

## ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE SOLO COMO MATERIAL IMPERMEABILIZANTE EM ATERROS SANITÁRIOS

<sup>1</sup>Pablo da Silva Araujo; <sup>2</sup>Jeovana Jisla das Neves Santos; <sup>3</sup>Cláudio Luís de Araújo Neto; <sup>4</sup>Raul Batista Araújo de Sousa <sup>5</sup>William de Paiva

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: pabllosa@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: jeovana\_jisla@hotmail.com

<sup>3</sup> Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: claudioluisneto@gmail.com

<sup>4</sup> Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: raulbatista01@gmail.com

<sup>5</sup> Universidade Estadual da Paraíba, e-mail: wili123@ig.com.br

**RESUMO:** Solos argilosos compactados podem ser utilizados como material impermeabilizante em aterros sanitários para camadas de base e de cobertura final. A camada de cobertura tem a função de minimizar as emissões dos gases gerados pelos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) para a atmosfera e impedir a infiltração das águas pluviais. Já a camada de base, impede que os líquidos resultantes do processo de biodegradação percolem e contaminem o lençol freático e as demais camadas de solo. O objetivo do presente artigo consiste em analisar a viabilidade da aplicação de um determinado solo para utilização em camadas de base e cobertura de aterros sanitários tendo como campo experimental uma célula de aterro sanitário preenchido com RSU da cidade de Campina Grande-PB. Como metodologia desse estudo, cumpriram-se as seguintes etapas: coleta de amostras de solos; caracterização geotécnica; e execução da camada de base e de cobertura. O solo utilizado apresentou permeabilidade à água da ordem de  $10^{-8}$  m/s e percentual de 52% de argila+silte. Esse material ainda caracteriza-se como bem graduado com a presença de partículas de tamanhos variados influenciando na permeabilidade do solo, pois partículas de argila podem preencher os vazios entre as partículas de maiores dimensões, diminuindo a sua condutividade hidráulica. Pode-se concluir que o solo estudado é viável para utilização em aterros sanitários, pois apresenta uma baixa permeabilidade a água que atende às regulamentações nacionais vigentes; possuem características granulométricas que contribuem para impermeabilização de base e cobertura e colaboram para o bom funcionamento do aterro sanitário.

**Palavras-chave:** Solos compactados, material impermeabilizante, aterro sanitário.

### INTRODUÇÃO

O crescimento da produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), ocasionada pelo rápido crescimento populacional, aumento do consumo de bens e o avanço tecnológico, tornou-se um sério problema para as cidades quanto a forma de destinação final desses resíduos. No Brasil, segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), (IBGE 2010), 50,2% dos municípios brasileiros despejam seus resíduos a céu aberto sem nenhuma preocupação ambiental. Diante disso, faz-se necessário a busca por técnicas e metodologias de tratamento dos resíduos de forma que não perturbem a biota e a integridade do ecossistema.

Segundo Alcântara (2007), dentre as diversas técnicas utilizadas para o tratamento de RSU, o aterro sanitário figura como uma técnica largamente utilizada, devido à facilidade de operação e ao custo relativamente baixo, quando comparados com outras formas de tratamento.

O princípio do aterro sanitário é controlar a migração de contaminantes para o meio ambiente por meio da contenção de resíduos, com a finalidade de evitar a poluição das águas de superfície e subterrâneas e do ar (BOSCOV, 2008). A contenção destes contaminantes pode ser realizada através do confinamento dos resíduos com solos compactados ou mantas geotêxteis. Solos argilosos compactados podem ser utilizados como material impermeabilizante em aterros sanitários nas camadas de base e cobertura (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015).

Segundo Araujo et al. (2014), o emprego de solo como material impermeabilizante sobre os resíduos depositados em aterros sanitários torna-se economicamente viável quando há disponibilidade da matéria-prima e também pelo seu baixo custo, quando comparado aos materiais sintéticos.

A camada de cobertura de solo compactado tem a função de controlar a entrada de água e ar para dentro do aterro; minimizar a migração dos gases gerados para a atmosfera; servir como elemento de redução de odor, vetores de doença e outros inconvenientes e; facilitar a recomposição da paisagem (CATAPRETA, 2008). Já em relação à camada de base, a utilização impede que os líquidos resultantes do processo de biodegradação dos RSU, denominados de lixiviado, percolem e contaminem o lençol freático e as demais camadas de solo (MACIEL, 2003).

Diversas pesquisas analisam a melhor técnica de execução da camada de cobertura e de base de solo compactado de aterros sanitários, frente às condições climáticas, e ao comportamento, quanto ao tipo de resíduo confinado e ao líquido infiltrado em seu interior. Atualmente estão em vigor a NBR 13896/1997, que trata da apresentação de projetos de aterros sanitários de RSU e a NBR 15849/2010, que trata dos critérios para projeto, execução e implantação de aterros. Usam-se ainda, algumas regulamentações da Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA), como a EPA (2004) e a EPA (2011), visto que, fornecem orientações sobre práticas operacionais em aterros sanitários, bem como contribuem para a melhoria dos procedimentos padrão dos aterros.

Diante dessa perspectiva, este trabalho objetiva analisar as potencialidades do solo para utilização como camada de base e cobertura de aterro sanitário tendo como campo experimental uma célula de aterro construída no Campus I da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) que simula as condições de um aterro sanitário, utilizando um solo coletado numa jazida do município de Boa Vista-PB.

## METODOLOGIA

O solo utilizado como material impermeabilizante das camadas de base e cobertura da célula experimental é proveniente do município de Boa Vista – PB, localizado na região metropolitana de Campina Grande (Figura 1). A metodologia é composta de três etapas principais: coleta e transporte do solo, caracterização geotécnica e execução de camada base e cobertura de solo compactado na célula experimental.

Figura 1 – Mapa de Boa Vista-PB



Fonte: adaptado do Google Maps.

### Coleta e transporte do solo

O procedimento de coleta de solo baseou-se na norma DNIT-PRO 003/94. As amostras coletadas foram acondicionadas em sacos plásticos (Figura 2) e levadas para o Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) da UFCG.

Figura 2 - Coleta de solo.



Fonte: acervo da pesquisa.

Realizaram-se ensaios *in situ* para determinação do teor de água pelo método expedito do Speedy (DNIT-ME 052/94), Figura 3, e peso específico do solo pelo método do cilindro de cravação (NBR 9813/16), Figura 4.

Figura 3 - Determinação do teor de água em campo.



Fonte: acervo da pesquisa.

Figura 4 - Realização do ensaio de cilindro de cravação.



Fonte: acervo da pesquisa.

### Caracterização geotécnica

Após a coleta e transporte das amostras de solo para o laboratório, iniciaram-se os ensaios de caracterização do material conforme os métodos descritos na Tabela 1. Os parâmetros obtidos nos ensaios de caracterização são necessários para a análise da viabilidade do solo como material impermeabilizante em aterros sanitários.

Tabela 1 - Ensaio de caracterização realizados em laboratório.

<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Preparação de amostras	NBR 6457/16
Massa específica dos grãos	NBR 6508/84
Granulometria	NBR 7181/84
Limite de plasticidade	NBR 7180/16
Limite de liquidez	NBR 6459/16
Compactação	NBR 7182/86
Permeabilidade à carga variável	NBR 14545/00

A partir dos ensaios de caracterização, foi possível conhecer o estado de condutividade hidráulica do solo na situação saturada, distribuição percentual de sua granulometria, teor de água ótima e massa específica máxima que garante uma menor compressibilidade da camada, capacidade de retenção de água no solo, características de expansibilidade e contração, além de índices de plasticidade e liquidez do material. Ademais, foi possível classificar o solo de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

### Execução das camadas de base e de cobertura da célula experimental

A célula experimental na qual o solo em estudo foi disposto, constitui num cilindro de alvenaria de tijolos manuais, com diâmetro interno de 2,0m e altura 3,5m possuindo volume aproximado de 11m<sup>3</sup>. Na parte inferior do lisímetro, foi executada a camada de base de solo (com 20 cm de espessura) atendendo às exigências dos parâmetros de teor de água ótimo e massa específica aparente seca máxima obtidos no ensaio de compactação do solo (NBR 7182/86). Em seguida, após o enchimento da célula com RSU de Campina Grande, foi feita a camada de cobertura de solo seguindo o mesmo princípio de execução da camada de base (Figura 5).

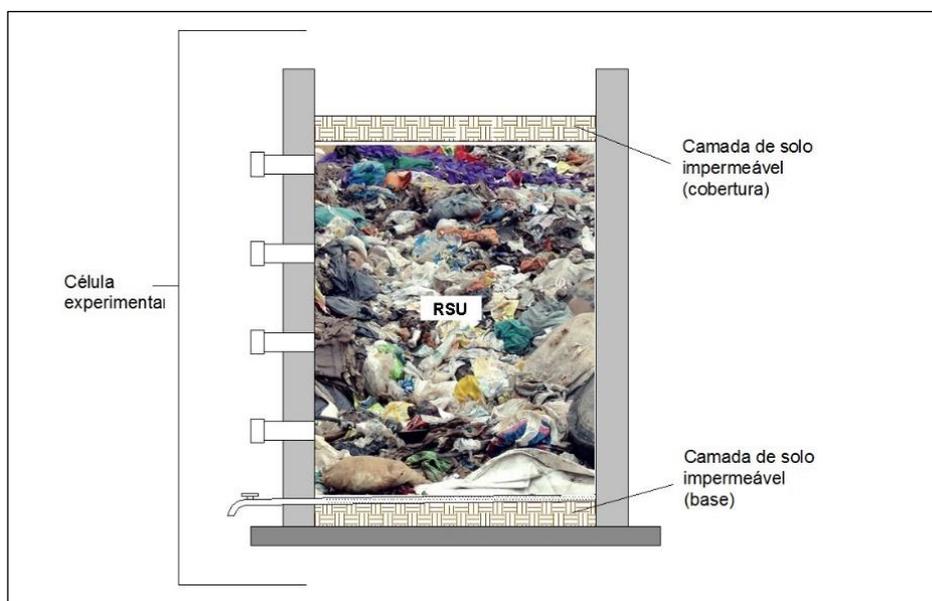
Figura 5 – Camada de cobertura após execução.



Fonte: acervo da pesquisa.

Após a execução de ambas as camadas, verificou-se a massa específica *in situ* utilizando o procedimento de cilindro de cravação (NBR 9813/16). O arranjo espacial das camadas de solo na célula experimental é ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Arranjo espacial das camadas base e cobertura de solo.



Fonte: acervo da pesquisa.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir estão apresentados os resultados e discussões obtidos a partir da realização dos ensaios *in situ* e em laboratório com o solo de Boa Vista-PB. Realizaram-se os ensaios de granulometria, compactação, limites de liquidez e plasticidade e permeabilidade.

### Granulometria

De acordo com a Figura 7, a curva granulométrica do solo em estudo apresenta percentuais em peso de partículas variadas, entre argila a pedregulho, podendo ser considerado um solo de granulometria fina, segundo Maciel (2003), pois apresenta 52% em peso de partículas finas (silte+argila). A porcentagem obtida para pedregulho, por sua vez, foi de apenas 0,06%, Tabela 2.

Figura 7 – Curva granulométrica do solo.

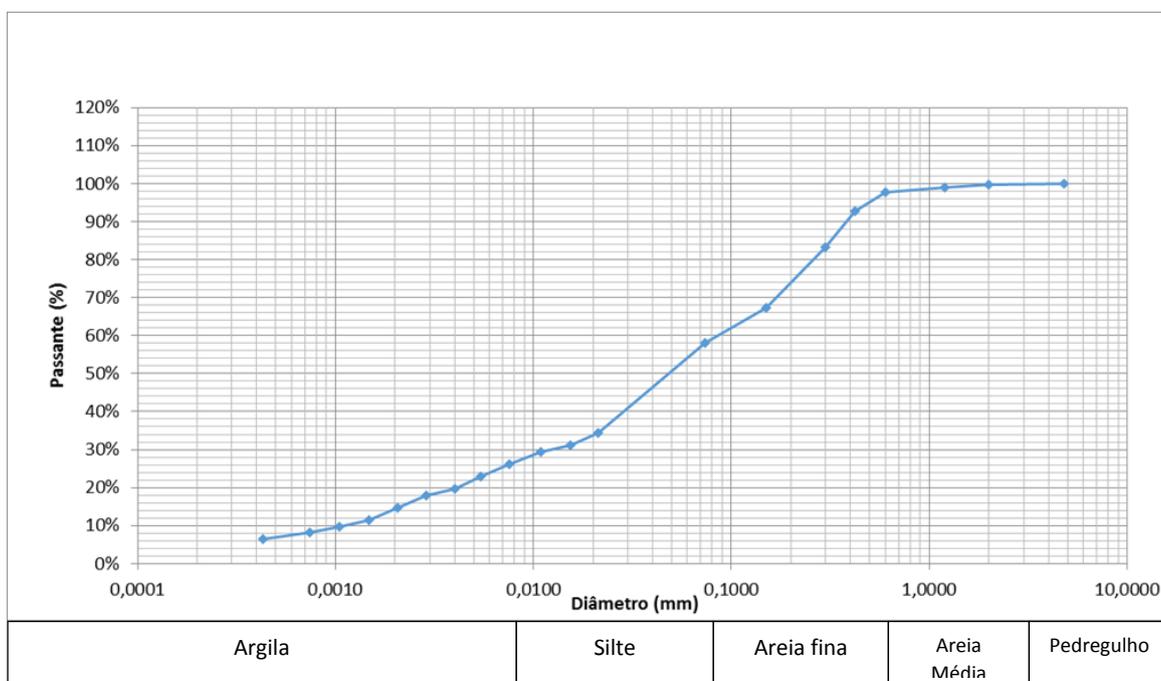


Tabela 2 – Resumo da granulometria do solo.

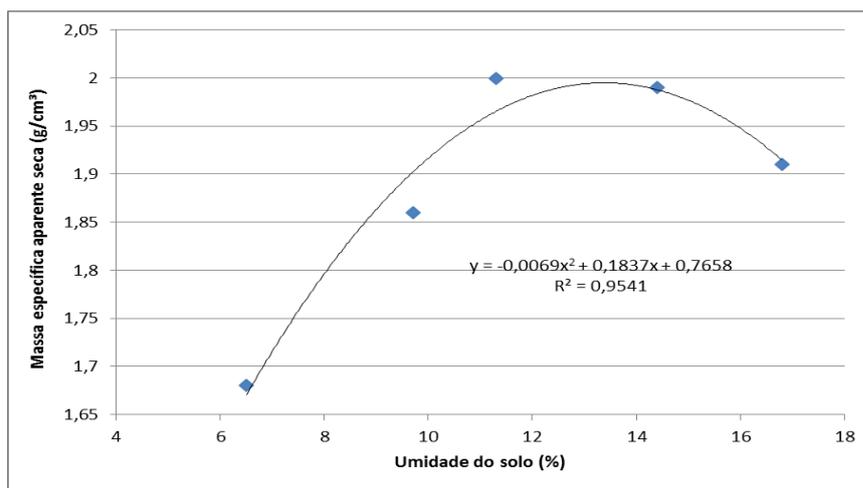
Frações do solo		Percentual (%)
Argila		22,00
Silte		30,00
Areia	Fina	28,00
	Média	20,00
	Grossa	1,94
Pedregulho		0,06

De acordo com a Figura 7 verificou-se que o Coeficiente de Curvatura (CC) do solo é de 1,52, sendo classificado, conforme Das (2011), como um solo bem graduado, por estar contido na faixa de 1 a 3. Este autor também classifica como solos não uniformes àqueles que possuem um Coeficiente de Uniformidade (CU) acima de 15. Para o solo em estudo o CU obtido é 95. Dessa forma, para sua utilização em aterros sanitários como material de base e cobertura, os solos devem apresentar características de não uniformidade na distribuição granulométrica das partículas, além de uma graduação adequada. Estas características de não uniformidade e boa graduação, com a presença de partículas de tamanhos variados, influenciam na permeabilidade do solo, pois partículas de menor graduação podem preencher os vazios entre as partículas de maiores dimensões, diminuindo a sua condutividade hidráulica.

### Compactação

A Figura 8 apresenta a curva de compactação do solo, obtida através da aplicação da energia Proctor Normal, que indica uma massa específica seca máxima de 1,99 g/cm<sup>3</sup> e um teor de água ótimo de 13,4%. Almeida et al. (2010), que caracterizaram os solos utilizados como camada de cobertura no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), encontraram valores próximos a massa específica seca máxima e ao teor de água determinado neste estudo.

Figura 8 – Curva de compactação do solo.



De acordo com Pinto (2006), o solo estudado apresenta uma característica de areia fina argilosa por apresentar teor de água ótimo entre 12 a 14% com densidade seca máxima de 1,9 g/cm<sup>3</sup>. Solos argilosos apresentam massa específica seca baixa e umidades ótimas elevadas

entre 25 a 30%. Os valores de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo não constituem índices físicos do solo e dependem da energia de compactação empregada.

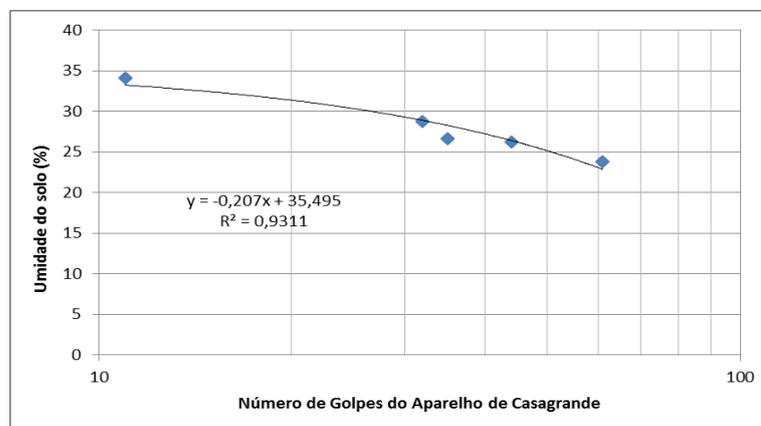
O grau de compactação obtido foi de 85,27%. Este valor encontra-se próximo ao valor obtido por Maciel & Jucá (2011) para o grau de compactação de camada impermeabilizante de um aterro sanitário, que foi de 84%, e os autores também verificaram que com esse grau de compactação os coeficientes de permeabilidade ao gás obtido tornam o solo adequado para uso como impermeabilizante. Ainda, segundo Ferreira & Mahler (2006), solos altamente compactados na camada de base e cobertura de aterros sanitários podem ocasionar a existência de poças de água e em áreas de baixa compactação o aumento de infiltração.

Foram verificadas fissuras na camada de cobertura da célula experimental. De acordo com Boscov (2008), a argila compactada é um material vulnerável a danos ocasionados por ciclos de molhagem e secagem, que estão relacionados às condições climáticas do local, e por recalques diferenciais.

#### Limites de consistência

Os Limites de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP) encontrados para o solo foram respectivamente 31% e 18%, sendo o Índice de Plasticidade (IP) de 13%. Este índice permite classificar o solo como medianamente plástico, por apresentar IP entre 7 e 15, segundo classificação de Jenkins (CAPUTO, 2015). Os limites de consistência influenciam no comportamento do solo no que se refere à compressibilidade. Pinto (2006) verificou que quanto maior o LL e o LP, maior será sua compressibilidade. Além disso, o IP influencia na atividade da fração argilosa e no seu potencial em conferir plasticidade e coesão ao solo. A Figura 9 apresenta o gráfico para determinação do limite de liquidez.

Figura 9 – Gráfico do limite de liquidez do solo.



O solo de Boa Vista-PB foi classificado de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). Com os valores do limite de liquidez e índice de plasticidade, através da Carta de Plasticidade verificou-se que o solo pertence ao grupo CL (argilas inorgânicas de plasticidade baixa a média, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas), comprovando-se o caráter medianamente plástico que foi verificado na literatura por Jenkins.

#### Ensaio de permeabilidade à carga variável

Obteve-se um coeficiente de permeabilidade a água de  $4,72 \times 10^{-8}$  m/s para o solo em estudo, caracterizando-o como um solo argiloso. Segundo a EPA (2004), o solo analisado atende ao requisito de não possuir permeabilidade superior a  $1 \times 10^{-7}$  m/s, além de ter sido executado com espessura maior que o mínimo, 15cm. Já pela NBR 13896/1997 o material analisado apresenta coeficiente de permeabilidade inferior ao mínimo estabelecido,  $10^{-6}$  cm/s, o que enquadra o solo analisado como adequado para uso em aterro.

Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 1993) sugere que para um solo argiloso ser adequado para uso em aterros sanitários, ele deve atender aos seguintes requisitos:

- Ser classificado como CL, CH, SC ou OH, segundo o SUCS;
- Apresentar uma porcentagem de partículas maior do que 30% passando na peneira de 0,075mm;
- Apresentar limite de liquidez maior ou igual a 30%;
- Apresentar índice de plasticidade maior ou igual a 15%.

## CONCLUSÕES

Conforme resultados obtidos, verifica-se que é viável o uso do solo da jazida de Boa Vista – PB para compor as camadas de base e cobertura de aterros sanitários, tendo em vista que os parâmetros analisados encontram-se dentro dos limites propostos pela literatura. Porém faz-se necessário o estudo de outras propriedades do solo, como expansão, contração, sucção, infiltração e permeabilidade a gases, mesmo que não sejam exigidas pelas normas vigentes.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15849**: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010. 24p.

\_\_\_\_\_ **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. 21p.

\_\_\_\_\_ **NBR 14545**: Solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000. 12p.

\_\_\_\_\_ **NBR 6457**: Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

\_\_\_\_\_ **NBR 6459**: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5p.

\_\_\_\_\_ **NBR 6508**: Massa específica real dos grãos. Rio de Janeiro, 1984. 8p.

\_\_\_\_\_ **NBR 7180**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p.

\_\_\_\_\_ **NBR 7181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

\_\_\_\_\_ **NBR 7182**: Compactação - Procedimento. Rio de Janeiro, 1986. 10p.

\_\_\_\_\_ **NBR 9813**: Determinação da massa específica aparente *in situ*, com emprego de cilindro de cravação. Rio de Janeiro, 2016. 5p.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados**. 2007. 364f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2007.

ALMEIDA, F. T. R.; SANTOS, G. O.; SILVA, R. A. C.; GOMES, C. C. Caracterização física do solo utilizado em camadas de cobertura no aterro sanitário de Caucaia-Ceará. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 5., 2010, Maceió. **Anais eletrônicos**. Maceió: IFAL, 2010. Disponível: <<http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/view/248>>. Acesso em: 13 mai. 2016.

ARAUJO, P. S.; SILVA, D. L. M.; CARIBE, R. M.; BATISTA, P. I. B.; MONTEIRO, V. E. D. Estudo geotécnico para impermeabilização de aterro sanitário em escala experimental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., 2014, Goiânia. **Anais Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Goiânia: ABMS, 2014. CD-ROM.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. 1. reimp. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR., G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 759p.

CAPUTO, H. P; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos solos e suas aplicações** – Fundamentos. Vol. 1. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos – LTC, 2015. 256p.

CATAPRETA, C. A. C. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação.** 2008. 316f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2008.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Resíduos Sólidos Industriais.** 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233p.

DAS, B. M. **Fundamentos da engenharia geotécnica.** 8. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2011. 632p.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **PRO-003: Coleta de amostras deformadas de solos.** 1994. 4p.

\_\_\_\_\_**ME-052: Solos e agregados miúdos – determinação da umidade com emprego do Speedy.** 1994. 4p.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers.** Washington DC., 2004. 421p.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Fact sheet on evapotranspiration cover systems for waste containment.** Washington DC., 2011. 26p.

FERREIRA, M. A. S.; MAHLER, C. F. Avaliação do solo das camadas de cobertura intermediárias e finais – estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13., 2006, Curitiba. **Anais Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.** Curitiba: ABMS, 2006, v. 3. p. 1377-1382.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. **IBGE,** Fev. 2016. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicoesdevida/pnsb2008/default.shtm>>. Acesso em: 19 fev. 2016.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE.** 2003. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2003.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. **Waste Management,** United Kingdom, v. 31., n. 5, p. 966-977, 2011.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006. 367p.