

Artigo Técnico

Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações

Laboratory studies to evaluate the performance of landfill cover layers for the reduction of gases emissions and infiltrations

Magdalena Duarte Costa¹, Maria Odete Holanda Mariano²,
Leila Barros Araujo³, José Fernando Thomé Jucá⁴

RESUMO

As camadas de cobertura de aterros sanitários são construídas para impedir a saída de gases para a atmosfera e a entrada de líquidos no interior do aterro, minimizando os impactos no meio ambiente. Este trabalho avaliou, por meio de ensaios de colunas de solos em laboratório, o desempenho de duas camadas de cobertura, compreendendo o comportamento dos solos em função das emissões de metano (CH_4) e da infiltração de água em seu interior. Foram utilizadas duas configurações de camada de solos: Coluna 1, camada convencional com solo com espessura 0,60 m e grau de compactação de 80%; e Coluna 2, camada oxidativa, com espessura de 0,30 m de solo com grau de compactação de 80%, sobreposta por uma camada de 0,30 m de solo misturado com produto compostado na proporção de 1:1 em volume com grau de compactação de 76%. Após a confecção das colunas (dimensões úteis de 0,60 m de altura e 0,15 m de diâmetro), foi injetado CH_4 em sua parte inferior com concentração de 100% na vazão de 0,5 L/h (8,3 mL/min ou 486 g/m².dia) para se avaliar a redução das emissões. Posteriormente, foi simulada chuva de 40 mm – sendo 30 mm em 1 dia e 10 mm 3 dias após a primeira simulação – e avaliada a infiltração da água e as emissões de CH_4 nas colunas. Os resultados obtidos indicam que as duas configurações de camadas de cobertura apresentaram resultados satisfatórios, diminuindo o volume de líquidos para o interior do aterro e minimizando as emissões de CH_4 para a atmosfera. Observou-se que a Coluna 2 (0,30 m de solo + 0,30 m de solo + produto compostado) se mostrou mais eficiente tanto na redução de emissões como na capacidade de retenção de água em relação à Coluna 1 (0,60 m de solo), sugerindo que camadas oxidativas podem se tornar uma alternativa tecnológica para regiões onde exista escassez de solos argilosos.

Palavras-chave: camada de cobertura de aterro sanitário; camada oxidativa; colunas de solos; emissões de metano; infiltração.

ABSTRACT

Landfill cover layers are built to prevent the release of gases into the atmosphere and the inflow of liquids into the landfill, minimizing impacts on the environment. This study evaluated, through the testing of soil columns in the laboratory, the performance of two cover layers, comprehending the behavior of the soils as a function of methane emissions and liquid flows in its interior. Two configurations were used in the soil layer: Column 1, conventional layer with compacted soil of 0.60 m thickness and 80% degree of compaction; and Column 2, oxidative layer with 0.30 m thickness of soil and 80% degree of compaction, stuck by a layer of 0.30 m of mixed soil with composted product in the volume ratio of 1:1 with 76% degree of compaction. After the confection of the columns (0.60 m in height and 0.15 m in diameter), methane gas was injected into the inferior part of the columns with a concentration of 100% at a flow rate of 0.5 L/h (8.3 mL/min or 486 g/m².day) to evaluate the emission reduction. Subsequently, a rain of 40 mm was simulated – being 30 mm in one day and 10 mm three days after the first simulation –, and both the methane emissions and the infiltration of water in the columns were evaluated. The obtained results indicate that the two column configurations of landfill cover layers presented satisfactory results, reducing the volume of liquids into the landfill and minimizing the methane emissions into the atmosphere. It is observed that Column 2 (0.30 m of soil + 0.30 m of soil + composted product) was more efficient in the reduction of emissions, as well as in the retention capacity of water in relation to Column 1 (0.60 m of soil), suggesting that oxidative layers can become a technological alternative for regions where there is scarcity of clay soils.

Keywords: layer landfill cover; oxidative layer; soil columns; methane emissions; infiltration.

¹Doutora em Engenharia Civil. Professora do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – Santa Rita (PB), Brasil.

²Doutora em Engenharia Civil. Professora Associada I da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – Recife (PE), Brasil.

³Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – Recife (PE), Brasil.

⁴Doutor em Geotecnia. Professor titular da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – Recife (PE), Brasil.

Endereço para correspondência: Magdalena Duarte Costa – Rua Pocinhos, 96 – Tibiri III – 58302-235 – Santa Rita (PB), Brasil – E-mail: magdalenadcosta@yahoo.com.br

Recebido em: 26/02/16 – **Aceito em:** 22/12/16 – **Reg. ABES:** 160393

INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários são construídos para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos de forma correta e segura, minimizando os danos à saúde pública e ao meio ambiente. De maneira geral, são projetados para que haja redução das emissões de biogás para a atmosfera, bem como para evitar a formação excessiva de lixiviados.

Nesse sentido, a camada de cobertura final de um aterro sanitário é um sistema que tem como objetivo principal impedir a entrada de líquidos no interior do corpo do aterro, bem como evitar a saída de gases para a atmosfera. Existem vários tipos de camada de cobertura, sendo a utilização de solos compactados com baixa condutividade hidráulica a mais empregada (HUSE, 2007).

Consequentemente, o desempenho de um aterro de resíduo sólido está diretamente vinculado a um sistema de cobertura eficiente e duradouro. Teixeira (2008) afirma que o sistema de cobertura é constituído por uma série de camadas de solo, por vezes combinadas com algum geossintético (geotêxteis, geomembranas, geocompostos argilosos, resíduos, entre outros), que devem controlar a infiltração de água para a massa de resíduos.

A eficiência dos sistemas de cobertura final de aterros sanitários destaca-se na avaliação do comportamento dessas obras, uma vez que pode afetar inúmeros aspectos do seu desempenho. A cobertura final pode variar conforme as características geotécnicas do material utilizado e de acordo com as características climatológicas da região onde o aterro se encontra instalado. Faz-se necessário, por sua vez, o entendimento e o estudo dessas características para que se tenha a segurança e a eficiência desejada no projeto de sistemas de cobertura. Tais características são ainda pouco estudadas devido à complexidade do fenômeno de interação entre solo, atmosfera e resíduos (CATAPRETA, 2008).

O controle da infiltração pelas camadas de cobertura geralmente é estabelecido aplicando-se uma camada de argila com baixa condutividade hidráulica saturada (valor inferior a 10^{-5} cm/s). Embora o desempenho dessas camadas em climas úmidos possa ser satisfatório, em regiões áridas o sistema pode não funcionar adequadamente, principalmente devido à formação das macro e microfissuras na camada argilosa (USEPA, 2003).

Existem dois tipos básicos de camadas de cobertura de aterros sanitários: a camada convencional, formada predominantemente por solos argilosos compactados; e a camada alternativa, elaborada a partir de solos e outros materiais como produtos de compostagem e resíduos de construção civil. As camadas alternativas são construídas para otimizar o desempenho do aterro, reduzindo as emissões de gases e aumentando a retenção de líquidos em seu interior.

A camada oxidativa é um tipo de camada alternativa que utiliza materiais com alto teor de matéria orgânica (MO) composta da misturada com solo com a finalidade de aumentar a retenção da água, reduzir os efeitos da erosão e suas consequências no solo e aumentar

o potencial de oxidação do metano (CH_4), contribuindo, assim, mais fortemente para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

De acordo com Huber-Humer, Röder e Lechner (2009), a utilização de composto orgânico como substrato nas camadas de cobertura altera as propriedades específicas em relação ao solo convencional no que diz respeito à permeabilidade ao gás, aos parâmetros físicos, incluindo a capacidade de retenção de água e a textura, e, consequentemente, sobre a atividade de oxidação do CH_4 .

Segundo as Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil (BRASIL, 2014), em 2012, o setor de tratamento de resíduos era responsável por 4,00% das emissões antrópicas de $\text{CO}_{2(\text{eq})}$ e por 12,87% de CH_4 , sendo que 84,00% é decorrente das emissões em aterros sanitários. Nele, sob condições anaeróbias, o CH_4 e o dióxido de carbono (CO_2) são os predominantes no processo de decomposição dos resíduos, em proporções variando de 45 a 70% e de 30 a 60%, respectivamente (TCHOBANOGOUS et al., 1993 *apud* ALCÂNTARA, 2007). No entanto, o CH_4 é mais preocupante como um gás de efeito estufa. O potencial de aquecimento global do CH_4 é aproximadamente 21 vezes maior do que o do CO_2 (BRASIL, 2014).

A implantação de novos aterros em todo o país torna a busca por materiais em suas proximidades mais rara e, consequentemente, mais onerosa. Por isso, deve-se projetar aterros para atender às condições de bom desempenho, de forma eficiente, reduzindo gastos com materiais e que possam minimizar os impactos ambientais. Essa situação mostra que qualquer alternativa de cobertura de solo deve possuir uma eficiência comprovada ao longo do tempo, sendo no mínimo igual àquela apresentada por camadas convencionais de solos argilosos.

Diante do exposto, torna-se importante o estudo de camadas de cobertura que apresentem materiais e características construtivas, que minimizem significativamente a entrada de água para o interior do aterro e evitem as emissões gasosas para a atmosfera. Assim, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar a eficiência de dois tipos distintos de camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos, por meio de ensaios laboratoriais (ensaios de caracterização, coluna de solos e infiltração de água), com a finalidade de se compreender seu desempenho em função da emissão de gases e da retenção de água nas camadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para estudar a eficiência de camadas de cobertura de aterros com respeito à emissão de CH_4 e retenção de água, foi executada a montagem de experimento em duas colunas de solo instrumentadas e foram realizados ensaios em laboratório para caracterização e definição das propriedades dos solos, seguindo as Normas Técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ensaios de coluna para a

medição do fluxo de CH_4 por cada uma delas e o teste de infiltração para avaliar a eficiência em relação à retenção de água.

O comportamento das camadas de coberturas de aterro foi analisado por meio dos ensaios de colunas em PVC. A confecção das colunas seguiu a metodologia dos ensaios de Vieira (2005) e Oliveira e Marinho (2007), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP).

O material utilizado nas colunas de solos é o mesmo usado como cobertura final no Aterro da Muribeca, localizado no município de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, e que até o ano de 2013 recebia os resíduos de Recife. O composto ou produto compostado para ser misturado ao solo foi adquirido na composteira de Recife, que também funcionava no Aterro da Muribeca.

O preenchimento das colunas foi feito seguindo os perfis de duas camadas de cobertura da célula experimental. Os perfis foram adequados para:

- Coluna 1 – camada convencional: solo compactado com grau de compactação (GC)=80%, com espessura de 0,60 m.
- Coluna 2 – camada oxidativa: a coluna foi preenchida por uma camada de 0,30 m de solo compactado com GC=80%, sobreposta por uma camada de 0,30 m de solo misturado com material compostado na proporção de 1:1 em volume, compactado com GC=75%.

Os valores de GC adotados estão compatíveis com os dados de compactação citados por Maciel e Jucá (2011), que atingiu 84% na camada convencional e 76% na camada oxidativa na célula experimental do Aterro da Muribeca.

A Figura 1 apresenta o detalhe das configurações dos perfis das camadas nas colunas que foram analisadas. As colunas apresentam um diâmetro interno de 0,15 m.

A Figura 2 apresenta o fluxograma utilizado nesta pesquisa.

Caracterização do solo e do produto compostado

Todas as amostras de solo e material compostado foram caracterizadas por ensaios normatizados. Os ensaios de laboratórios foram:

- Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (NBR 6457/86).
- Análise granulométrica para solos (NBR 7181/88).
- Determinação do limite de liquidez (NBR 6459/84).
- Determinação do limite de plasticidade (NBR 7180/88)
- Determinação da massa específica dos grãos (NBR 6508/84).
- Solo: ensaio de compactação (NBR 7182/88).
- Permeabilidade à água (ASTM D5084-10), em permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE, seguindo-se os procedimentos adotados por Maciel (2003).

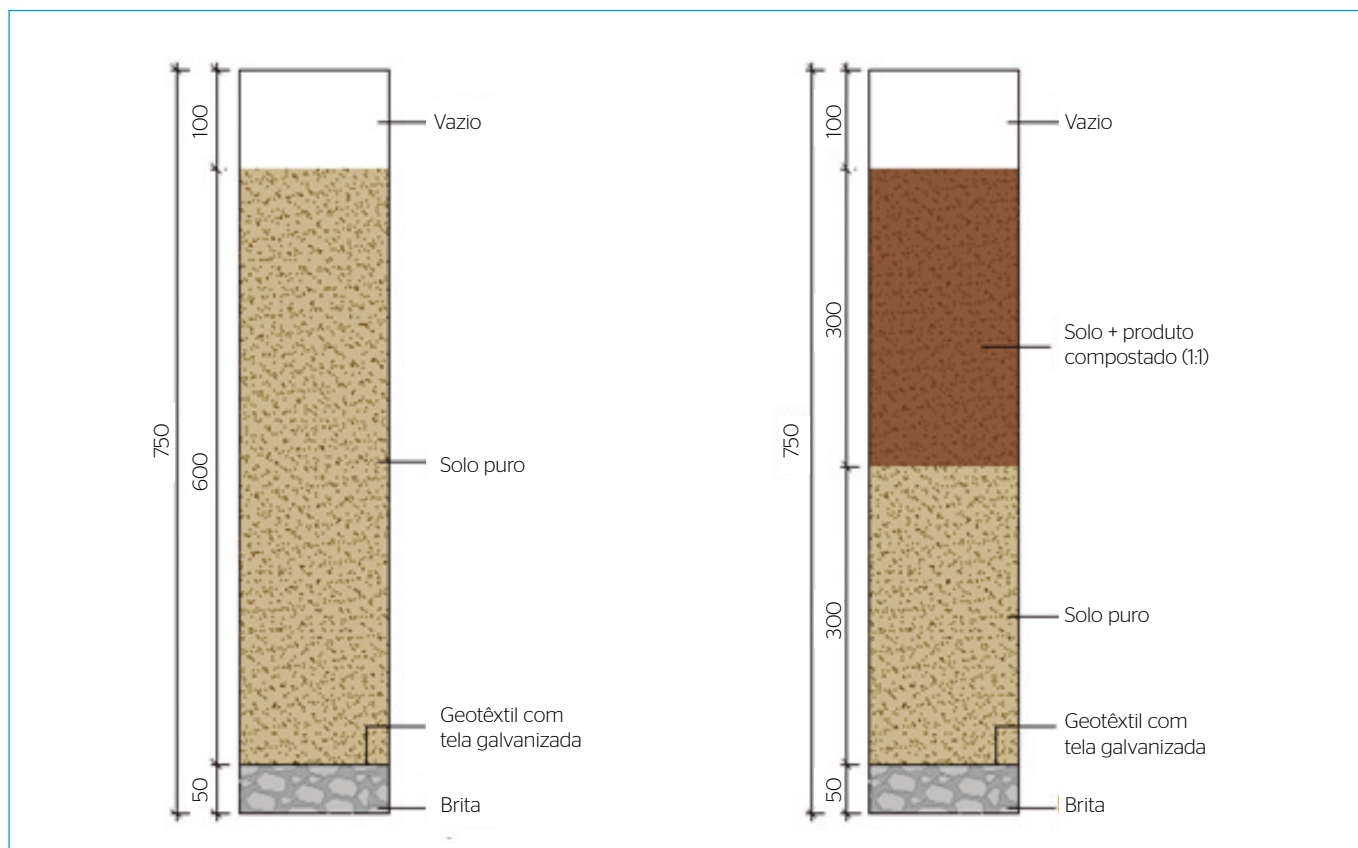


Figura 1 - Esquema dos perfis da Coluna 1 e da Coluna 2 (as medidas estão em milímetros).

- Permeabilidade ao ar (procedimento desenvolvido por Ignatius, 1999; Springer *et al.*, 1998; Stylianou; Devantier, 1995) e com adaptações ao sistema do permeâmetro de parede flexível, Tri-flex 2 da Soil Test – ELE realizadas por Maciel (2003);
- Curva de Retenção de água pelo método do Papel Filtro.

Nas amostras de materiais (solo, solo + produto compostado (1:1) e produto compostado) foram feitas análises químicas seguindo a metodologia descrita pela EMBRAPA (1997) para os seguintes parâmetros: pH, hidrogênio (H) + alumínio (Al) ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$), cálcio (Ca) ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$), magnésio (Mg), Al, sódio (Na), fósforo (P), monóxido de carbono (CO), MO, nitrogênio (N), relação carbono/nitrogênio (C/N) e ferro (Fe).

Confecção, instrumentação e montagem das colunas

As colunas foram confeccionadas com segmentos de tubo PVC rígidos com diâmetro interno de 0,15 m. Foram confeccionadas peças de alturas 0,15 e 0,30 m para melhor execução e manuseio das colunas na montagem dos equipamentos. As peças possuem no topo e na base placas de PVC para conexão e vedação entre os segmentos. A vedação é realizada com anéis de borracha (*o-rings*), que foram pressionados por meio de parafusos contra as placas de PVC e cola silicone para maior estanqueidade. As colunas possuem tampa na base e no topo, em que foram inseridas torneiras de passagens. Quando montadas, alcançam altura de 0,75 m.

Para a instrumentação das colunas foram utilizados sensores de temperatura, umidade e condutividade elétrica. Os dados foram coletados e armazenados em datalogger. Os sensores utilizados foram os sensores 5TE da DECAGON, que medem simultaneamente os três parâmetros. O datalogger utilizado foi o Em50 da DECAGON, gravador de dados compactado de 5 canais, projetado para ser utilizado com os sensores 5TE.

As colunas de PVC foram montadas com 3 segmentos de PVC (um de 0,15 m e dois de 0,30 m). Primeiramente foi construída a base com o segmento de PVC de 0,15 m, no qual foi colocada uma camada de 0,05 m de brita zero (2,36 mm a 12,50 mm) para homogeneizar os fluxos de gás e de água. Em seguida, foi colocado geotêxtil tipo tecido não tecido e tela galvanizada para evitar a colmatação de pedras e servir de base para o solo compactado. Após concluída a base, foi colocada a primeira camada de argila, iniciando a compactação tipo proctor normal com camadas de cerca de 0,05 m de espessura de solo ou solo + produto compostado. Depois foram colocados os outros dois segmentos, compactando as camadas de solo com os sensores em toda a coluna. Os sensores foram colocados de acordo com o esquema apresentado na Figura 3 para as colunas 1 e 2.

Emissão de metano nas colunas de solo

O gás utilizado para avaliação das emissões gasosas foi o CH_4 com pureza de 99,99%.

Para medição da vazão de entrada de gás nas colunas foram utilizados rotâmetros série 1900, com medição de vazão máxima de 12 NL/h. Para leitura da concentração dos gases foi utilizado detector portátil X-am 7000, um detector simultâneo e contínuo de até cinco gases. Esse equipamento foi programado para leituras dos gases CH_4 , CO_2 , monóxido de carbono (CO), oxigênio (O_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S).

O gás foi coletado nas saídas da coluna para analisar concentrações em % volumétrica, com sacos amostradores para biogás do kit biogás desenvolvido pela Embrapa Aves e Suínos. O fluxo de CH_4 imposto a cada coluna foi 0,5 L/h (8,3 mL/min ou 486,0 $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$).

Os ensaios realizados foram divididos em duas fases. A primeira consistia em simular o comportamento de cada camada logo após sua construção. Essa fase foi executada com as colunas fechadas, tendo sido induzido o fluxo constante de CH_4 na base do sistema, sem entrada de oxigênio, no período de 30 dias.

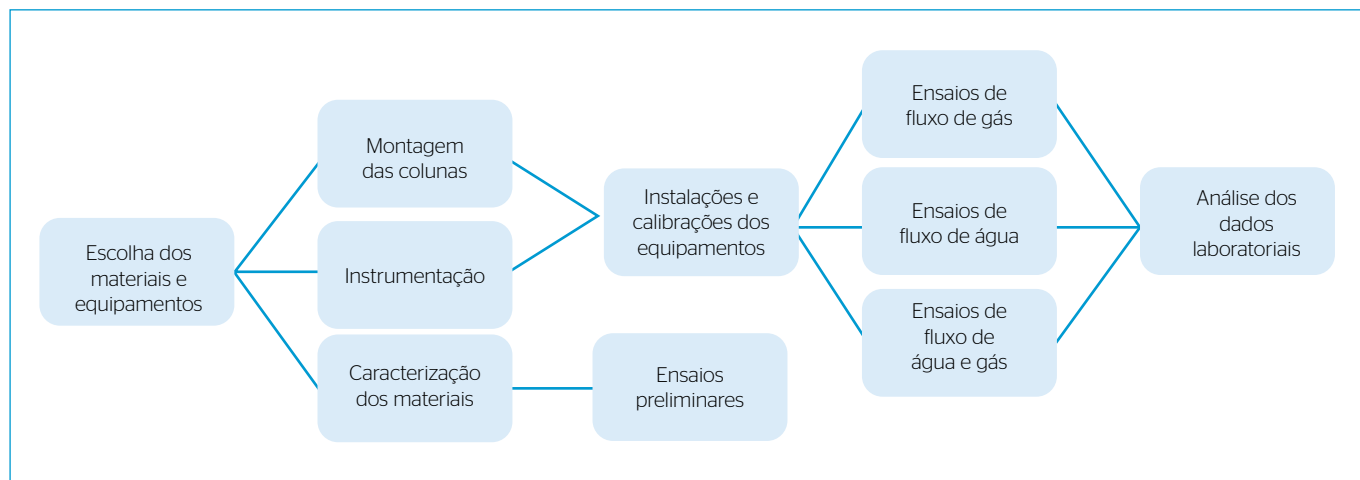


Figura 2 - Fluxograma da pesquisa.

Posteriormente, foi realizada a segunda fase do ensaio, em que, primeiramente, foi simulada chuva de 40 mm. Em seguida, foi injetado o fluxo constante de CH₄ na base do sistema, sem entrada de O₂, no período de 40 dias.

A Figura 4 apresenta as colunas em funcionamento com cilindro de gás acoplado ao sistema.

Infiltração nas colunas de solo

O fluxo de água nas colunas foi feito simulando chuva de 40 mm. Para isso, foi percolada uma quantidade de água nas colunas de 706,5600 mL para a área superficial de 0,0177 m². Para umedecimento das colunas foi elaborado um sistema que funcionasse cobrindo toda a superfície do solo de forma homogênea (Figura 5). Foi utilizado um reservatório em acrílico, no qual foi conectada uma mangueira de silicone em sua base, conectada a um chuveiro de diâmetro de 150 mm na outra ponta da mangueira para simular a chuva. O chuveiro foi calibrado para que passasse apenas a vazão requerida, na abertura do reservatório. O reservatório estava dotado de torneira de passagem para melhor controle da vazão.

Como não há evaporação para a atmosfera nem escoamento superficial, essa vazão foi dividida em partes, sendo vertido nas colunas 10,00 mm por vez, 176,64 mL até completar a quantidade de água nas colunas de 706,56 mL. Foi observado o comportamento das colunas durante 30 dias.



Figura 4 - Sistema de colunas em funcionamento com gás acoplado.

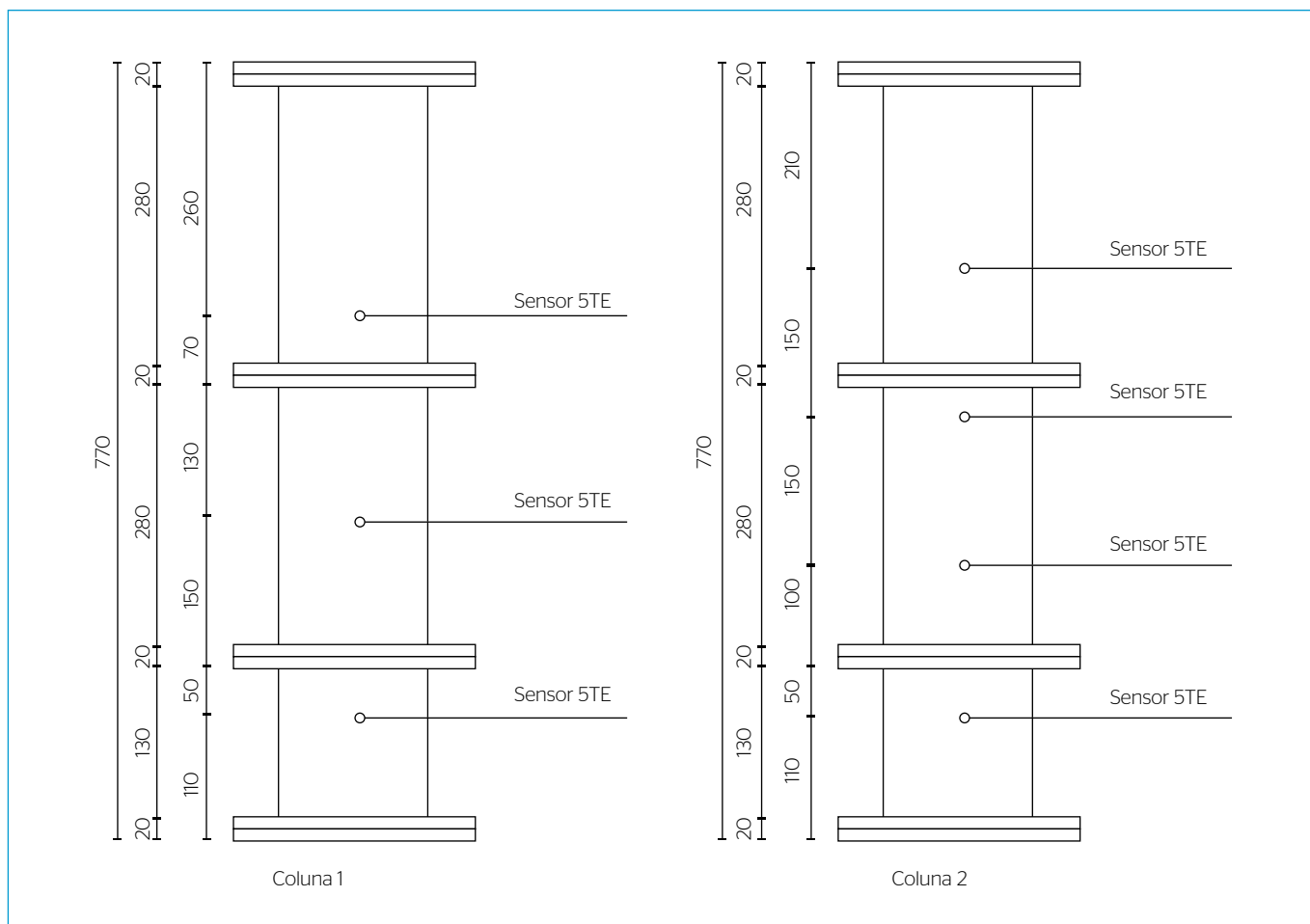


Figura 3 - Desenho esquemático das colunas 1 e 2, medidas em milímetros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização dos materiais

Caracterização química

Os resultados das análises químicas realizadas nos materiais empregados nas colunas estão apresentados na Tabela 1. Pode-se observar que a adição do composto ao solo aumentou seu pH, tornando-o neutro, condição ideal para que ocorra atividade biológica de oxidação, e o solo puro apresentou um pH de 5,2, formando um meio ácido para as bactérias. Segundo Rose (2009) e Tortora, Funke e Case (2012), as bactérias são muito sensíveis às variações de pH, cuja atividade ótima se dá em condições de neutralidade ou em ambientes ligeiramente alcalinos, e que o crescimento bacteriano ocorre em ambientes com pH próximo à neutralidade, na faixa entre 6,5 e 7,5.

Na análise química foi observado que o composto utilizado na mistura de solo apresentou uma relação C/N inferior a 18 e um pH acima de 7, o que demonstra um composto estabilizado, de acordo com Bidone e Povinelli (1999) e Tsutya *et al.* (2001), que afirmam que o produto compostado proporciona ao solo um aumento na quantidade de nutrientes. Na Tabela 1 pode-se observar que, após a mistura solo + produto compostado, alguns elementos tiveram suas proporções

modificadas, como Fe, N, C, Na, potássio (K) e Mg. Essas modificações alteraram alguns nutrientes do solo que são favoráveis a receber cobertura de vegetação acima dessa camada e, assim, melhorar a retenção de líquidos na superfície.

Tabela 1 - Resultados das análises químicas dos materiais.

Componentes	Solo	Solo + produto compostado (1:1)	Produto compostado
pH	5,20	7,20	7,47
H + Al (cmol _c /dm ³)	3,95	2,75	2,28
Ca + Mg (cmol _c /dm ³)	0,80	16,05	20,05
Ca (cmol _c /dm ³)	0,50	14,25	18,15
Mg (cmol _c /dm ³)	0,30	1,80	1,90
Al (cmol _c /dm ³)	0,80	0,00	0,00
K (cmol _c /dm ³)	0,24	2,55	8,36
Na (cmol _c /dm ³)	0,53	1,32	1,75
P (mg/dm ³)	1,00	1,00	1,00
CO (g/kg)	2,49	30,79	78,79
MO (g/kg)	4,29	53,08	135,93
N (g/kg)	0,20	3,30	10,40
Relação C/N	12,45	9,33	7,57
Fe (mg kg ⁻¹)	42,03	3.353,50	6.612,50



Figura 5 - (A) Sistema construído para umedecimento das colunas; (B) detalhe do chuveiro.

Estabilidade do produto compostado

Para garantir que o material compostado utilizado na mistura com o solo era estável, foi realizado o acompanhamento das temperaturas no interior do material, bem como medida a concentração de CO₂ na mistura. A Tabela 2 apresenta os resultados do ensaio de estabilidade do produto compostado.

As temperaturas internas foram semelhantes às temperaturas do ambiente. Com isso, pode-se dizer que não estaria havendo atividade microbológica no material derivado da compostagem durante o período de análise. Também foi medida a concentração de CO₂ na mistura, não sendo identificada nenhuma quantidade de gás carbônico, confirmando a estabilidade do material.

Caracterização geotécnica

Foi realizada a análise granulométrica nos materiais utilizados para as colunas, nos quais foram caracterizados o solo natural, a mistura de solo + produto compostado na proporção de 1:1 em volume e o produto compostado. A Figura 6 apresenta as curvas granulométricas desses materiais.

Tabela 2 - Temperaturas do ensaio de estabilidade do produto compostado.

Dias	Temperatura (°C)	
	Composto	Sala
1	23	24
2	23	25
3	25	26
4	25	25
5	24	25

Observando as curvas granulométricas dos materiais percebe-se que não há uma diferença significativa no tamanho das partículas do solo puro e da mistura solo + produto compostado, o que ocorre devido à mistura ser feita em volume. Como o produto compostado tem a tendência de ser mais leve por conter muito material orgânico em sua composição, quando ocorre a mistura desses materiais é incorporado a essa combinação uma quantidade maior do solo puro em peso, constituindo, assim, maior predominância deste, alterando pouco em sua granulometria.

A Tabela 3 apresenta os resultados da caracterização geotécnica dos materiais empregados.

Compactação dos materiais

O resultado do ensaio de compactação do tipo Proctor Normal, realizado de acordo com a NBR 7182/86, apresentou para o solo uma umidade ótima de 20% e massa específica seca máxima de 1,62 g/cm³, e para a mistura solo + produto compostado uma umidade ótima de 26% e massa específica seca máxima de 1,42 g/cm³.

Os materiais das colunas foram compactados na umidade ótima e com GC diferentes: a Coluna 1 com uma camada de solo com 0,60 m de profundidade e GC de 80%; e a Coluna 2 com duas camadas, uma de solo com 0,30 m com GC de 80% e outra de solo + produto compostado de 0,30 m com GC de 75%. A Tabela 4 apresenta os resultados de compactação dos materiais nas colunas para o ensaio de fluxo.

Com a adição do composto observa-se que há aumento na umidade ótima e diminuição na massa específica seca do material, devido à maior retenção de líquido pelo composto, à redução da fase sólida mineral e ao aumento das partículas de menor peso.

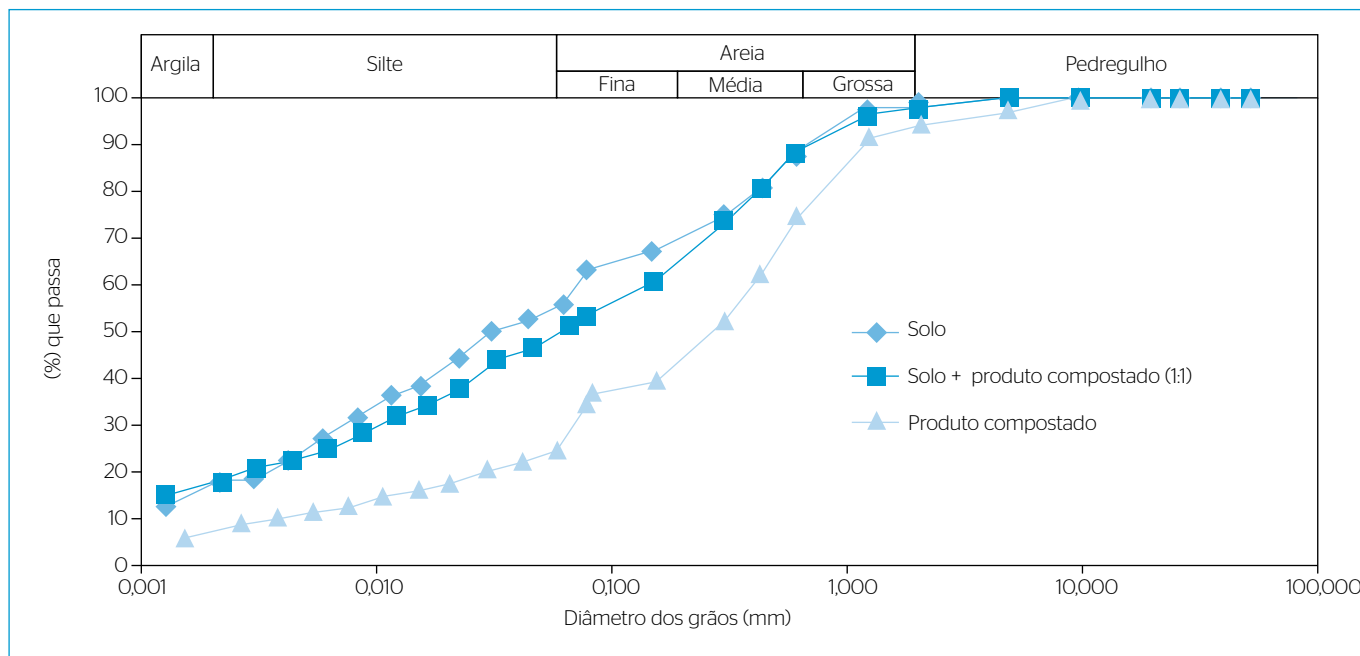


Figura 6 - Curvas granulométricas dos materiais analisados.

Quanto mais denso esse material, menor é sua porosidade, havendo, assim, uma diminuição no fluxo de ar. Por outro lado, para o caso de oxidação de CH_4 , a porosidade é de extrema importância, pois a adição de produto de compostagem ao solo pode melhorar a capacidade de oxidação do CH_4 , apresentando maior porosidade com o aumento da quantidade de material orgânico, estando este maduro e bem estruturado.

Permeabilidade à água e ao ar

Os resultados da condutividade hidráulica saturada das amostras foram de $4,2 \times 10^{-7}$ cm/s para o solo e $1,9 \times 10^{-7}$ cm/s para solo + produto compostado (1:1). Assim, foi observado que apesar de a quantidade de composto adicionado ao solo modificar as características de estrutura dos solos, o mesmo não ocorreu com a permeabilidade à água, que permaneceu na mesma ordem de grandeza.

Tabela 3 - Resultado da caracterização dos materiais.

Análise	Solo	Solo + produto compostado (1:1)	Produto compostado
Granulometria			
% Argila	17,63	17,87	7,84
% Silte	38,58	32,44	17,76
% Areia fina	13,68	15,21	19,13
% Areia média	17,63	23,02	30,66
% Areia grossa	11,64	8,91	19,56
% Pedregulho	0,84	2,55	5,05
% >0,075 mm	63,14	53,47	35,10
Índice de consistência			
% LL	49,78	43,71	-
% LP	33,16	33,02	-
% IP	16,62	10,69	-
Massa específica dos grãos (g/cm^3)	2,72	2,57	2,12
Classificação sistema unificado	ML	ML	-

LL: limite de liquidez; LP: limite de plasticidade; IP: índice de plasticidade; ML: silte de baixa compressibilidade.

Tabela 4 - Resultados de compactação dos materiais nas colunas.

Características	Coluna 1		Coluna 2	
	Solo	Solo	Solo	Solo + produto compostado
Umidade ótima (%)	20	20	20	26
Massa específica seca (g/cm^3)	1,30	1,30	1,30	1,07
Grau de compactação (%)	80	80	80	75
Índice de vazios	1,08	1,08	1,08	1,44
Porosidade (%)	52	52	52	59

A permeabilidade ao ar dos dois tipos de materiais (solo e solo + produto compostado) também apresentou a mesma ordem de grandeza (10^{-7} cm/s). A permeabilidade ao ar por meio do material utilizado no experimento está relacionada com a densidade, a umidade de compactação e a estrutura do material. Quanto mais compacto é o material, menor é a permeabilidade ao ar. Como os materiais utilizados foram misturados na proporção em volume, a quantidade de solo prevalece na combinação dos materiais.

Curva de Retenção de água

Os ensaios para obtenção das curvas de retenção no solo e da mistura solo + produto compostado na proporção de 1:1 (em volume v/v) foram feitos a partir de três amostras de cada material. A Figura 7 apresenta as faixas de variação das curvas de retenção do solo e do solo + produto compostado.

Os materiais utilizados possuem características semelhantes em sua granulometria, porém seu comportamento é alterado com a presença de água. Dessa forma, percebe-se que, inicialmente, na fase mais úmida, as curvas da Figura 7 apresentam inclinações relativamente mais suaves se comparada com a fase mais seca com umidades mais baixas, principalmente para o solo puro. Observa-se também que ambos os materiais apresentam uma mudança de declividade — correspondente ao ponto de entrada de ar, isto é, começa a ocorrer fluxo de ar — para sucções em torno de 1.200 kPa. Comparando os dados para a faixa inicial da curva umidade gravimétrica *versus* sucção matricial que apresenta uma linearidade (sucção de até 1.000 kPa), o solo puro apresentou variação de umidade gravimétrica de aproximadamente 7%, e a mistura solo + produto compostado apresentou, nessa mesma faixa de variação de sucção, uma variação de umidade de aproximadamente 20%. Observando a Figura 7, o material misturado apresenta maior capacidade de retenção do que o solo puro, principalmente nos valores de umidades mais altas.

Os resultados do ensaio da umidade de capacidade de campo, que pode ser estimada a partir da Curva de Retenção de água, como citado em Alcântara (2007), e é determinada pela umidade do solo na tensão de 33 kPa, foram de 24% para o solo e 35% para a mistura solo + produto compostado. Esses resultados confirmam a maior capacidade de retenção de água da mistura de solo e produto de compostagem. Essa característica é importante principalmente em locais com variações de ciclos de umedecimento e secagem (períodos chuvosos e secos) que são impostas em aterros sanitários na região em estudo, podendo diminuir a produção de lixiviados e a emissão de biogás para a atmosfera.

Infiltração nas colunas

A infiltração de água de chuva pela camada de cobertura final de aterro sanitário está relacionada com as condições climáticas e suas

características geotécnicas do solo da camada. Nesse sentido, para simular as condições pluviométricas, foi inicialmente realizada uma primeira simulação de chuva 30 mm em 3 tomadas de água (de 10 mm cada, correspondendo, cada uma, a 176,64 mL). A Tabela 5 apresenta o tempo de espera para que a lâmina de água na superfície infiltre nas camadas de cobertura. Posteriormente, 72 horas após a primeira simulação de chuva, foi acrescentada mais uma infiltração de 10 mm, porém seu tempo de infiltração não foi considerado.

Com os resultados da Tabela 5, percebe-se a maior capacidade de retenção de água no solo + produto compostado devido ao maior tempo de infiltração da água para o interior do material, comprovando os resultados da Curva de Retenção e os resultados das umidades gravimétricas. Essas informações em conjunto indicam que a aplicação de MO ao solo aumenta a capacidade de retenção de água do material. Segundo Lopes (2011), essa característica é importante devido, principalmente, às variações climatológicas, que são impostas às camadas de cobertura de aterros em função de variações de saturação ao longo de períodos secos e chuvosos e que influenciarão tanto nos processos de infiltração que impactam a geração de lixiviados quanto na emissão de biogás.

A Figura 7 apresenta o teor de umidade da Coluna 1 (camada de solo) em três profundidades determinadas (10, 30 e 50 cm, de cima para baixo).

De acordo com a Figura 8, no início do ensaio, a umidade varia com a profundidade, porém todas se encontram próximas da umidade

ótima (20%) do material ensaiado. A simulação da primeira chuva (de 30 mm) corresponde ao sexto dia do ensaio. Observa-se que, para a profundidade de 10 cm, o solo aumenta rapidamente de umidade, absorvendo toda a água precipitada; o teor de umidade chega a 36%, que vai decaindo ao longo das 72 horas posteriores, mas o solo ainda possui um teor de umidade acima da capacidade de campo (24%). Na profundidade de 30 cm também ocorre um aumento de umidade, porém de menor intensidade, que se estabiliza em aproximadamente 25,7%, também acima da sua umidade de capacidade de campo. Entretanto, para a profundidade de 50 cm ocorre apenas leve aumento do teor de umidade até o nono dia do ensaio, não atingindo a umidade de capacidade de campo. Nesse dia — nono dia do ensaio — é realizada a segunda simulação de chuva, equivalente a uma precipitação de 10 mm, na qual se observa aumento da umidade em todas as profundidades, que logo decai apenas para a profundidade mais superficial, chegando a estabilizar os três pontos na mesma faixa de umidade no 12º dia do ensaio, e iniciar a infiltração de água

Tabela 5 - Tempo de infiltração nos materiais experimentais para a primeira simulação de chuva.

Quantidade de água infiltrada (mm)	Tempo	Solo (min)	Solo + produto compostado (min)
10	1º	20	35
10	2º	41	112
10	3º	51	428

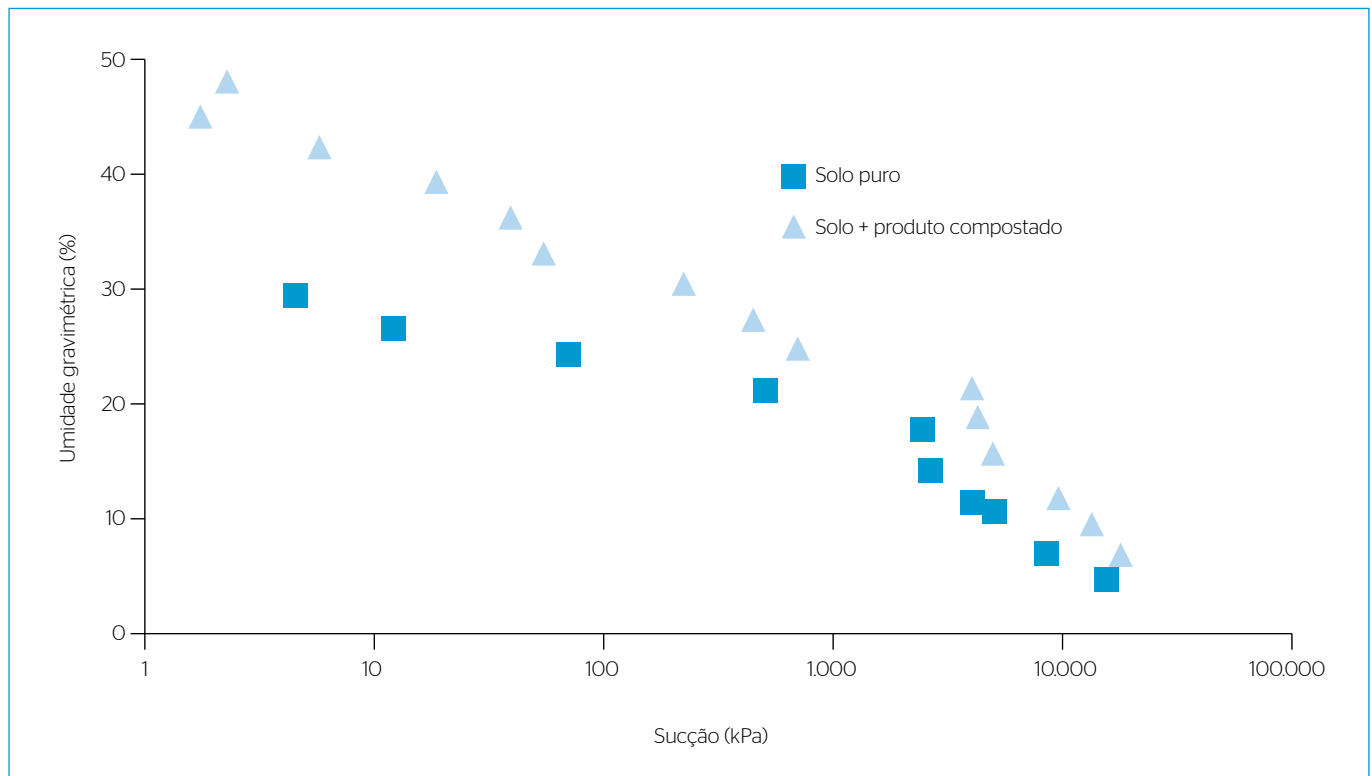


Figura 7 - Faixas de variação das curvas de retenção do solo e do solo + produto compostado.

na camada apenas 6 dias depois. Essa estabilização da umidade em torno 26%, isto é, acima da umidade de capacidade de campo, indica a existência de fluxo de água pela camada de solo que poderia passar para a massa de resíduos de um aterro.

A Figura 9 apresenta o fluxo de água na amostra de solo + produto compostado em três profundidades determinadas (10, 25 e 50 cm, de cima para baixo).

No início do ensaio, foi observado que as umidades se encontravam na mesma faixa de valores e próximas à umidade ótima (26%) do material ensaiado. No primeiro dia de tomada de água (sexto dia

do ensaio), vê-se que a umidade do material na primeira profundidade (10 cm) aumenta expressivamente, ultrapassando sua umidade de capacidade de campo (35%). Esse valor de umidade decresce entre os sexto e nono dias do ensaio, porém ainda fica acima da umidade de capacidade de campo. Também se observa aumento da umidade nas demais profundidades (25 e 50 cm). Quando colocado o último volume de 10 mm de água no sistema (no nono dia do ensaio), nota-se pequeno aumento de umidade na profundidade de 10 cm e posterior queda, porém essa umidade ainda não se encontra estabilizada até o tempo final do ensaio (30 dias). Observa-se que ocorreu a estabilização

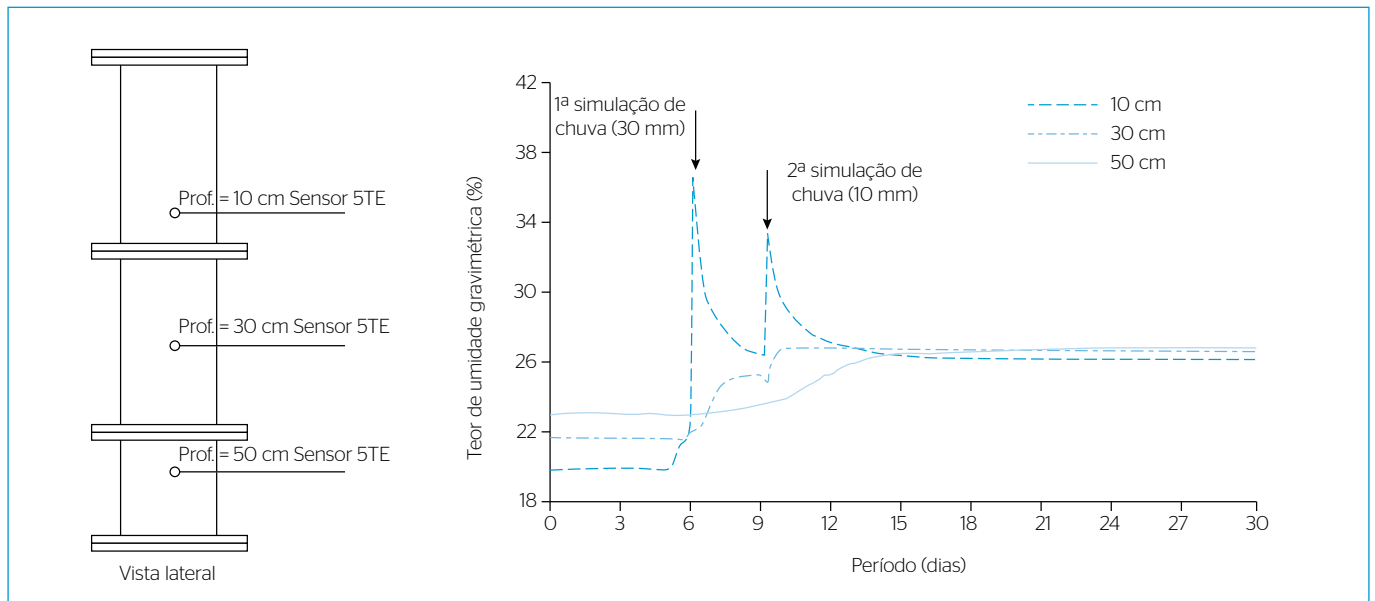


Figura 8 - Ensaio de infiltração na Coluna 1 (camada convencional).

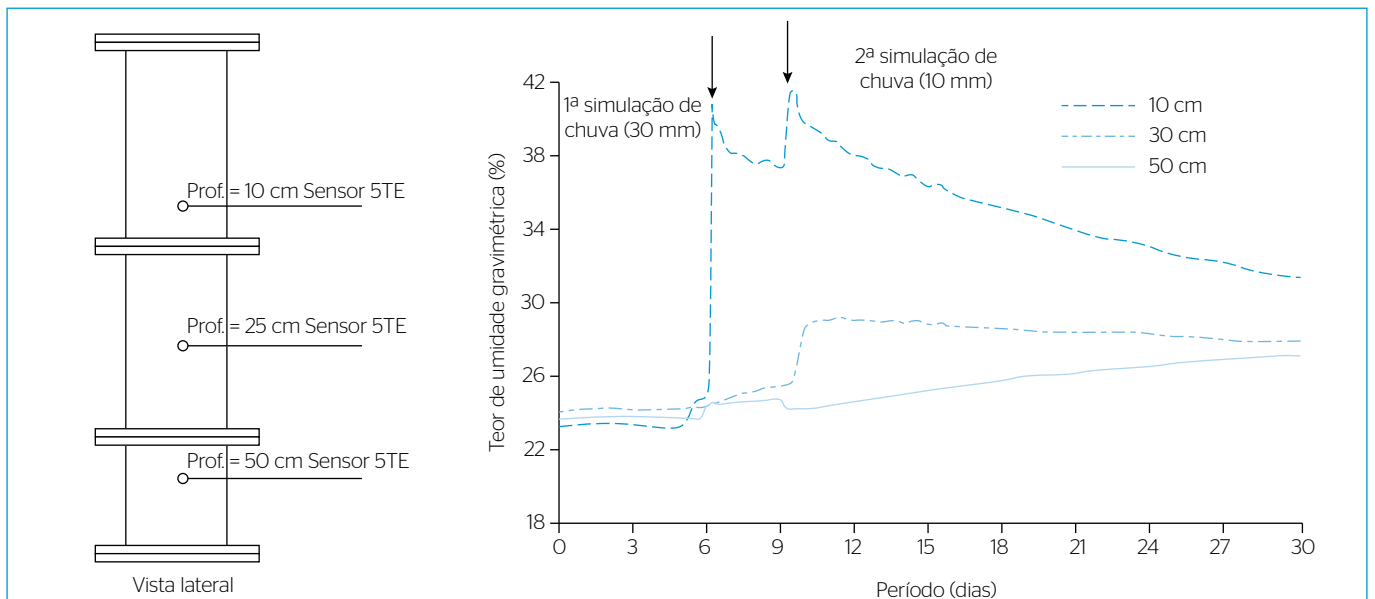


Figura 9 - Ensaio de infiltração na Coluna 2 (camada oxidativa).

da umidade em torno de 28% para a segunda e a terceira camadas (25 e 50 cm), que é uma umidade abaixo da capacidade de campo do material (35%), indicando, assim, que para esse nível de precipitação, essa configuração de camada não causaria geração de lixiviados em um aterro.

Comparando o comportamento da camada de solo e da camada de solo + produto compostado, observa-se que essa segunda camada consegue manter a umidade tanto em um valor mais alto quanto com o tempo de infiltração mais lento. No mesmo período de ensaio e para a mesma quantidade de água infiltrada, a camada de solo + produto compostado não estabilizou a umidade, mas apresentou tendência de estabilização próxima a 28%, enquanto a camada apenas com solo estabilizou a umidade em apenas 6 dias após o evento de infiltração da água, apresentando umidade de 26%.

Após a infiltração do conjunto, as superfícies das camadas de solos tiveram comportamentos diferentes, como visto nas Figuras 10A e 10B.

No solo da Coluna 1 apareceram fissuras que demonstram retração do solo após ciclo de umedecimento e secagem. Na Coluna 2 não ocorreram microfissuras devido à mistura do composto orgânico, o que melhorou as propriedades em relação à retenção de líquidos.

Humer *et al.* (2011) também observaram, em laboratório, que um sistema de cobertura utilizando produtos de compostagem de resíduos ou misturas de compostagem podem melhorar os processos de oxidação de CH_4 e minimizar a infiltração de água.

Em relação à camada de cobertura estudada por Lopes (2011), a redução da infiltração de água na camada convencional foi mais eficiente, porém a camada oxidativa obteve dados de infiltração na faixa das especificações da *United States Environmental Protection Agency* (USEPA). Com isso, as duas camadas foram consideradas satisfatórias. Em laboratório, a camada oxidativa foi mais eficiente quando comparada à camada convencional, retendo mais água.

Emissão de metano

O fluxo de CH_4 nos solos foi efetuado em duas fases para melhor análise dos fatores que afetam o desempenho das camadas de cobertura. Os resultados dos fluxos nas colunas são apresentados seguindo essas fases. A primeira verifica as emissões gasosas utilizando injeção de CH_4 , e a segunda avalia as emissões de CH_4 após a infiltração de água no solo.

A primeira fase consistiu no fluxo contínuo de CH_4 de 30 dias em um sistema fechado, sendo os primeiros 10 dias utilizados para o preenchimento dos vazios do solo pelo CH_4 , para, assim, poder medir corretamente o fluxo do gás pela camada de cobertura (0,5 L/h – 8,3 mL/min ou 486,0 g/m²dia).

A Figura 11 apresenta o fluxo do gás na Coluna 1 (camada convencional) do 11º ao 30º dia de ensaio.

Os resultados da Coluna 1 (solo) indicam redução da concentração de CH_4 de 54% entre a base e o topo da camada, em que o primeiro trecho (relação entre a base e o sensor 1) apresenta redução média de 31%; o segundo trecho (relação entre os sensores 1 e 2), de 14%; e a medição do terceiro trecho (relação entre os sensores 2 e 3), de 31%.

A Figura 12 apresenta o fluxo do gás na Coluna 2 (camada solo + produto compostado) do 11º ao 30º dia de ensaio.

Os resultados da Coluna 2 (solo + produto compostado) indicam uma redução da concentração de CH_4 também em 54% entre a base e o topo da camada, em que o primeiro trecho (relação entre a base e o sensor 1) apresenta uma redução média de 24%; o segundo trecho (relação entre os sensores 1 e 2), de 12%; e a medição do terceiro trecho (relação entre os sensores 2 e 3), de 30%.

A retenção do gás é verificada quando se alcança a diminuição da concentração no topo da coluna em relação ao primeiro nível, como pode ser visualizado na Figura 13.

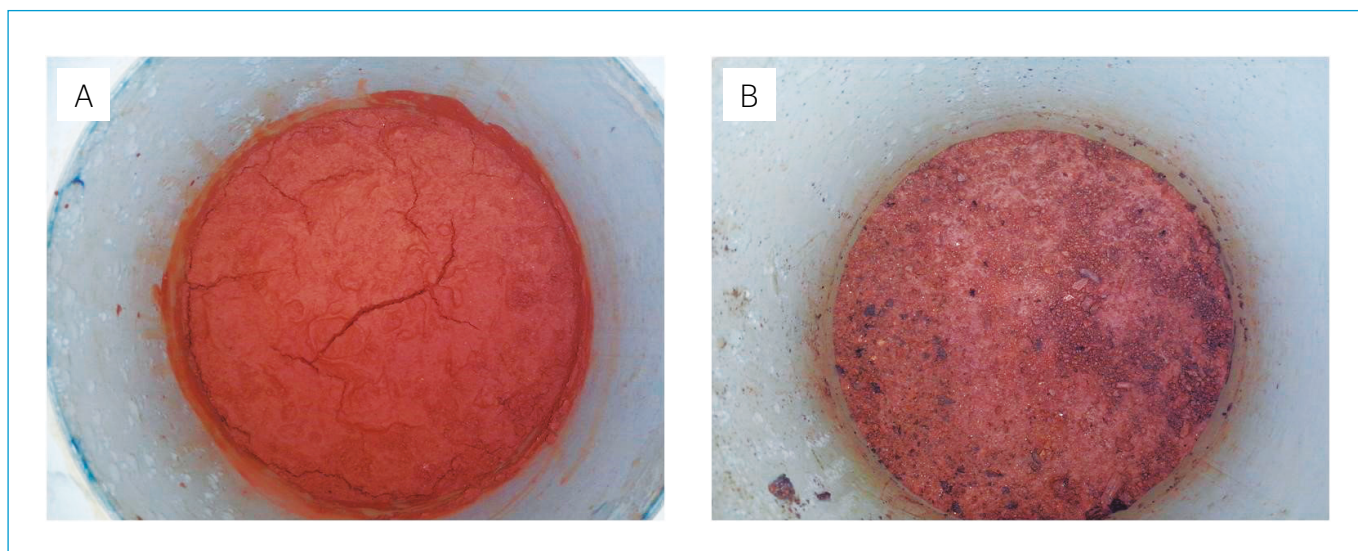


Figura 10 - (A) Superfície da camada de solo da Coluna 1 (camada convencional); (B) superfície da camada de solo da Coluna 2 (camada oxidativa).

As colunas 1 e 2 obtiveram uma faixa de variação de retenção de CH₄ com valores muito próximos para os dois materiais. As duas colunas, no início de sua construção, estando na umidade ótima, sem grandes mudanças no teor de umidade, têm desempenho similar quanto à retenção de gás.

Posteriormente, para simular um período chuvoso, foram colocados 40 mm de água nas colunas com o intuito de aumentar a umidade do material. Em seguida, injetou-se novamente CH₄ com fluxo de 0,5 L/h (8,3 mL/min ou 486,0 g/m² dia) por um período de 40 dias. A Figura 14 apresenta o percentual de redução de CH₄ na Coluna 1 (solo) e na Coluna 2 (solo + produto compostado) nos 40 dias de ensaio.

Como observado na Figura 14, a Coluna 2 apresentou melhor comportamento em relação à retenção de gás. Nessa etapa, os materiais

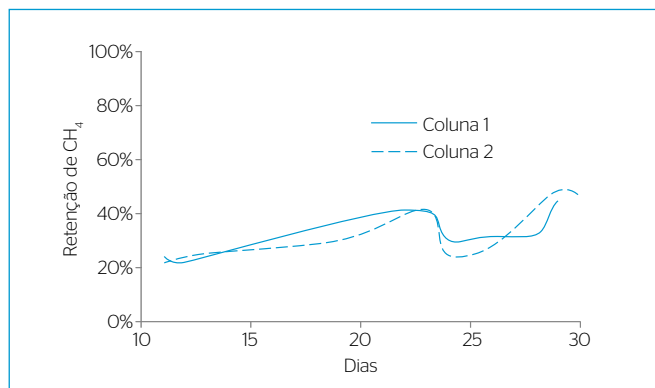


Figura 13 - Redução de emissões de metano nas colunas 1 e 2 na primeira fase de ensaio.

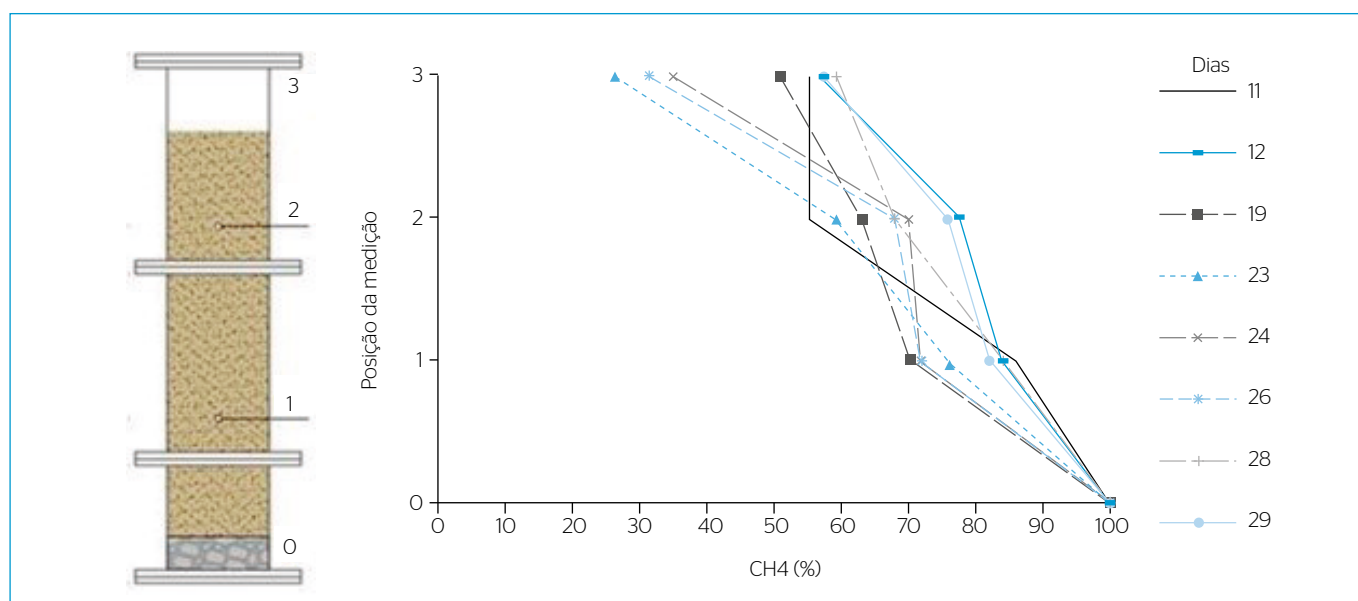


Figura 11 - Fluxo de metano na Coluna 1 (camada convencional) no 11º ao 30º dia de ensaio.

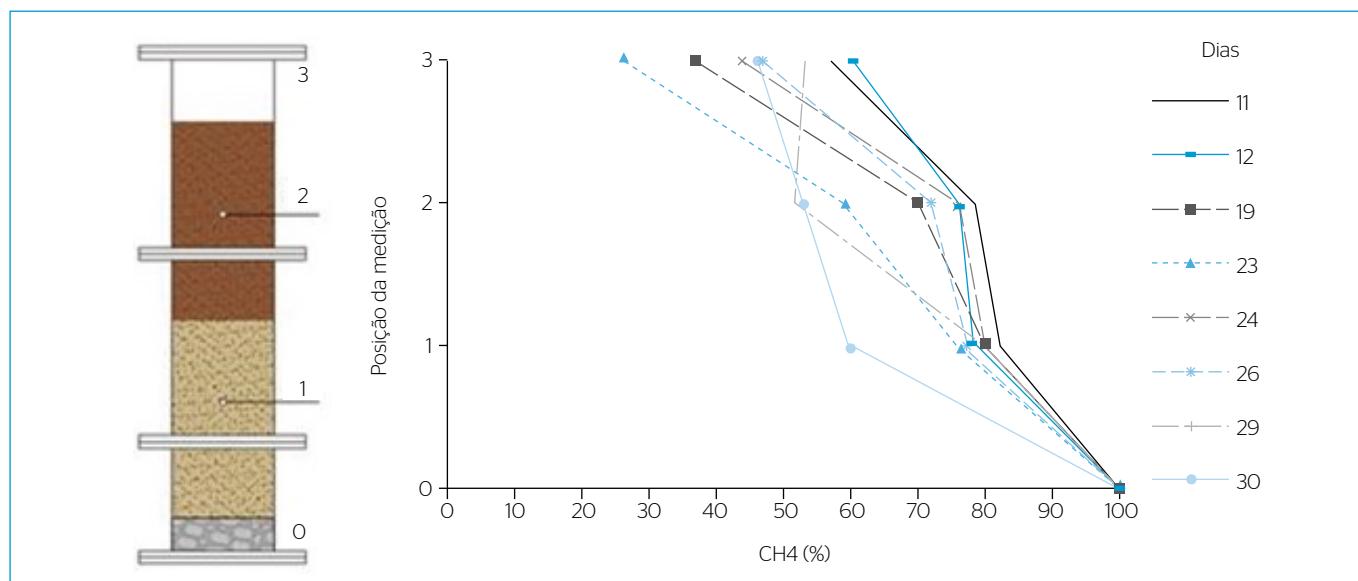


Figura 12 - Fluxo de metano na Coluna 2 (camada solo + produto compostado) no 11º ao 30º dia de ensaio.

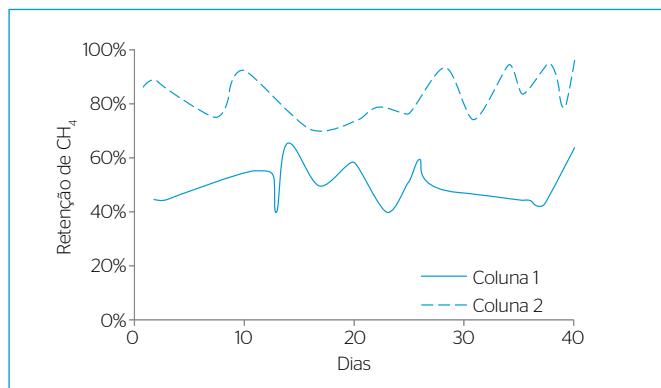


Figura 14 - Redução de emissões de metano nas colunas 1 e 2 na segunda fase de ensaio (após simulação de chuva).

das colunas estavam com umidades mais elevadas devido ao acréscimo de água realizado na segunda fase de ensaios. Com as colunas mais úmidas, há maior dificuldade de passagem de gás em seu interior devido ao acúmulo de água nos vazios do solo. A Coluna 2, com maior capacidade de retenção de líquidos, tende a apresentar maior eficiência em relação à retenção de CH_4 ao longo do tempo. A Coluna 1 também consegue reter esse gás, porém em menor quantidade, uma vez que, pela configuração dessa camada, a capacidade de retenção de líquidos é menor, e também por ela apresentar maior quantidade de microfissuras após um ciclo de umedecimento do solo.

Em relação à camada de cobertura estudada por Lopes (2011), com relação às emissões gasosas, a camada oxidativa teve melhor desempenho em campo e laboratório comparada à camada convencional, mostrando-se eficiente na retenção de gás e na tendência de oxidação do CH_4 .

A camada solo + produto compostado tem características compatíveis com a camada de cobertura pesquisada por Abichou *et al.* (2015). Seus resultados indicaram melhor eficiência na oxidação de CH_4 e retenção de líquidos devido ao aumento da MO e de porosidade ao solo, situação similar ao que ocorreu com o solo em estudo.

Costa (2015) apresenta resumo de oito estudos realizados em laboratório por meio do ensaio de colunas, em que se observa que camadas compostas com produto compostado são mais eficientes na redução de emissões de CH_4 do que as camadas compostas apenas por solo.

CONCLUSÕES

Os ensaios em colunas de solos forneceram informações importantes a respeito das camadas de cobertura de aterro sanitário.

Em relação à infiltração, os ensaios realizados com a mistura de solo + produto compostado apresentaram melhor desempenho do que aqueles feitos apenas com solo, promovendo maior retenção de água no primeiro nível da coluna, impedindo a passagem para maiores profundidades. Também foi observado que a superfície da Coluna 2 não apresentou microfissuras visíveis, diferente da Coluna 1, que apresentou fissuras no topo da camada de solo, indicando que a mistura do produto compostado com o solo melhora as condições de retração do solo.

Em relação às emissões do CH_4 , observou-se que as duas camadas apresentam a mesma faixa de redução de emissões para as condições ambientais sem precipitações. Entretanto, quando ocorreram infiltrações de água nas camadas, observou-se que a camada de solo + produto compostado apresentou redução de emissões em torno de 80% e a camada de solo chegou no máximo a 60%. Isso indica que a camada de solo + produto compostado contribuiu para uma maior redução de emissões de biogás logo após o período de umedecimento da camada.

Assim, de uma forma geral, o material solo + produto compostado apresentou melhor desempenho tanto para a redução da infiltração de água de chuva para massa de resíduo e, consequentemente, geração de lixiviados, quanto na redução de emissões de CH_4 para a atmosfera. Nesse sentido, este estudo indicou que é possível propor soluções alternativas de camada de cobertura final que, além de serem mais eficientes do que as camadas de solos convencionais, podem vir a reduzir os custos de instalação e manutenção das camadas de cobertura finais de aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

ABICHOU, T.; KORMI, T.; YUAN, L.; JOHNSON, T.; FRANCISCO, E. (2015) Modeling the effects of vegetation on methane oxidation and emissions through soil landfill final covers across different climates. *Waste Management*, v. 36, p. 230-240.

ALCÂNTARA, P.B. (2007) *Avaliação da influência da composição de Resíduos Sólidos Urbanos no comportamento de aterros simulados*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

BIDONE, F.R.A.; POVINELLI, J. (1999) *Conceitos básicos de resíduos sólidos*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC/USP). 120p.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT). (2014) *Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil*. 2. ed. Brasília: MCT.

CATAPRETA, C. A. A. (2008) *Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

COSTA, M.D. (2015) *Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos*. 144f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). (1997) *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 212p.
- HUBER-HUMER, M.; RÖDER, S.; LECHNER, S. (2009) Approaches to assess biocover performance on landfills. *Waste Management*, v. 29, p. 2092-2104.
- HUMER, M.; TINTNER, J.; BÖHM, K.; LECHNER, P. (2011) Scrutinizing compost properties and their impact on methane oxidation efficiency. *Waste Management*, v. 31, p. 871-883.
- HUSE, K. (2007) *Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros*. 138f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- IGNATIUS, S.G. (1999) *Fluxo unidirecional de gás através de um solo compactado - determinação laboratorial de parâmetros*. 337p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- LOPES, R.L. (2011) *Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos*. 274f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- MACIEL, F.J. (2003) *Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- MACIEL, F.J.; JUCÁ, J.F.T. (2011) Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. *Waste Management*, v. 31, p. 966-977.
- OLIVEIRA, O.M.; MARINHO, F.A.M. (2007) Estudo de Barreiras Capilares por Meio de Simulação de Chuva em Coluna de Solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6., 2007. *Anais...* Salvador.
- ROSE, J.L. (2009) *Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camada oxidativas experimentais*. 166f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.
- SPRINGER, D.S.; LOAICIGA, H.A.; CULLEN, S.J.; EVERETT, L.G. (1998) Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions. *Ground Water Publising*, v. 36, n. 4, p. 558-565.
- STYLIANOU, C.; DEVANTIER, B.A. (1995) Relativity air permeability as function of saturation in soil venting. *Journal of Environmental Engineering*, v. 121, n. 4, p. 337-347.
- TORTORA, G.J.; FUNKE, B.R.; CASE, C.L. (2012) *Microbiologia*. Tradução: Aristóbolo Mendes da Silva et al. Revisão técnica: Flávio Guimarães da Fonseca. 10. ed. Porto Alegre: Artmed.
- TEIXEIRA, P.F. (2008) *Oxidação Biológica do Metano em Coberturas de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Dinâmica do Processo e Aspectos Geotécnicos*. 168f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- TSUTYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALÉM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M.O. (2001) *Biossólidos na Agricultura*. 1 ed. São Paulo: SABESP, 486p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). (2003) *Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet*. Solid Waste and Emergency Response EPA 542-F-03-015 Agency (5102G). Disponível em: <<http://www.epa.gov/tio/download/remed/epa542f03015.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2014.
- VIEIRA, A.M. (2005) *Estudo de barreiras capilares como Cobertura final de aterro de resíduos*. 287f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.