

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Avaliação Temporal das Características Físicas das Camadas de Cobertura de Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos

Laís Roberta Galdino de Oliveira

Professora Adjunta, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, laisroberta@ufg.br

Derovil Antonio dos Santos Filho

Doutor em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, derovilsantos@gmail.com

Maria Odete Holanda Mariano

Professor Associado II, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, odete@ufpe.br

José Fernando Thomé Jucá

Professor Titular, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, jucah@ufpe.br

Lana Kainy Torres Souza

Mestranda do Programa Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, ana.torres@discente.ufg.br

RESUMO: Os aterros sanitários são obras de engenharia projetadas para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, visando a redução dos danos ao meio ambiente. Desta maneira, as camadas de cobertura, especificamente, devem ter baixa permeabilidade às águas das chuvas e ao biogás produzido pela decomposição dos resíduos. Portanto, o presente trabalho objetivou avaliar as características físicas da camada de cobertura, ao longo do tempo, em uma célula experimental localizada Aterro da Muribeca/PE. Nesse sentido, uma das camadas apresentou uma composição convencional de solo compactado, e as demais foram confeccionadas com materiais alternativos. Para a realização dos ensaios de caracterização dos solos, empregados como camadas de cobertura, foram coletadas amostras deformadas e conduzidos os ensaios laboratoriais conforme as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas. O ensaio de permeabilidade, em especial, foi realizado segundo a norma ASTM D5084-10, em permeâmetro de parede flexível. A partir disto, todas as camadas foram classificadas como siltes de baixa plasticidade, no entanto, apenas as camadas metanotróficas sofreram alteração em sua classificação. E apesar das permeabilidades a água e ao ar terem aumentado ao longo de 3 anos, a mesmas ainda atendem as normas brasileiras. Desta forma, sugere-se a definição de parâmetros de controle baseados nas características dos solos ao longo do tempo.

PALAVRAS-CHAVE: aterro de resíduos sólidos urbanos, granulometria, limites de consistência, permeabilidade.

ABSTRACT: Sanitary landfills are engineering works designed for the environmentally appropriate final disposal of waste, aiming at reducing damage to the environment. In this way, the covering layers, specifically, must have low permeability to rainwater and to the biogas produced by the decomposition of waste. Therefore, the present work aimed to evaluate the physical characteristics of the covering layer, over time, in an experimental cell located at Aterro da Muribeca/PE. In this sense, one of the layers presented a conventional composition of compacted soil, and the others were made with alternative materials. In order to carry out the soil characterization tests, used as cover layers, deformed samples were collected and laboratory tests were carried out according to the norms of the Brazilian Association of Technical Norms. The permeability test, in particular, was performed according to ASTM D5084-10, in a flexible wall permeameter. From this, all layers were classified as low plasticity silts, however, only the methanotrophic layers underwent changes in their classification. And although the water and air permeabilities have increased over 3 years, they still meet Brazilian standards. Thus, it is suggested the definition of control parameters based on soil characteristics over time.



KEYWORDS: urban solid waste landfill, particle size, consistency limits, permeability.

1 Introdução

A problemática ambiental da geração de resíduos sólidos, em face de sua complexidade e diversidade, constitui um sério desafio a ser enfrentado. A destinação e disposição adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma preocupação socioambiental mundial e uma das metas de políticas públicas do Brasil, estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010), e retificada na nova lei que atualiza o marco legal do saneamento básico, Lei Federal nº 14.026 (BRASIL, 2020).

Mesmo assim, cerca de 30,3 milhões de toneladas de RSU foram dispostos inadequadamente, em lixões e aterros controlados, no ano de 2020 (ABRELPE, 2021). Podendo, então, causar a poluição do solo, do ar e das águas superficiais e subterrâneas, devido à falta de sistemas de impermeabilização, coleta e tratamento do biogás e do lixiviado (OLIVEIRA, 2018).

Vale salientar que durante o processo de biodegradação dos resíduos, especialmente dos materiais orgânicos, ocorre a liberação dos gases de efeito estufa e lixiviado (LOPES et al., 2010). Uma vez que, a maioria dos sistemas de drenagem de biogás são capazes de captar entre 40 e 60% do biogás gerado no aterro sanitário, assim, o excedente pode atravessar a camada de cobertura e escapar para a atmosfera (BARLAZ et al., 2004). Portanto, segundo Lee et al. (2016), os resíduos sólidos contribuem com cerca de 800 toneladas de CO₂ para a atmosfera anualmente.

Nesse sentido, um dos sistemas de proteção ao meio ambiente é a camada de cobertura final, que funciona como uma barreira de impermeabilização dos resíduos as condições do ambiente externo, impedindo a infiltração da água precipitada e a liberação de gases para a atmosfera (MARIANO, 2008). Diante disso, a quantidade de metano emitida dos aterros sanitários à atmosfera pode ser controlada pelo tipo de camada de cobertura sobre o aterro (CANDIANI, 2017).

No Brasil, geralmente utiliza-se uma camada de solo compactada sobre os resíduos sólidos, entretanto, devido às condições climáticas, esta camada de solo acaba perdendo sua eficiência, ocorrendo o escape fugitivo de biogás (LOPES et al., 2010).

Assim sendo, a principal diferença entre camadas de cobertura convencional e camadas de coberturas alternativas está relacionada aos materiais de sua composição, enquanto a camada convencional emprega solos de baixa condutividade, a camada alternativa emprega materiais alternativos, que em geral são considerados resíduos para outros empreendimentos (FRANQUETO et al., 2020).

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar os parâmetros geotécnicos e o comportamento hidráulico, após 3 anos da implantação, de três diferentes configurações de camadas de cobertura no Aterro Experimental da Muribeca/PE.

2 Metodologia

Este estudo foi realizado em uma célula experimental localizada no Aterro da Muribeca/PE (Figura 1), a qual possui taludes e berma como camada de cobertura do tipo convencional, no entanto, a cobertura do platô superior foi dividida em três regiões com diferentes composições de materiais: camada convencional (70 cm de solo compactado), camada tipo barreira capilar (constituída por uma camada de pedra britada com espessura de 0,20 m sobreposta por uma camada de solo de 0,5 m) e camada metanotrófica (parte inferior constituída com 0,3 m de solo compactado e a superior com mistura de solo e composto, nas proporções de 1:1 e 3:4, também com 0,3 m).

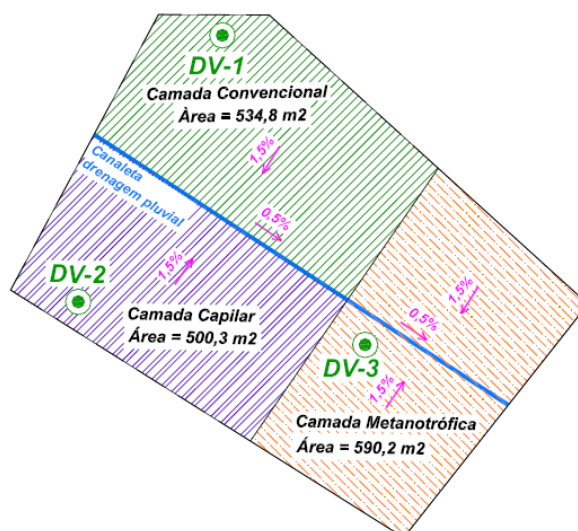


Figura 1. Distribuição dos três tipos de cobertura na camada superior da célula experimental (MACIEL, 2009).

Para a realização dos ensaios de caracterização coletou-se quatro amostras amolgadas de cada camada de cobertura, com o auxílio de uma cavadeira articulada. Posteriormente os materiais foram preparados e ensaiados conforme normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 6457: Amostra de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização (ABNT, 2016b); NBR 7181: Análise granulométrica para solos (ABNT, 2016a), com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material de acordo com a norma NBR 6502 – solos e rochas (ABNT, 1995); NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 2016d); NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 2016e); NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação (ABNT, 2016c).

E para realização do ensaio de permeabilidade à água e ao ar retirou-se uma amostra indeformada da camada convencional, em moldes de PVC de 0,10 m de diâmetro e 0,15 m de altura. Sendo o ensaio realizado segundo a norma ASTM D5084-10 (ASTM, 2010), em permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE (Figura 2). Vale salientar que os procedimentos adotados para a realização deste ensaio, foram os mesmos realizados por Lopes (2011).



Figura 2. Equipamento utilizado no ensaio de permeabilidade.

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade saturada – K_{sat} , utilizou-se a Equação 1. E para determinação da permeabilidade ao ar utilizou-se a Equação 2, formulada a partir da Lei de Darcy que considera o efeito da compressibilidade do fluido.



$$K_{\text{sat}} = \frac{V \times L}{\Delta P \times t \times A_{\text{cp}}} \quad (1)$$

Onde: K_{sat} é o coeficiente de permeabilidade à água (m/s); V é o volume do líquido percolado (m^3); L é a altura do corpo de prova (m); ΔP é a variação da carga de pressão (m); t é o tempo necessário para percolar o volume de 5 ml (s); e A_{cp} é a área do corpo de prova (m^2).

$$k_{\text{int}} = \frac{2 \times v \times \mu \times L \times P_s}{(P_e^2 - P_s^2)} \quad (2)$$

Onde: K_{int} é a permeabilidade intrínseca do fluido (m^2); v é a velocidade de percolação do fluido (m/s); μ é a viscosidade dinâmica do ar (Pa.s); L é o comprimento da amostra (m); P_e é a pressão de entrada (Pa); e P_s é a pressão de saída (Pa).

Posteriormente utilizou-se planilhas eletrônicas para manipulação de dados, realização de cálculos e confecção de gráficos. E por fim, os solos empregados como camadas cobertura foram classificados conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

3 Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta a características físicas das camadas de cobertura analisadas após 3 anos de implantação.

Tabela 1. Caracterização do solo das camadas de cobertura da célula experimental.

Análises	Camada convencional	Barreira capilar	Camada metanotrófica 1	Camada metanotrófica 2
Granulometria	Argila (%)	28	25	23
	Silte (%)	27	33	28
	Areia fina (%)	10	6	16
	Areia média (%)	18	17	16
	Areia grossa (%)	15	15	13
	Pedregulho (%)	2	3	3
	Limite de liquidez – LL (%)	47	46	49
Limites de consistência	Limite de plasticidade – LP (%)	33	35	36
	Índice de plasticidade – IP (%)	14	11	13
	Classificação do sistema unificado	ML	ML	ML
	Permeabilidade saturada (m/s)	$1,3 \times 10^{-7}$	N.D.	N.D.
	Permeabilidade ao ar (m/s)	$3,6 \times 10^{-4}$	N.D.	N.D.

N.D.: não determinado.

De acordo com o SUCS, todas as camadas de cobertura analisadas foram classificadas como siltes de baixa plasticidade. Desta forma, em comparação com os resultados obtidos por Lopes (2011), pode-se observar que ambas as camadas metanotróficas tiveram sua classificação alterada de um silte de alta plasticidade, para um silte de baixa plasticidade. No entanto, não é possível afirmar que os solos destas camadas perderam quantidades significativas de partículas responsáveis pela alta plasticidade do solo, visto que os parâmetros utilizados pelo SUCS apresentaram valores limítrofes entre as duas classificações. Por outro lado, as amostras



da camada convencional e barreira capilar já foram classificadas, por Lopes (2011), como siltes de baixa plasticidade, conforme o SUCS.

Com relação a permeabilidade ao ar e a água da camada convencional, pode-se observar que para ambas as permeabilidades aumentaram com o passar do tempo, visto que Lopes (2011) encontrou permeabilidades saturada e ao ar de, respectivamente, $1,5 \times 10^{-9}$ e $4,0 \times 10^{-8}$, tornando o solo mais poroso e permeável a passagem da água das chuvas e emissões fugitivas de biogás pela camada de cobertura.

Deste modo, segundo a CETESB (1993), uma barreira hidráulica deve apresentar os seguintes parâmetros geotécnicos e comportamento hidráulico: classificação: CL, CH, SC ou OH; porcentagem de finos $> 30\%$; $LL \geq 30\%$; $IP \geq 15\%$; permeabilidade: $K < 10^{-9}$ m/s. Portanto, os critérios supracitados classificação e índice de plasticidade não estão em conformidade para todas as camadas estudadas.

No entanto, a NBR 13896 (ABNT, 1997) enfatiza, apenas, que a camada de cobertura deve reduzir a infiltração de águas pluviais e mitigar as emissões fugitivas de metano nas camadas de coberturas e também dispor de uma permeabilidade mínima inferior à do solo natural, ou seja, inferior a 10^{-6} cm/s. Nessa perspectiva, não existe uma normativa mais detalhada sobre essa técnica em relação as características geotécnicas, a espessura e a forma de executar a manutenção (COSTA, 2015; ARAUJO, 2017; MOREIRA et al., 2020).

Nesse sentido, Araújo (2018), ressalta que a realização do monitoramento de camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos urbanos, a partir da determinação do coeficiente de permeabilidade à água do solo, dos limites de consistência do material, da verificação da porcentagem de finos presente no solo, da espessura da camada e da classificação do solo segundo o SUCS, permitem avaliar se a camada atende a eficiência desejada, garantindo, assim, uma impermeabilização superior dos resíduos aterrados.

Vale salientar, ainda, que os valores de permeabilidade a água e ao ar, podem ser discrepantes, como no estudo apresentado por Belfort et al. (2019) que caracterizou um solo arenoso empregado como camada de cobertura de um Aterro sanitário em Altinho/PE, e obteve uma permeabilidade à água de 10^{-10} m/s, já quanto à permeabilidade ao ar, foi superior a 10^{-4} m/s, inviabilizando, desta forma, sua utilização como camada de cobertura final.

4 Conclusões

No presente estudo apenas as camadas metanotróficas apresentaram mudança em sua classificação do Sistema Unificado de Classificação dos Solos, de um silte de alta plasticidade (CL), para um silte de baixa plasticidade (ML). E as permeabilidades a água e ao ar da camada convencional tiveram um incremento após 3 anos de implantação. Todavia, as normas brasileiras não fazem menção ao tipo de solo e as características geotécnicas, mas, estabelece como parâmetro mínimo, um coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} m/s, nesse sentido, ainda está em conformidade com a norma técnica.

Referências Bibliográficas

- ARAÚJO, P. S. (2017) Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, PB. 138 f.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1995) NBR 6502 – Rochas e solos. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1997) NBR 13896 - Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016a) NBR 7.181 – Análise granulométrica para solos, com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material. Rio de Janeiro.



- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016b) NBR 6.457 – Amostra de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016c) NBR 6.457 – Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de. Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016d) NBR 6.459 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016e) NBR 7.180 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2021) Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021. São Paulo, SP.
- American Society for Testing and Materials – ASTM (2010) *D5084-10 - Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*. American Society for Testing and Materials.
- BARLAZ, M. A.; GREEN, R. B.; CHANTON, J. P.; GOLDSMITH, C. D.; HATER, G. R. Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions. *Environmental Science & Technology*, v. 38, n. 18, p. 4891-4899, 2004.
- BELFORT, N. T.; SANTANA, D. S.; SANTOS FILHO, D. A.; JUCÁ, J. F. T. (2019) *Permeabilidade de um Solo de comportamento anômalo utilizado para cobertura do Aterro sanitário de Altinho/PE*. IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2019), VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2019). São Carlos, SP.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 17/08/2021.
- BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Marco Legal do Saneamento Básico. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm>. Acesso em: 17/08/2021.
- CANDIANI, G.; VIANA, E. Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários. *Geousp – Espaço e Tempo (Online)*, v. 21, n. 3, p. 845-857, 2017.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB (1993) *Resíduos Sólidos Industriais*. 2. ed. São Paulo: CETESB.
- COSTA, C. M. C. (2015) *Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. 163 f.
- FRANQUETO, R.; MARTINS, E. H.; CABRAL, A. R.; SCHIMER, W. N. Monitoramento de emissões fugitivas a partir da camada de cobertura de aterro sanitário. *Revista UNINGÁ Review*, v. 35, n. 1, p. 1-21, 2020.
- LEE, S.; KIM, J.; CHONG, W.K.O. The causes of the municipal solid waste and the greenhouse gas emissions from the waste sector in the United States. *Waste Management*, v. 56, p. 593-599, 2016.
- LOPES, R. L. (2011) *Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. 268 p.
- LOPES, R. L.; JUCÁ, J. F. T.; MARIANO, M. O. H.; MACIEL, F. J. Camadas de cobertura metanotróficas como alternativas para gerenciamento de gases de efeito estufa em aterros sanitários. *Holos*, v. 4, n. 1, p. 3-18, 2010.
- MACIEL, F. J. (2009) *Geração de Biogás e Energia em Aterro Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. 333 p.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- MARIANO, M. O. H. (2008) *Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. 243p.
- MOREIRA, F. G. S.; GUEDES, M. J. F.; MONTEIRO, V. E. D.; MELO, M. C. Emissões fugitivas de biogás em camada de cobertura de solo compactado em aterro sanitário. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 2, p. 247-258, 2020.
- OLIVEIRA, L. R. G. *Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação (Mestrado). Recife: Universidade Federal de Pernambuco. 2013.
- OLIVEIRA, L. R. G. *Estudo para a metanização de resíduos alimentares*. Tese (Doutorado). Recife: Universidade Federal de Pernambuco. 2018.