outra exigência era que o equipamento pudesse ser utilizado em diferentes tipos de sistemas de impermeabilização, em particular, nos aterros de resíduos onde a presença da geomembrana é um requisito (aterros para resíduos não-perigosos e perigosos). De referir que os equipamentos atualmente existentes foram desenvolvidos para deteção e localização de orifícios em sistemas de impermeabilização de aterros não perigosos, constituídos, apenas, por uma geomembrana e uma camada de solo argiloso compactada, que não é a solução geralmente adotada em Portugal, nem a preconizada para aterros de resíduos perigosos. Pretendia-se ainda desenvolver uma metodologia de ensaio que fosse independente da perícia e da experiência do operador, com vista a tornar os resultados mais fiáveis, nomeadamente, que permitisse a deteção e localização dos orifícios de forma automática. Esta abordagem é muito vantajosa na medida em que garante a cobertura integral da área a ensaiar, contrariamente ao que acontece quando a deteção e localização dos orifícios é realizada de forma manual.

No que se refere ao equipamento desenvolvido (GeoSafe), de referir que foi um processo iterativo, que envolveu a construção de dois protótipos, um para utilização em laboratório e outro para utilização em campo, cada um deles com várias versões, resultantes de melhoramentos sucessivos que os mesmos foram incorporando. O desenvolvimento foi realizado com base no método da sonda elétrica móvel, cujo princípio de funcionamento é idêntico ao método geofísico da resistividade elétrica, e na técnica de cabos multicondutores utilizada nos equipamentos geofísicos mais recentes.

3.1 - Princípio de funcionamento do equipamento

O desenvolvimento do protótipo baseou-se, como referido, no mesmo princípio de funcionamento do método geofísico da resistividade elétrica, que consiste na aplicação de uma corrente elétrica no terreno, por meio de dois elétrodos (dipolo de injeção) e medição, por meio de outro par de elétrodos (dipolo de leitura), da diferença de potencial elétrico do campo elétrico assim gerado. No caso do equipamento desenvolvido, os elétrodos do dipolo de injeção são colocados, um, no terreno natural e, o segundo, no material drenante colocado sobre a geomembrana (Figura 4).

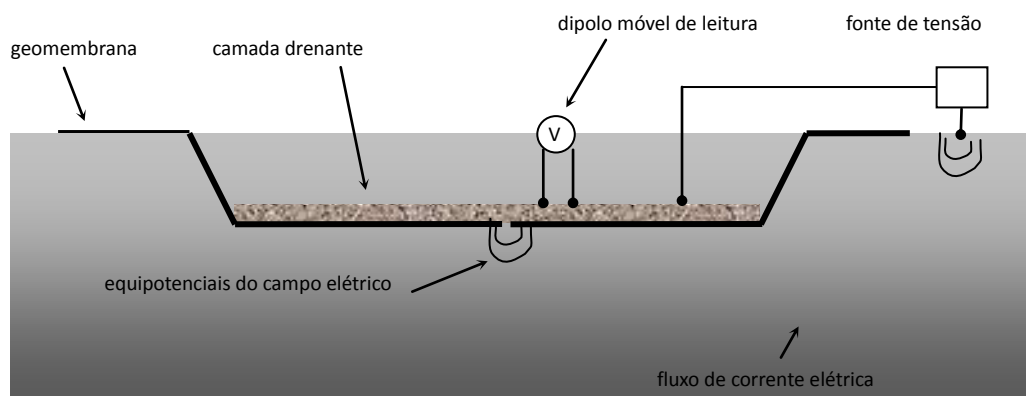


Figura 4 – Princípio de Funcionamento do Método Elétrico para Deteção e Localização de Orifícios em Geomembranas

Sendo a geomembrana um material não condutor da corrente elétrica, esta apenas flui entre os dois elétrodos se a geomembrana tiver orifícios. Deste modo, sendo homogéneo o material que constitui a camada sobrejacente à geomembrana e mantendo-se constante a tensão elétrica aplicada, a diferença de potencial elétrico medida com o dipolo de leitura deverá ser sempre reduzida e equivalente ao potencial espontâneo natural dos terrenos; apenas ocorrendo uma alteração do mesmo em presença de um orifício. À medida que o dipolo de leitura se aproxima de um orifício o potencial elétrico aumenta em termos absolutos, ocorrendo uma inversão de polaridade após passagem pelo orifício (Figura 5).

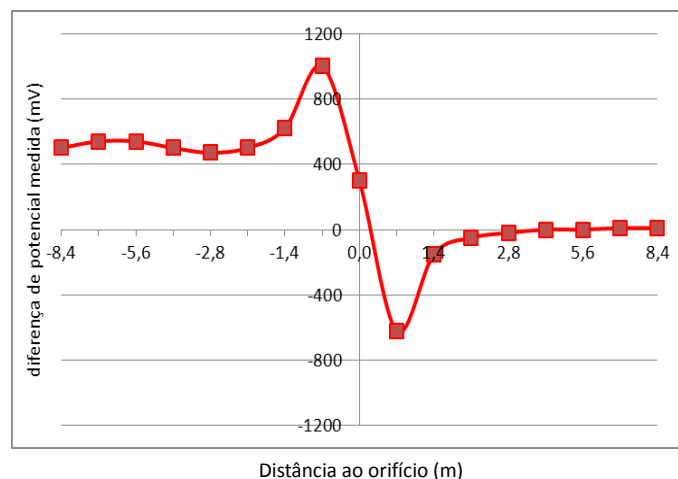


Figura 5 – Variação do Potencial Elétrico Próximo de um Orifício com 0,635 cm de Diâmetro (adaptado de Peggs & Beck, 2010)

3.2 - GeoSafe – o equipamento e a metodologia de ensaio

A primeira versão do protótipo foi desenvolvida para utilização em laboratório, numa instalação piloto de pequena escala com o objetivo de avaliar a sua precisão para detetar orifícios de diferentes dimensões e distâncias, bem como a sua operacionalidade para diferentes condições de saturação dos diversos materiais de contacto com a parte superior da geomembrana. A primeira versão do protótipo era constituída por 101 eléttodos de leitura, espaçados de 1 cm, montados numa barra de material não condutor (Figura 6a). Verificando-se que este afastamento dos eléttodos não era prático procedeu-se à construção de uma segunda versão do protótipo laboratorial, constituído com 8 eléttodos de leitura, com distância dipolar de 15 cm (Figura 6b). Esta versão revelou também limitações, nomeadamente, fragilidades na estrutura e um desadequado espaçamento entre eléttodos de leitura, pelo que se construiu uma terceira versão, com 20 dipolos e com a possibilidade de seleccionar o espaçamento entre os eléttodos de leitura mais apropriado, entre 5, 10, 15 e 20 cm (Figura 6c).



Figura 6 – Protótipos Laboratoriais de Pequena Escala

A injeção da corrente era realizada através de dois eléttodos de pequenas dimensões, colocados nos solos subjacente e sobrejacente à geomembrana, de modo a estabelecer-se a diferença de potencial entre o solo exterior e o meio interno, ligados a uma fonte de tensão (Figura 7).

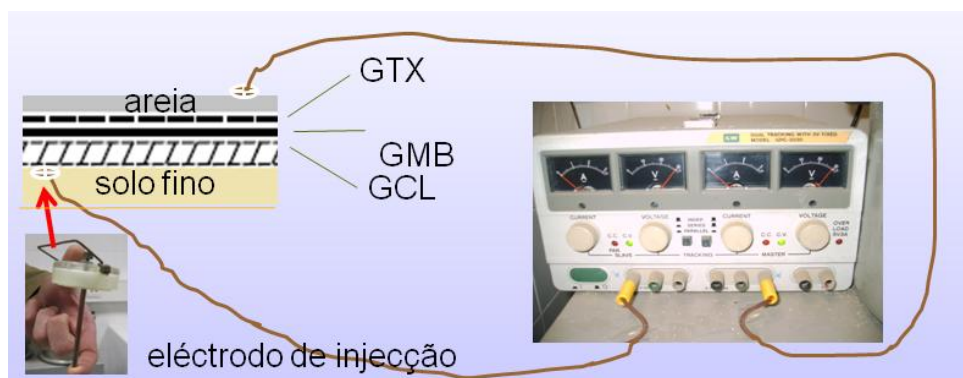


Figura 7 – Fonte de Tensão e Eléttodos

As medições da diferença de potencial foram realizadas com recurso a um multímetro, ligado por cabos aos elérodos de leitura, sendo o registo dos resultados realizado manualmente. Os dados recolhidos eram tratados numa folha de cálculo do programa *Microsoft Excel*. Foi desenvolvida uma interface gráfica, para visualização dos valores lidos com o resistivímetro.

Com base nos resultados obtidos com as diferentes versões do protótipo laboratorial, bem como nos desenvolvimentos entretanto alcançados em termos de aplicações informáticas, foi concebido e construído um protótipo de grandes dimensões, para detetar e localizar orifícios em geomembranas aplicadas em aterros de resíduos.

Para este protótipo de grandes dimensões, foi construída uma estrutura com quatro rodas, à qual se encontrava acoplada uma malha de elérodos de leitura com movimento ascendente e descendente. Os elérodos de leitura foram montados, segundo uma quadrícula de 4 x 4. Para além dos elérodos de leitura, o protótipo integrava um módulo de controlo, leitura e armazenamento de dados e correspondente interface para ligação ao *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS); um sistema de georreferenciação dos orifícios por satélite GNSS e método de posicionamento relativo com medição da fase e cálculo em tempo real e ainda um computador portátil para acomodar as aplicações informáticas desenvolvidas, respetivamente, para servir de interface entre o protótipo e o GNSS e para processamento dos dados e elaboração de cartas de potencial elétrico, cuja análise permite detetar os orifícios e determinar a sua localização em termos de coordenadas geográficas. Faziam ainda parte do protótipo, um par de elérodos de injeção ligados a uma fonte de alimentação. Na Figura 8 apresenta-se uma vista geral deste protótipo.

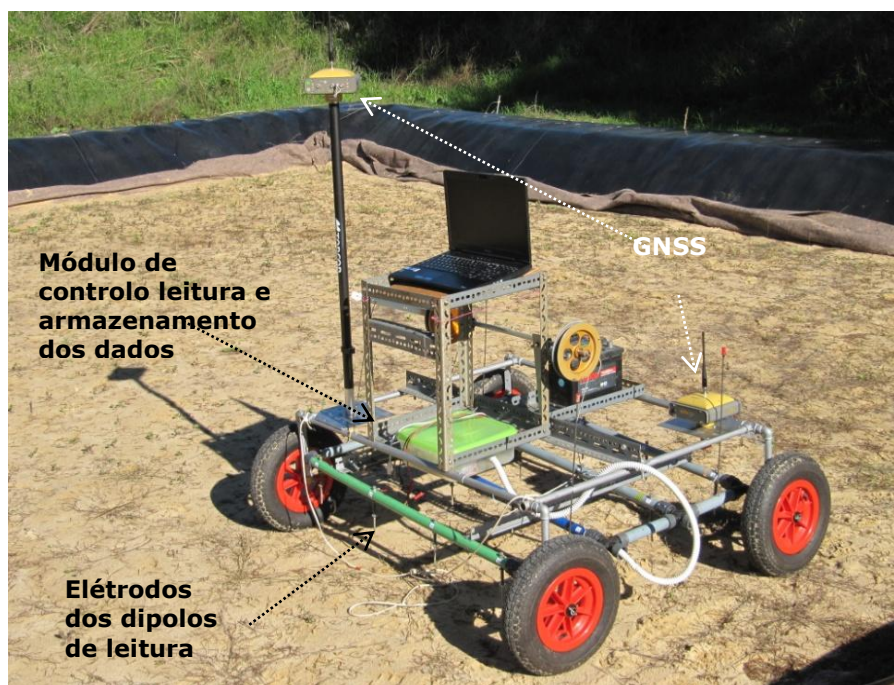


Figura 8 – Vista Geral do Protótipo de Grandes Dimensões

Tendo-se constatado que este protótipo não era suficientemente robusto, nem permitia a realização de ensaios com a celeridade pretendida, foi necessário conceber e construir uma outra versão (definitiva) do protótipo para colmatar as limitações referidas, na sua utilização *in situ*.

Para o protótipo final, designado GeoSafe, optou-se por utilizar perfis técnicos em alumínio para a estrutura do equipamento, para maior facilidade de acoplamento e resistência. O modelo de perfil foi escolhido mediante modelação estrutural simplificada, incluindo as características da secção a avaliar, a conceção pré-estabelecida, a carga vertical estimada e a força horizontal necessária para ultrapassar um obstáculo com um terço do diâmetro da roda utilizada.

O GeoSafe foi desenvolvido de forma modular, em módulos de 1 m x 1 m, com o objetivo de facilitar o seu transporte para o campo e, também, para ser escalável. O espaçamento entre módulos é igual à distância entre elérodos de leitura. Sendo a estrutura modular, utilizaram-se tubos redondos em aço para ligação entre módulos, fixados por intermédio de abraçadeiras industriais em alumínio. Novamente, a secção de tubo foi escolhida pelo mesmo método aplicado à seleção do perfil técnico.

O protótipo anterior demonstrou haver necessidade de componentes rolantes com maior dimensão. Por esta razão, bem como pelo controlo da direção ser imperativo para operar quatro módulos, optou-se por utilizar forquilha e rodas de bicicleta adaptadas à estrutura. Considerando a dimensão do seixo

comumente utilizado em aterro de resíduos, foram escolhidas rodas para bicicleta do tipo BMX, normalmente mais largas e espessas, com diâmetro de 20" (508 mm). O acoplamento à estrutura realiza-se por intermédio de abraçadeiras industriais, envolvendo a montagem integral das forquilhas.

O sistema de elevação da malha manteve-se manual, embora reorganizado e com materiais mais adequados. Este sistema baseia-se em roldanas de aço, que encaminham uma série de cabos de aço até roldanas de maior diâmetro operadas por uma manivela. O sistema foi redesenhado para proporcionar melhor ergonomia, maior estabilidade e redução do esforço necessário à elevação da malha. Para evitar o deslocamento lateral da malha em planos inclinados, manteve-se o princípio de utilização de guias verticais empregue na primeira versão do protótipo de grandes dimensões.

Na Figura 9 apresenta-se o esquema do GeoSafe e, na Figura 10, a fotografia do Módulo 1.

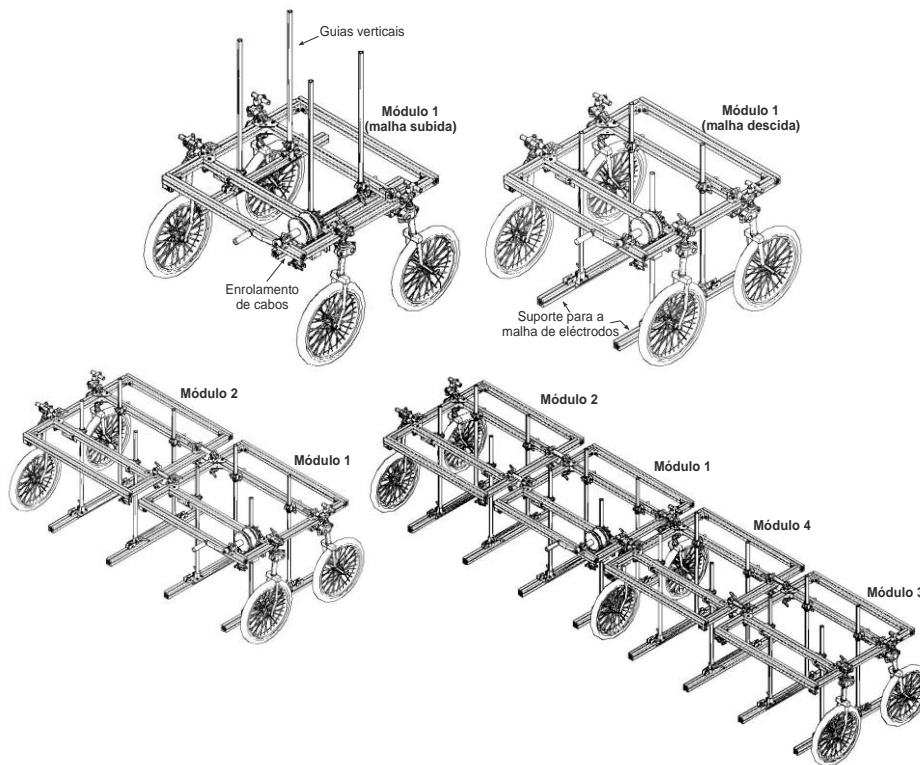


Figura 9 – Esquema do GeoSafe



Figura 10 – Vista Geral do GeoSafe (Módulo 1)

No módulo de acondicionamento e aquisição de sinal (Matutino *et al.*, 2011) procede-se à seleção do par de elétrodos no qual se realiza a medição da diferença de potencial; ao acondicionamento do sinal de entrada e à conversão do sinal analógico para digital. Os valores da diferença de potencial medida pelos diversos dipolos são transmitidos, em formato digital, para o módulo de controlo e armazenados, juntamente com os dados de georeferenciação dos dipolos, numa base de dados.

Com base nestes elementos, é possível obter, no fim do ensaio, de toda a base do aterro de resíduos, uma carta de potencial elétrico. A partir da posterior análise destas imagens bidimensionais, assinalam-se os orifícios detetados, constando as suas coordenadas no relatório produzido, para fácil localização das áreas a reparar.

4 - TRABALHO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental teve como objetivo a avaliação da exatidão e da precisão do GeoSafe para detetar e localizar orifícios em geomembranas aplicadas em diferentes sistemas de impermeabilização, característicos de diferentes classes de aterros de resíduos e ainda o desenvolvimento de uma metodologia de ensaio a adotar nos aterros de resíduos.

4.1 - Construção da instalação piloto e materiais utilizados

Foi concebida e construída uma instalação piloto de grande escala no *campus* do LNEC, constituída por três células, cada uma com dimensões aproximadas de 10m × 10m × 1m (comprimento × largura × profundidade). Cada célula possui um sistema de impermeabilização distinto, projetado em cumprimento dos requisitos legais do Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de Agosto, com o objetivo de simular as condições existentes nas diferentes classes de aterros de resíduos.

As células incluem as seguintes camadas (da base para o topo):

Célula 1

- Camada de solo argiloso compactado, com 0,50 m de espessura;
- Barreira geossintética argilosa (GCL), com coeficiente de permeabilidade $k \leq 1 \times 10^{-11}$ m/s,
- Geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), com 2,0 mm de espessura;
- Geotêxtil não-tecido com 300 g/m², para proteção mecânica da geomembrana (contra o punçoa-mento);
- Camada drenante com 0,50 m de espessura e $k \geq 10^{-4}$ m/s constituída por:
 - o na zona inferior - areão de granulometria média a grossa (0,18 - 2,0 mm), com 0,20 m de espessura;
 - o na zona superior - brita de granulometria 40/60, com 0,30 m de espessura;

Célula 2

- Camada de solo argiloso compactado, com 0,50 m de espessura;
- Geomembrana em PEAD, com 2,0 mm de espessura,
- Geotêxtil não-tecido com 300 g/m², para proteção mecânica da geomembrana (contra o punçoa-mento);
- Camada drenante com 0,50 m de espessura e $k \geq 10^{-4}$ m/s constituída por:
 - o na zona inferior - areão de granulometria média a grossa (0,18 - 2,0 mm), com 0,20 m de espessura;
 - o na zona superior - brita de granulometria 40/60, com 0,30 m de espessura;

Célula 3

- Camada de solo argiloso compactado, com 0,50 m de espessura;
- Barreira geossintética argilosa (GCL), com coeficiente de permeabilidade $k \leq 1 \times 10^{-11}$ m/s,
- Geomembrana em PEAD, com 2,0 mm de espessura;
- Geotêxtil não tecido com 300 g/m² para proteção mecânica da geomembrana (contra o punçoa-mento);
- Camada de areão de granulometria média a grossa (0,18 - 2,0 mm), com 0,20 m de espessura;
- Geotêxtil condutivo, não tecido com 300 g/m²;
- Geomembrana em PEAD, com 2,0 mm de espessura;
- Geotêxtil não tecido com 300 g/m² para proteção mecânica da geomembrana (contra o punçoa-mento);
- Camada drenante com 0,50 m de espessura e $k \geq 10^{-4}$ m/s constituída por:
 - o na zona inferior - areão de granulometria média a grossa (0,18 - 2,0 mm), com 0,20 m de espessura;
 - o na zona superior - brita de granulometria 40/60, com 0,30 m de espessura.

Na Figura 11 apresentam-se os sistemas de impermeabilização adotados nas diferentes células.

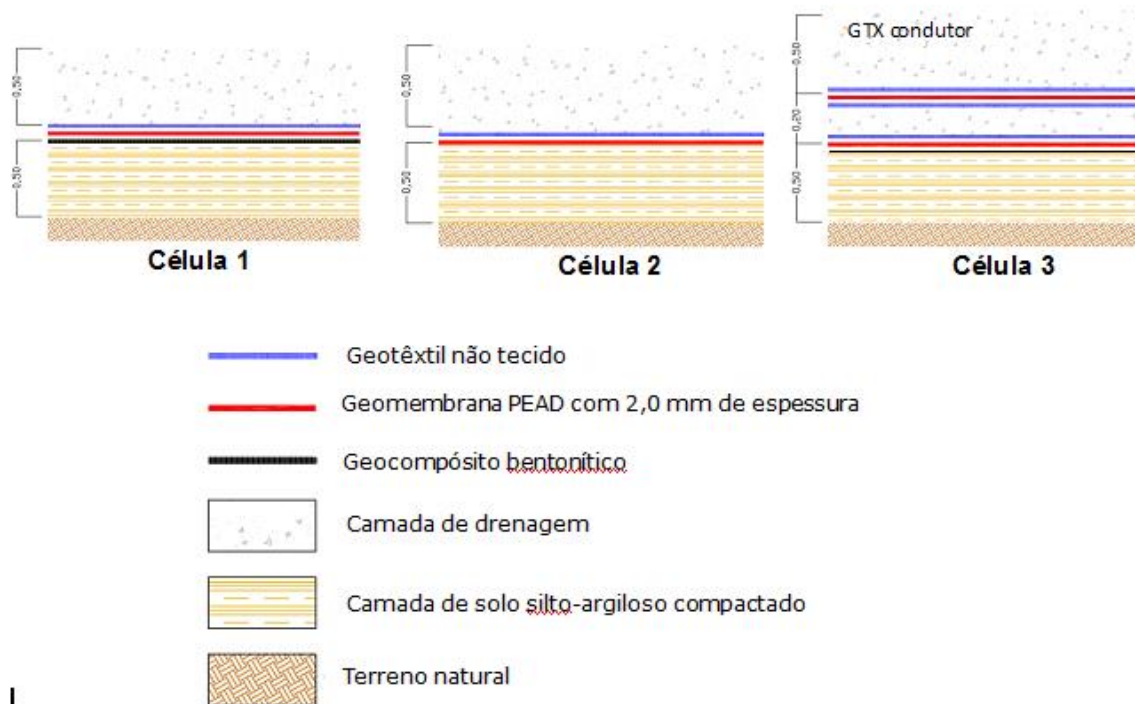


Figura 11 – Sistemas de Impermeabilização das Células da Instalação Piloto

Cada célula possui um sistema de drenagem das águas pluviais aí precipitadas, que promove o seu encaminhamento para a rede de drenagem de águas pluviais envolvente. O sistema de drenagem é constituído por uma tubagem ranhurada em PEAD, inserida na camada drenante.

As células foram sobre-elevadas face à envolvente com o objetivo de minimizar a admissão de águas pluviais no seu interior.

O espaçamento entre cada célula foi de quatro metros, por forma permitir a circulação de equipamentos.

Na Figura 12 apresenta-se, de uma forma resumida, a construção da instalação piloto do LNEC.



Figura 12 – Construção da Instalação Piloto no *Campus* do LNEC

Após a instalação das geomembranas, previamente à sua cobertura, procedeu-se à execução de orifícios, em locais devidamente referenciados, e com dimensões conhecidas, com o objetivo de verificar a capacidade do protótipo para os detetar. No caso da célula 3, os orifícios foram realizados apenas na geomembrana superior

4.2 - Programa de ensaios

Tendo em consideração os objetivos desta instalação piloto, apresentam-se, no Quadro 2 os principais ensaios programados.

Quadro 2- Programa de Ensaios

Ensaio	Célula	Orifícios		Objetivos
		Nº	Dimensões	
1 a 3	2			- estudar a exatidão* do protótipo para detetar e localizar 1 orifício num sistema de impermeabilização formado por CCL+GM+GTX+0,2m areia; - estudar a precisão** do protótipo.
4 a 6	1	1	2 mm	- estudar a exatidão* do protótipo para detetar e localizar 1 orifício num sistema de impermeabilização formado por CCL+GCL+GM+GTX+0,2m areia; - estudar a precisão** do protótipo.
7 a 9	3			- estudar a exatidão* do protótipo para detetar e localizar 1 orifício num sistema de impermeabilização duplo formado por CCL+GCL+GM+GTX+0,2m areia+GTX condutor+GM+GTX+0,2m areia; - estudar a precisão** do protótipo.
10	2	2	2 mm 2 mm	- estudar a exatidão* do protótipo para detetar e localizar 2 orifícios num sistema de impermeabilização formado por CCL+GM+GTX+0,2m areia.
11 a 15	2	2	2 mm 2 mm	- fechar um orifício e diminuir sucessivamente a distância entre os mesmos, para definir a distância mínima a que o protótipo deteta os orifícios individualmente (sem que um mascare o outro).
16	2	3	2 mm 2 mm 2 mm	- estudar a exatidão* do protótipo para detetar e localizar 3 orifícios num sistema de impermeabilização formado por CCL+GM+GTX+0,2m areia.
17	1	2	2 mm 2 mm	- estudar a exatidão* do protótipo para detetar e localizar 2 orifícios num sistema de impermeabilização formado por CCL+GCL+GM+GTX+0,2m areia.
18	3	2	2 mm 2 mm	- estudar a exatidão* do protótipo para detetar e localizar 2 orifícios num sistema de impermeabilização duplo formado por CCL+GCL+GM+GTX+0,2m areia+GTX condutor+GM+GTX+0,2m areia
19	2	1	2 mm	- estudar a exatidão* do protótipo para detetar e localizar 1 orifício num sistema de impermeabilização formado por CCL+GM+GTX+0,2m areia+0,3m brita; - estudar a adequabilidade dos elétrodos para a brita.
20	1	1	2 mm	- estudar a exatidão* do protótipo para detetar e localizar 1 orifício num sistema de impermeabilização formado por CCL+GCL+GM+GTX+0,2m areia+0,3m brita; - estudar a adequabilidade dos elétrodos para a brita.
21	3	1	2 mm	- estudar a exatidão* do protótipo para detetar e localizar 1 orifício num sistema de impermeabilização duplo formado por CCL+GCL+GM+GTX+0,2m areia+GTX condutor+GM+GTX+0,2m areia +0,3m brita; - estudar a adequabilidade dos elétrodos para a brita.

* Exatidão: proximidade entre a medição (orifício detetado) e o valor real (local onde realmente se encontra o orifício).

** Precisão: consistência/repetibilidade dos resultados.

4.3 - Apresentação e análise dos resultados

Até ao momento foram realizados os ensaios 1 a 9 indicados no Quadro 2. Na Figura 13 apresentam-se, a título de exemplo, os resultados obtidos num ensaio, realizado na célula 2, que possui um sistema de impermeabilização constituído por uma camada de solo argiloso compactado, com 0,50 m de espessura; uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), com um orifício de 2 mm; um geotêxtil; e uma camada drenante constituída por areia, com 0,2 m de espessura. Neste ensaio foram realizadas

medições de potencial elétrico em duas direções ortogonais, paralelamente e perpendicularmente aos elétrodos de injeção.

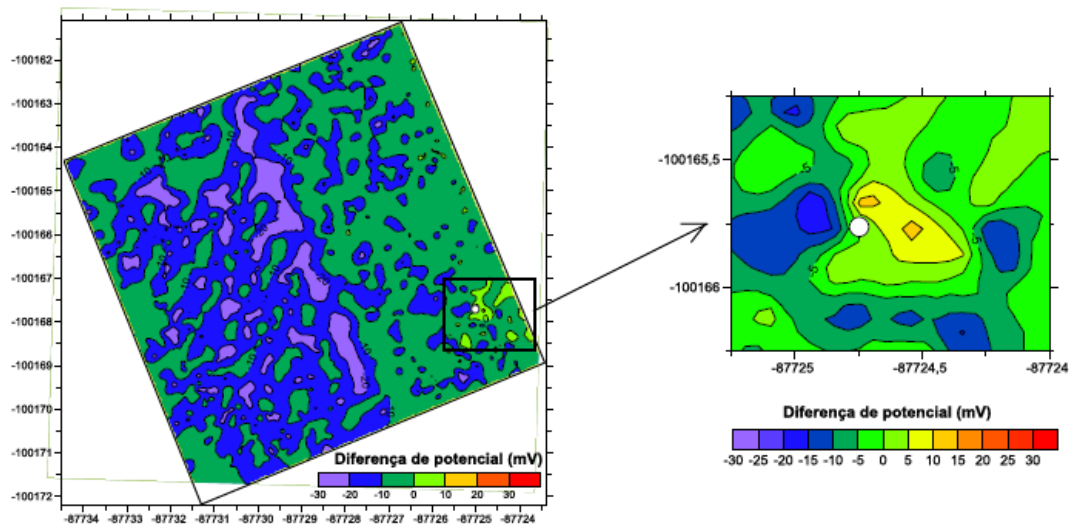


Figura 13 – Carta do Potencial Elétrico Medido na Célula 2 (o círculo de cor branca assinala o local onde foi executado o furo com 2 mm de diâmetro)

Como se pode verificar, os valores do potencial elétrico são relativamente constantes, na gama dos -100 a +100 mV, exceto junto ao orifício. Embora ambas as medições (direções paralela e perpendicular aos elétrodos de injeção) mostrem claramente um gradiente perto do orifício, este é mais forte na direção paralela aos elétrodos de injeção. Resultados semelhantes foram obtidos nas células 1 e 3, indicando que o equipamento é capaz de detetar e localizar, com exatidão e com precisão, os orifícios nas geomembranas aplicadas em diferentes sistemas de impermeabilização sendo, no entanto, de ressaltar que os mesmos foram obtidos sob condições controladas, especialmente em termos de teor em água.

Só após a conclusão dos ensaios em curso será possível indicar as potencialidades do equipamento GeoSafe e estabelecer a metodologia de ensaio a adotar nos aterros de resíduos.

5 - CONCLUSÕES

A conceção e construção de aterros de resíduos evoluíram substancialmente nas últimas décadas, sendo atualmente obras de engenharia estruturalmente complexas, as quais incluem sistemas de impermeabilização e de drenagem, destinados a minimizar a migração de poluentes e a assegurar a proteção do meio ambiente.

Os sistemas de impermeabilização e drenagem incluem várias barreiras, das quais se salienta a geomembrana. O desempenho desta barreira é, contudo, afetado por orifícios, cuja presença parece ser inevitável, sobretudo, após a colocação da camada de drenagem dos lixiviados na base dos aterros de resíduos. A presença de orifícios na geomembrana levanta problemas de natureza ambiental, designadamente a potencial contaminação do subsolo e das águas subterrâneas devido à migração de lixiviados através dos mesmos. É, por isso, imprescindível proceder à deteção dos orifícios e à reparação da geomembrana antes do início da exploração do aterro. Contudo, em Portugal, não existia nenhum equipamento que permitisse a realização desses ensaios de forma expedita e pouco onerosa.

Para responder a este desafio, foi desenvolvido um equipamento (GeoSafe), com base no princípio de funcionamento do método geofísico da resistividade elétrica, para realização de ensaios de deteção de orifícios em geomembranas. Este equipamento é vantajoso comparativamente com os equipamentos existentes no estrangeiro, por poder ser utilizado em diferentes tipos de sistemas de impermeabilização, nomeadamente, nos aterros para resíduos não perigosos e perigosos, onde a presença, de uma barreira ativa, geralmente constituída pela geomembrana, é requerida. Refira-se que os equipamentos atualmente existentes foram desenvolvidos para deteção e localização de orifícios em sistemas de impermeabilização de aterros não perigosos, constituídos, apenas, por uma geomembrana e uma camada de solo argiloso compactada, que não é a solução geralmente adotada em Portugal, a qual inclui também uma barreira geossintética argilosa, nem a preconizada para aterros de resíduos perigosos, que, geralmente, incluem duas geomembranas.

Simultaneamente foi desenvolvida uma metodologia de ensaio, que permite a deteção e localização dos orifícios de forma semiautomática, tirando partido das potencialidades do GeoSafe e tornando os

resultados dos ensaios mais fiáveis, na medida em que é independente da perícia e da experiência do operador. A deteção e localização semiautomática dos orifícios é, também, vantajosa porque garante a cobertura integral da área em estudo, contrariamente ao que acontece quando é realizada de forma manual.

Até ao momento o GeoSafe permitiu realizar, com êxito, ensaios para detetar um orifício em diferentes sistemas de impermeabilização, mas falta ainda testar a exatidão e precisão do equipamento para detetar e localizar vários orifícios em diferentes sistemas de impermeabilização e estudar a adequabilidade dos elétrodos para o caso de a camada drenante incluir uma camada superior em brita.

Espera-se com o desenvolvimento do GeoSafe impulsionar a realização de ensaios de deteção e localização de orifícios nos aterros de resíduos portugueses, ensaios que deverão ser integrados nas atividades de controlo e garantia de qualidade da construção, preferencialmente com carácter obrigatório, à semelhança do que acontece noutros países, e, deste modo, contribuir para a proteção do meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

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

Agradece-se ainda à empresa BBF pela disponibilização e colocação dos geossintéticos na instalação piloto do ISEL.

REFERÊNCIAS

- ASTM D 6747 (2012). *Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Detection of Potential Leak Paths in Geomembrane*. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D 7007 (2009). *Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials*. American Society for Testing and Materials, USA.
- CFG (Comité Français des Géosynthétiques) (2003). *Présentation de méthodes de détection et de localisation de défauts dans les dispositifs d'étanchéité par géomembranes*. 44 p. www.cfg.asso.fr, acesso em 19/07/2013.
- Peggs, I.D. & Beck, A. (2010). *Liner Integrity Surveys and Assessments - Short Course Notes*.
- Matutino, P. M., Dias, T., Cigarro, A., Vitorino, C., Mota, R., Lopes, M. G., Barroso, M., Dores, R. & Silva, F. (2011). Embedded Data Acquisition System for Effectiveness of Lining Systems. *Proceedings CETC 2011*, ISEL, Lisbon, Paper nº 83, 7p.