

**ÁREA TEMÁTICA: GESTÃO AMBIENTAL**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE SOLO DE ATERRO  
COM CAMADAS DE COBERTURA OXIDATIVA.**

*Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque Almeida<sup>1</sup> (aliceguilherme@hotmail.com), Bruna Silveira Lira<sup>1</sup> (brunaslira@gmail.com), Guilherme José Correia Gomes<sup>1</sup> (guilhermejcgomes@hotmail.com), José Fernando Thomé Jucá<sup>1</sup> (jftjucah@icloud.com), Maria Odete Holanda Mariano<sup>1</sup> (odete.mariano@gmail.com)*

1 UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO -UFPE

**RESUMO**

As camadas de cobertura do tipo oxidativas são bastante úteis principalmente em aterros em que não há um sistema de captação de gases, pois a camada composta com material orgânico é capaz de fazer a oxidação do metano, diminuindo assim a emissão deste gás para a atmosfera. Desta forma, analisar o comportamento geotécnico de misturas de solo com material compostado permitiram aferir positivamente a sua utilização, mesmo em proporções sensivelmente mais elevadas (como na proporção 1:1 e 2:1 volumétrica), com boas características de granulometria, compactação, adensamento, densidade real dos grãos, curva de retenção, limites de liquidez e plasticidade, garantindo assim, margens para um uso adequado de material antes descartado e ainda permitindo a adoção de um meio mais sustentável para destinação de resíduo sólido urbano

**Palavras-chave:** Camadas Oxidativas; Caracterização Geotécnica; Curva de retenção

**ANALYSIS OF GEOTECHNICAL BEHAVIOR OF GROUNDING SOIL WITH  
OXIDATIVE COVERING LAYERS.**

**ABSTRACT**

The coating layers of the oxidative type, is very useful mainly in landfills where there is no gas capture system, so a layer with organic material is capable of oxidizing methane, reducing the emission of this gas into the atmosphere. Therefore, to analyze the geotechnical behavior of soil mixtures with composted material allowed to evaluate positively its use, even in ratios significantly higher (such as the 1:1 and 2:1 ratio in volume), with good characteristics of grain size, compaction, consolidation, real density of the grains, retention curve, liquid limit and plasticity limit, thus guaranteeing margins for an adequate use of material previously discarded and still allowing the adoption of a more sustainable means for the destination of municipal solid waste.

**Keywords:** Oxidative layer; Geotechnical characterization; Retention curve.

**1. INTRODUÇÃO**

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) está intimamente ligada ao crescimento populacional. Em países subdesenvolvidos a geração de lixo torna-se um grande problema, uma vez que quanto mais resíduo é gerado, mais recursos são necessários para a sua coleta e tratamento. Resíduos sólidos que não recebem um tratamento adequado podem ser responsáveis por uma série de problemas ambientais e de saúde pública (ROSE, 2009). Como forma de tratamento e disposição final dos resíduos gerados são utilizados aterros sanitários, que são obras de engenharia projetadas sobre critérios técnicos com o objetivo de mitigar os danos à saúde e ao meio ambiente. Por ser uma obra segura, o aterro impede que a água da chuva infiltre e aumente a geração de lixiviado, bem como garantir também que haja um maior aproveitamento do biogás gerado durante todo o processo de degradação.

Com o propósito de garantir uma impermeabilização do aterro no local de instalação, após a deposição do resíduo é necessário fazer uma camada de cobertura final para certificar que não haja a proliferação de vetores (roedores, insetos e aves), bem como minimizar que gases provenientes da degradação dos resíduos sejam lançados para a atmosfera. Se aplicada de forma adequada, a utilização de camadas de cobertura é capaz de diminuir significativamente uma série de problemas ambientais que porventura possam vir a acontecer (HRAD *et al.*, 2012; TEIXEIRA, 2008).

Atualmente o uso de camadas de cobertura alternativas em aterros sanitários tem apresentado um crescimento significativo.

Entre as camadas utilizadas destacam-se as camadas oxidativas, que utilizam uma mistura de solo com composto orgânico para melhorar a oxidação dos gases gerados, bem como auxiliar na retenção dos líquidos provenientes das chuvas. O composto orgânico utilizado é derivado de material estabilizado de leiras de compostagem (que geralmente se destinam a adubos ou mesmo ao descarte em aterros). Com isso, a obtenção de curvas características dos materiais mostra-se importante para a análise do comportamento de uma camada de cobertura perante ciclos de umedecimento e secagem, de modo a promover um dimensionamento mais seguro, além de permitir a correlação com parâmetros tais como condutividade hidráulica potenciais de expansão e contração.

## **2. OBJETIVO**

O principal objetivo deste trabalho é a análise do comportamento geotécnico, em termos de curvas características, do solo puro e das misturas de solo com produto compostado para a utilização em camadas de cobertura de aterros sanitários.

## **3. METODOLOGIA**

### **3.1 Caracterização física**

Para a confecção da camada oxidativa foi necessário fazer a mistura de composto orgânico com solo argiloso. A coleta do solo foi feita em uma jazida localizada nas proximidades do Aterro da Muribeca, na cidade de Jaboatão dos Guararapes/PE- Brasil, onde inclusive este mesmo solo era utilizado para a confecção das camadas de cobertura do próprio Aterro. O composto orgânico utilizado foi oriundo de uma composteira localizada no Jardim Botânico do Recife/PE- Brasil.

Em seguida foram executados os ensaios de laboratórios para a caracterização física e determinação das propriedades dos materiais utilizados para a camada. Os ensaios foram executados sempre focando nos mecanismos de transporte de gases e de líquidos e possíveis fatores que possam vir a afetar o desempenho e funcionalidade da camada de cobertura. Os ensaios foram realizados no solo puro, produto compostado e na mistura de solo com produto compostado, em uma proporção de 2:1 e 1:1 de solo composto respectivamente.

Os ensaios realizados foram:

- Preparação de amostras (NBR-6457/86);
- Análise granulométrica (NBR-7181/88);
- Limite de liquidez (NBR-6459/84);
- Limite de Plasticidade (NBR-7180/84);
- Peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ ) - método do picnômetro (NBR-6508/84);

### **3.2 Ensaio de Sucção**

Para cada tipo de solo estudado, foram moldados 9 anéis de aço inoxidável tipo shelby com dimensões de 2cm de altura e 7,26cm de diâmetro. Destes anéis, foram destinados 3 anéis para o material de solo puro, 3 anéis para a mistura 1:1 e 3 anéis para a mistura 2:1. Para obtenção das curvas de retenção foi utilizado o método do papel filtro, normatizado pela ASTM D5298-92, tal

método se baseia no princípio de absorção, uma vez que ao colocar em contato papel filtro com um material poroso mais úmido o papel tende a absorver a água presente no meio até que haja um equilíbrio no sistema. Com esta técnica é possível obter uma relação entre a umidade ou grau de saturação e a sucção do solo. A curva característica é a relação gráfica desta relação. Para o ensaio foi adotado o mesmo período mínimo de equilíbrio proposto por Marinho (1995), que são de 7 dias. O papel filtro utilizado foi o Whatman nº 42 que possui umidade inicial de estado seco de 6%.

*Procedimento do experimento:*

- Foram moldados os nove corpos de prova em diferentes umidades, um anel na umidade ótima e outros dois abaixo e acima da umidade ótima. Esta umidade ótima é obtida através do ensaio de compactação do Proctor Normal onde se determina a umidade para obtenção do máximo peso específico. Em seguida foram escolhidos para cada tipo de material um anel que se manteria na umidade ótima (UO) e outros dois que estariam acima e abaixo da umidade ótima, como elucida a Tabela 1.

Tabela 1: Esquema da utilização dos anéis.

ANEL	Umidade
03	ABAIXO DA ÓTIMA
04	ÓTIMA
05	ACIMA DA ÓTIMA

- Em seguida foram colocados um anel de cada tipo de material em cima de uma pedra porosa e dentro de uma bandeja com água destilada na altura da pedra porosa, tal mecanismo foi necessário para que houvesse a saturação do corpo de prova através do processo de capilaridade. Feito isto, os anéis permaneceram dentro da bandeja em um período de 24 horas.
- Posteriormente foi colocado o papel filtro Whatman nº 42 em todas as nove amostras. Para a determinação da sucção matricial foi colocado o papel filtro diretamente em contato com o solo e para a sucção total o papel filtro foi colocado no anel, mas com uma tela espessa impedindo o contato direto. A Figura 1 mostra o processo de colocação do papel filtro no anel.

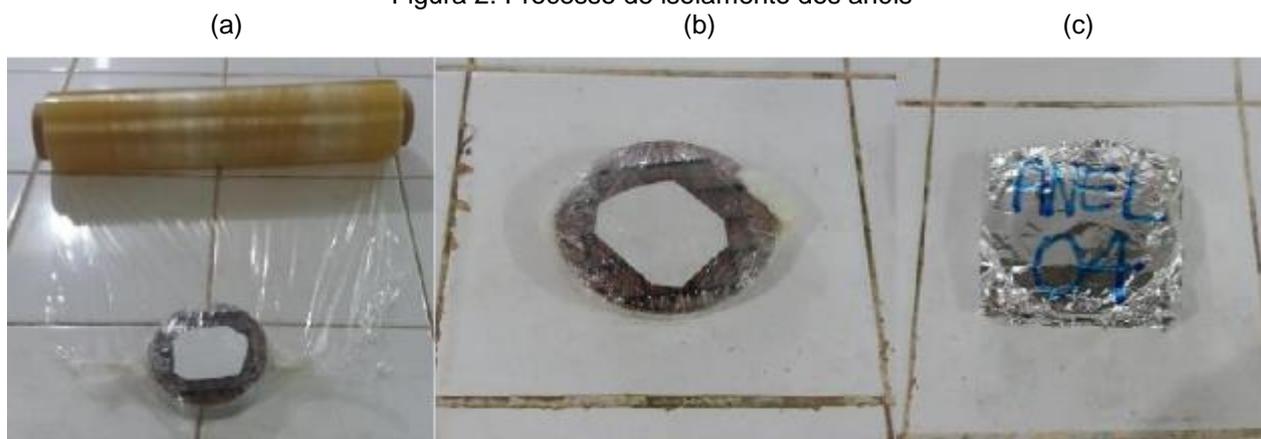
Figura 1: Posicionamento do papel filtro no anel



- Em seguida os anéis com seus devidos papéis filtro foram envolvidos com várias camadas de papel filme e uma camada de papel alumínio (Figura 2 (a)). Após este

processo as amostras foram colocadas dentro de uma caixa de isopor para que as amostras não entrassem em contato com a umidade do ambiente externo por um período de 7 dias.

Figura 2: Processo de isolamento dos anéis



- Passados os 7 dias o papel filtro foi retirado de cada amostra e pesado em uma balança com precisão de 0,0001g para assim determinar o seu peso úmido.
- Após o processo de pesagem, as amostras são deixadas em repouso para que ocorra perda de umidade ao ar livre
- O papel filtro retirado das amostras são colocados em cápsulas e encaminhados para a estufa onde permanecem por 24 horas a uma temperatura de 105°C. Após as 24 horas o papel filtro volta a ser pesado, como mostra a Figura 3.

Figura 3: Pesagem do papel filtro após secagem na estufa.



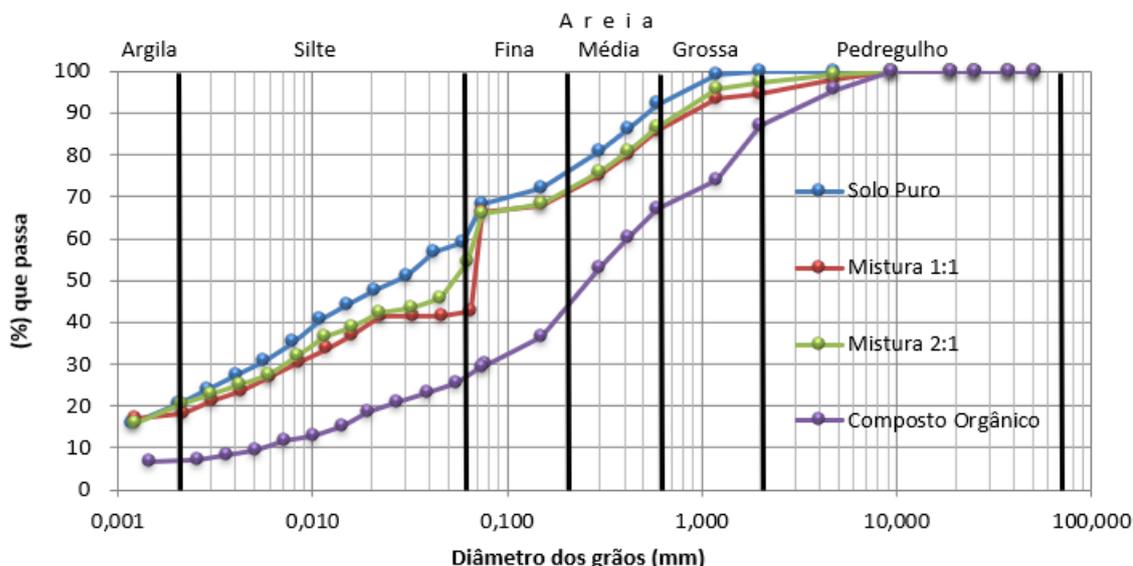
- Para a determinação da sucção foram utilizadas as equações propostas por Chandler e outros. (1986) e todo o processo foi repetido até que a amostra apresentasse uma umidade próxima a residual. Todo o ensaio teve duração de 16 semanas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização física

A Figura 4 apresenta a curva granulométrica do solo puro em conjunto com o composto e as misturas nas proporções 1:1 e 2:1 de solo composto

Figura 4 - Ensaio de granulometria com misturas nas proporções 1:1 e 2:1



De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o solo puro é classificado como silte arenoso (ML) de baixa compressibilidade. Os valores dos limites de plasticidade, liquidez, densidade dos grãos e percentagens da caracterização dos tipos de solo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização do solo puro, composto e misturas nas proporções 1:1 e 2:1

Material	Solo Puro	Composto Orgânico	Mistura proporçã	Mistura proporçã	
			o 1:1	o 2:1	
Granulometria (%)	Argila	21	8	19	20
	Silte	38	19	24	35
	Areia Fina	13	18	26	16
	Areia Média	17	24	8	15
	Areia Grossa	11	20	18	12
	Pedregulho	0	11	5	2
Índice de Consistência (%)	LL	50	-	44	43
	LP	33	-	34	30
	IP	17	-	10	13
Densidade real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,72	2,18	2,54	2,58	

Legenda: LL: Limite de liquidez – LP: Limite de Plasticidade – IP: Índice de Plasticidade

Analisando a Tabela 2 é possível constatar que o valor de argila presente no solo puro é em torno de 21%, enquanto que na mistura de proporção 1:1 é de 19%, o que afirma que ao ser colocado uma parcela de composto não há uma diferença significativa no teor de argila, mas quando se verifica a percentagem de silte, constata-se que o teor de composto adicionado faz com que haja uma redução de 16% dos índices de materiais finos, e uma variação dos percentuais da fração grossa do solo, notadamente um aumento nos percentuais de areia fina e pedregulho. A mistura na proporção de 1:1 pode ser classificada como uma Areia Fina Siltosa (SM).

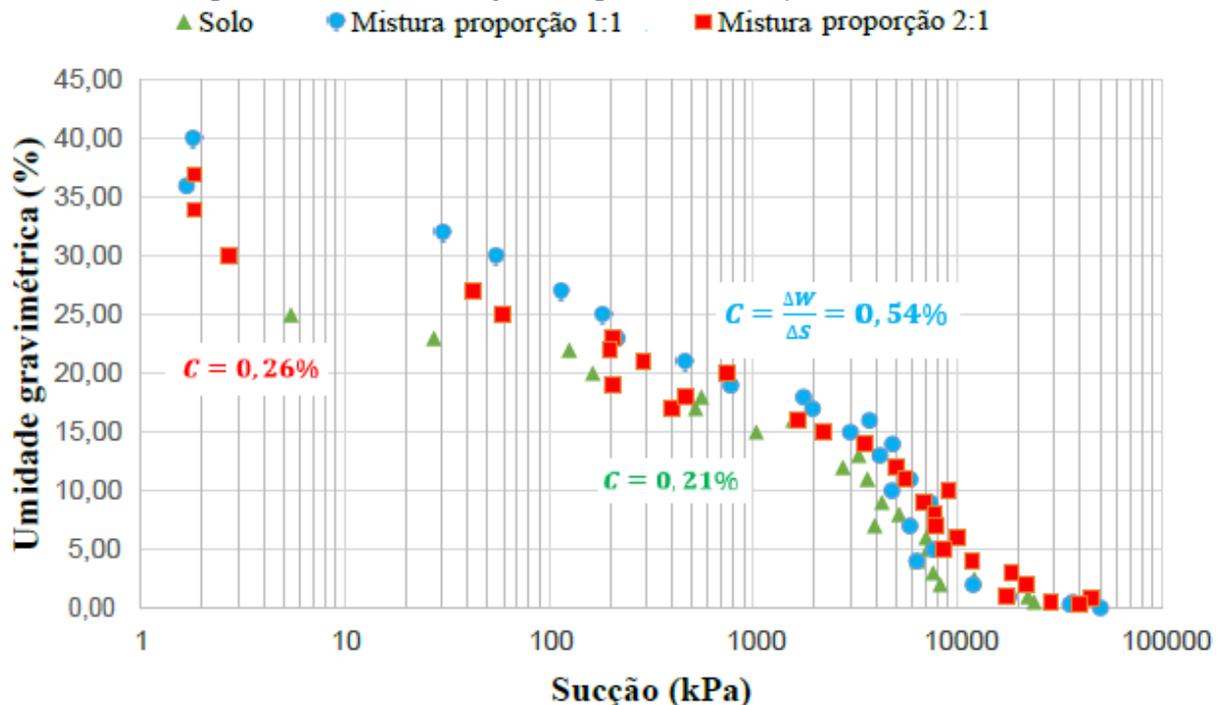
Em relação aos resultados dos índices de consistência, a fração fina da mistura de proporção 1:1 apresentou índice de plasticidade de 10%, caracterizando assim como um solo medianamente plástico, enquanto que o solo puro apresentou um índice de plasticidade de 17%, que o enquadra como um solo plástico. Como o composto orgânico não tem características coesivas o mesmo não apresentou valores para os limites de liquidez e plasticidade. Quanto a densidade real dos grãos, a utilização de composto na mistura fez com que houvesse uma redução de 2,72 para 2,54 g/cm<sup>3</sup>.

Em relação a mistura de proporção 2:1, é possível constatar que a percentagem de material fino do solo puro é de 59% enquanto que a da mistura na proporção 2:1 é de 55%, o que confirma que a introdução de composto na mistura não altera significativamente a granulometria deste material e o tanto o solo quanto a mistura de proporção 2:1 podem ser classificados como um silte de baixa plasticidade (SL). Quanto aos resultados obtidos para o índice de consistência, foi verificado que a mistura de proporção 2:1 apresentou índice de plasticidade de 13%, o que a caracteriza como um solo medianamente plástico. Em relação a densidade real dos grãos, o acréscimo de composto orgânico fez com que tivesse uma redução de 2,72 para 2,58 g/cm<sup>3</sup>, que foi uma redução um pouco menor quando comparada com a mistura 1:1.

#### 4.2 Curvas Características

A representação da variação de sucção no solo devido a mudanças na umidade é denominada como curva característica. A quantidade de água presente nos vazios do solo foi representada pelo teor de umidade gravimétrica e as curvas características serão retratadas pela relação da sucção e do seu respectivo grau de saturação.

Figura 5: Curvas de retenção de água do material puro e Misturas 1:1 e 2:1



Segundo a relação entre variação de umidade e sucção ( $C = \Delta w / \Delta S$ ), foi verificado que a mistura com proporção 1:1 apresentou maior capacidade diferencial de umidade que as outras amostras como solo puro e mistura na proporção 2:1. Inicialmente, para o solo foi observado uma umidade gravimétrica máxima de 25%, tendo uma diferença na ordem de 12% para a mistura 2:1 e de 15% para a mistura 1:1. Pelo gráfico é possível observar que a curva apresenta uma inclinação suave até a sucção de 1000kPa para solo, de aproximadamente 1700kPa para a mistura 2:1 e 2000kPa para a mistura 1:1, e posteriormente há uma atenuação da inclinação, sendo estes os valores de sucção os pontos de entrada de ar. Devido a capacidade de retenção de água do composto orgânico, as misturas apresentaram valores de umidade superiores ao solo e as suas curvas apresentaram uma inclinação mais acentuada na fase mais úmida e uma inclinação mais suave na fase mais seca.

Em relação ao solo, é observado que o mesmo apresentou uma inclinação mais suave na fase mais úmida e uma inclinação mais acentuada na fase seca. Tal comportamento também foi verificado em Santos (2015) e Costa (2015). Ainda em relação as misturas, tanto a mistura 1:1 como a mistura 2:1 apresentam valores de entrada de sucção, que é o ponto ao longo da curva de secagem que o gradiente de saturação é alterado, bastante reduzidas quando comparadas com o solo, indicando desta maneira uma zona de efeito capilar reduzida, mesmo que ambas as misturas apresentem umidade de saturação bastante elevada em relação ao solo. Devido a capacidade de retenção de água que o composto garante a mistura, a sua utilização se torna eficaz em camadas de cobertura de aterros sanitários, pois esta característica garante uma menor produção de lixiviado e de emissão de biogás para a atmosfera (OLIVEIRA, 2013).

## 5. CONCLUSÃO

As análises feitas permitem aferir positivamente sobre a capacidade geotécnica que ambas as misturas podem proporcionar sob a condição de camadas de cobertura de aterro sanitário. Com relação à granulometria, ambas as misturas tiveram pequeno aumento na proporção de granulometria mais grossa, com o acréscimo do silte relativo ao material compostado, reduzindo também a plasticidade do material com o acréscimo do composto nas proporções, o que poderia acarretar possível preocupação com relação à permeabilidade do material aos gases de aterro. Esse acréscimo de composto orgânico também aumentou a capacidades de retenção dos materiais, uma vez que o composto orgânico possui uma composição de materiais leves e fibras (resíduos de podas de árvores e jardinagens) e maior teor de umidade, ajudando no aumento de retenção de água quando misturado com os solos de acordo com as curvas características. Daí, isso pode minimizar as fissuras das camadas de cobertura perante ciclos de umedecimento e secagem do ambiente.

Dessa forma, o material estudado se mostra potencialmente adequado ao uso em camadas de cobertura oxidativas para aterros sanitários, mostrando-se uma alternativa viável para implantação destes por municípios de menor porte e capacidade aquisitiva, reduzindo eficazmente a necessidade do uso de materiais argilosos (nem sempre adequados ao clima, apresentando fissuras, e de possível difícil aquisição), sem detrimento da segurança de operação e uso posterior da localidade do aterro, impulsionando assim estudos futuros da ordem de permeabilidade e aplicabilidade prática em células experimentais.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984) NBR 6.459/84 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, RJ.
- \_\_\_\_\_ (1984) NBR 6.508/84 – Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica dos grãos. Rio de Janeiro, RJ.
- \_\_\_\_\_ (1984) NBR 7.180/84 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, RJ.

\_\_\_\_\_ (1986a) NBR 6.457/86 – Amostra de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, RJ.

\_\_\_\_\_ (1988) NBR 7.181/88 – Análise granulométrica para solos, com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material. Rio de Janeiro, RJ

ASTM, D5084-10. 2010. Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. American Society for Testing and Materials. Volume 04.08. Soil and Rock (I): D420 - D5876.

COSTA, M. D. Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos. Recife. 2015. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco.

CHANDLER, R. J. & GUTIERREZ, C. I. The filter-paper method of suction measurement. Geotechnique. 1986. vol. 36, nº 2 – pp 265-268.

COSTA, M. D. Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

HRAD, M., HUMER, M., WIMMER, B. REICHENAUER, T.G. Design of top covers supporting aerobic in situ stabilization of old landfill – An experimental simulation in lysimeters. Waste Management, 2012, v. 32. 2324-2335.

OLIVEIRA, L. R. G. Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos Tese de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

ROSE, J. L. Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camada oxidativas experimentais. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009. 166p.

SANTOS, G.M. Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.