

**ESTUDO DA CAMADA DE COBERTURA DE UM ATERRO SANITÁRIO
ENCERRADO: CASO DA CÉLULA EXPERIMENTAL DELTA A, CAMPINAS
- SP**

Dalva Patti Toledo Mafort ¹; Ana Elisa Silva de Abreu² Miriam Gonçalves Miguel³

Resumo – A compreensão do comportamento da camada de cobertura de um aterro sanitário é essencial, uma vez que essa estrutura atua na contenção da liberação de gases tóxicos para a atmosfera e na prevenção da infiltração de águas pluviais, contribuindo diretamente para o controle ambiental do sistema de disposição de resíduos. No aterro sanitário Delta A, em Campinas (SP), foi construída em 2012 uma célula experimental com características representativas do aterro real, visando investigar o desempenho da cobertura final. Esta pesquisa realizou a caracterização geotécnica da camada de cobertura dessa célula, composta por 60 cm de solo silte-areno-argiloso classificado como argila inorgânica de baixa plasticidade (CL), com presença de montmorilonita — um argilomineral expansivo. Os ensaios laboratoriais indicaram comportamento típico de solos argilosos, provavelmente devido à presença de montmorilonita, com baixa condutividade hidráulica e significativa capacidade de retenção de água. Apesar de sua eficiência em minimizar a infiltração de água, o solo apresentou trincas em condições de seca, comprometendo sua capacidade de retenção de gases. Assim, embora promissor quanto à impermeabilidade, o solo com montmorilonita não se mostrou ideal como cobertura final de aterros sanitários devido à instabilidade volumétrica associada à sua expansão e contração.

Abstract – Understanding the behavior of the cover of a sanitary landfill is essential, as this structure plays a key role in containing the release of toxic gases into the atmosphere and preventing the infiltration of rainwater, directly contributing to the environmental control of the waste disposal system. At the Delta A Sanitary Landfill, in Campinas (SP), an experimental cell was built in 2012 with features representative of the actual landfill, aiming to investigate the performance of the final cover. This research carried out the geotechnical characterization of the cover layer of this cell, which consists of 60 cm of silty-sandy-clayey soil classified as low-plasticity inorganic clay (CL), with the presence of montmorillonite—an expansive clay mineral. Laboratory tests indicated typical behavior of clayey soils, likely due to the presence of montmorillonite, with low hydraulic conductivity and significant water retention capacity. Despite its efficiency in minimizing water infiltration, the soil developed cracks under dry conditions, compromising its gas retention capacity. Therefore, although promising in terms of impermeability, the montmorillonite-rich soil proved not to be ideal as a final cover for sanitary landfills due to the volumetric instability associated with its expansion and shrinkage.

Palavras-Chave – camada de cobertura, ensaios geotécnicos, célula experimental e aterro sanitário encerrado.

¹ Geól., MSc, Universidade Estadual de Campinas, 22 981101445 dalvamafort.geo@gmail.com

² Geól., PhD, Universidade Estadual de Campinas, aeabreu@unicamp.br

³ Eng. PhD, Universidade Estadual de Campinas, migmiguel@fec.unicamp.br

1. INTRODUÇÃO

A gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma das principais demandas ambientais das cidades contemporâneas. Os aterros sanitários, embora mais seguros que os antigos lixões, ainda representam fontes potenciais de poluição, especialmente por meio da liberação de gases e da geração de lixiviados, que podem contaminar o solo, os corpos d'água e até a atmosfera. A camada de cobertura final desses aterros desempenha papel crucial na mitigação desses impactos, ao reduzir a infiltração de água e controlar as emissões gasosas.

A cobertura final deve ser composta por solos de baixa permeabilidade, preferencialmente argilosos, compactados e com espessura mínima de 60 cm, conforme recomendado por órgãos como a CETESB (2013) e a SNSA (2008). Essa barreira atua como selo físico-químico que isola os resíduos depositados da atmosfera, dificultando o trânsito de líquidos e gases entre o aterro e o meio externo. Além disso, ela contribui para a estabilidade estrutural do maciço e pode receber vegetação, promovendo integração paisagística e funcionalidade ambiental.

O desempenho dessa camada depende diretamente das propriedades geotécnicas do solo utilizado, as quais incluem sua permeabilidade, plasticidade, estrutura porosa e mineralogia. Em especial, a presença de argilominerais expansivos como a montmorilonita pode alterar significativamente o comportamento hidráulico e mecânico do solo, tornando sua análise ainda mais relevante.

Neste contexto, o presente estudo visa à caracterização geotécnica da camada de cobertura final da célula experimental construída no aterro Delta A, localizado no município de Campinas (SP). Esta célula representa, em escala reduzida e controlada, as condições reais do aterro, permitindo uma avaliação mais precisa da eficácia do solo utilizado como barreira de cobertura. A investigação concentra-se na análise granulométrica, nos limites de consistência, na mineralogia da fração argila, na condutividade hidráulica e na curva de retenção de água, além da observação de campo do comportamento físico do solo frente às variações sazonais de umidade.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

2.1. Camada de cobertura da célula experimental Delta A

A célula experimental Delta A está localizada no município de Campinas, estado de São Paulo e está situada na parte superior de um maciço de resíduos já depositados, que totaliza uma área de 5080 m² (Leme e Miguel, 2014).

A camada de cobertura final é composta por solo compactado, onde acima desta, foi inserida uma camada de solo vegetal onde ocorreu o plantio de grama. Benatti *et al.* (2013) descrevem a implantação desta célula experimental em 2012. A Figura 1 apresenta a localização da área.

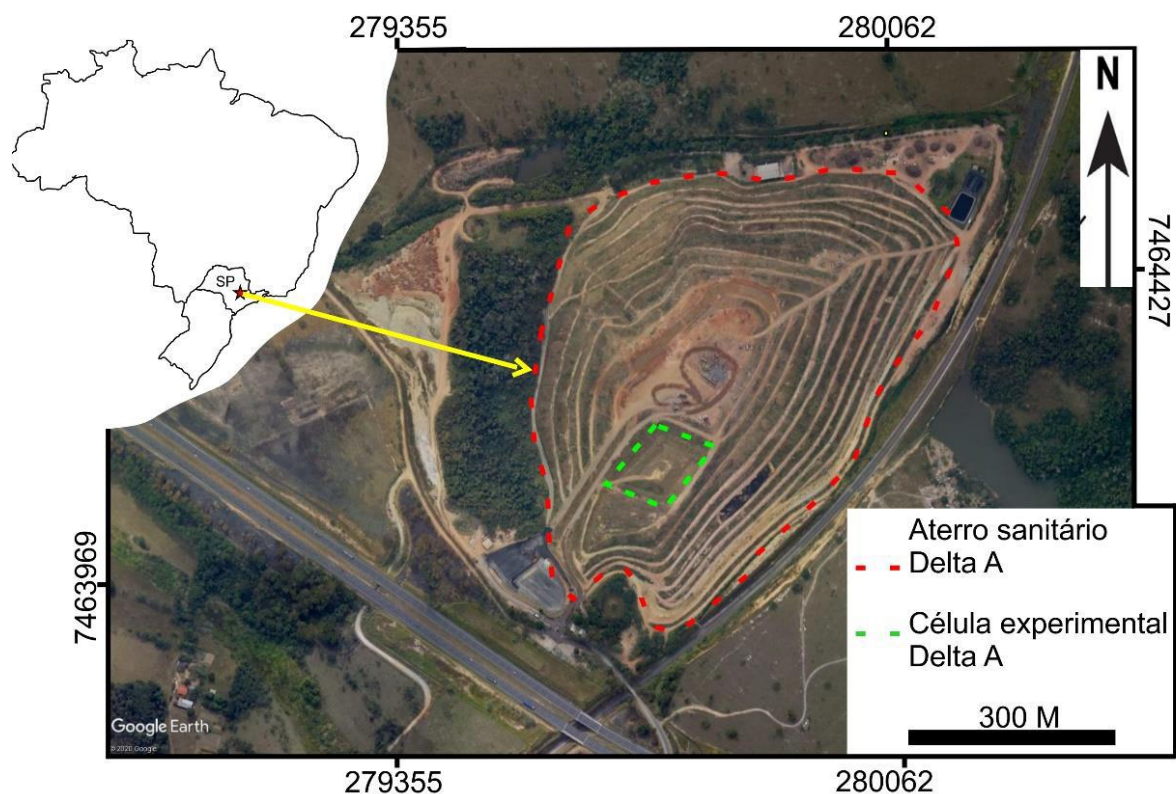


Figura 1. Célula Experimental, Aterro Delta A. **Fonte:** Própria Autora.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram coletadas duas amostras deformadas, M15 e M27, da cobertura de solo compactado da célula experimental, por meio de trado de diâmetro 10 cm, em posições opostas do aterro.

As duas amostras de solo foram submetidas aos seguintes ensaios de caracterização geotécnica: massa específica dos sólidos, obtendo parâmetros de massa específica natural, segundo a NBR 6458 (ABNT, 2016b) e massa específica seca, de acordo com NBR 6457 (ABNT, 2024), granulometria conjunta com e sem defloculante na fase de sedimentação, acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016b), limite de liquidez, de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2016c) e limite de plasticidade, segundo a NBR 7180 (ABNT, 2016d).

Ensaio de difração de raios-X também foram realizados utilizando o equipamento Difrátômetro de marca SIEMENS e modelo D5000. Foram realizados os ensaios de pó total e de amostra orientada, para determinação da mineralogia da fração argila.

Posteriormente, duas amostras indeformadas, em cilindro com parede de plástico rígido biselado, de aproximadamente 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, foram coletadas para ensaios de permeabilidade a carga variável, seguindo a norma NBR 14545 (ABNT, 2000). Para esse ensaio, uma amostra de dimensões 7,0 cm de diâmetro e 4 cm de altura foi montada no permeâmetro e submetida a uma diferença de carga hidráulica de 49 cm, para obtenção da condutividade hidráulica. E para realização dos ensaios da curva de retenção à água pelo método do papel filtro para as trajetórias de umedecimento e secagem à água destilada, seguindo a norma D5298-03 (ASTM, 2003).

Para os ensaios da curva de retenção, os procedimentos foram fundamentados basicamente por Marinho (1995). Entretanto, nessa pesquisa, optou-se por começar o ensaio com condições extremas de umidade, para poder observar o fenômeno de histerese (Bonder, 2008). Os corpos de prova foram moldados, a partir das amostras indeformadas, dentro de seis anéis metálicos de altura e diâmetros médios de 2,1 e 4,9 cm, respectivamente. Estes corpos de prova foram

preparados em triplicata, sendo três anéis (nº 1, 2 e 3) para a curva com trajetória de secagem e três anéis (nº 4,5 e 6) para curva com trajetória de umedecimento. Os ensaios foram realizados em uma sala com temperatura controlada de 20°C localizada no Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências da UNICAMP. A descrição completa da metodologia é apresentada em Mafort (2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 expõe os índices físicos determinados para o solo da camada de cobertura. A Tabela 2 apresenta os valores das frações granulométricas dos solos, com e sem o uso de defloculante, a fim de facilitar a comparação entre eles.

Tabela 1 Índices físicos da camada de cobertura final.

Índice	Valor
Porosidade (%)	42
Índice de vazios – e	0,73
Massa específica natural - γ (g/cm ³)	1,842
Massa específica dos sólidos - γ_s (g/cm ³)	2,772
Massa específica seca - γ_d (g/cm ³)	1,600

Tabela 2. Porcentagens em peso das frações granulométricas dos solos, com o uso de defloculante (CD) e sem o uso de defloculante (SD).

Fração	M15 (0-1cm)		M15 (15-30cm)		M15 (30-48cm)		M27 (0-3cm)		M27 (3-28cm)		M27 (28-58cm)	
	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD
Argila D < 0,002 mm	0	27	0	27	0	17	0	25	0	19	0	19
Silte 0,002 ≤ D < 0,06 mm	55	39	63	46	65	48	50	47	51	53	60	46
Areia 0,06 ≤ D < 2 mm	45	34	37	28	35	35	50	27	47	28	40	35
Classificação o Textural	SA	SAA	SA	SAA	SA	SAA	SA	SAA	AS	SAA	SA	SAA

SAA = silte areno-argiloso; SA = silte arenoso; AS = areia siltosa

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização geotécnica demonstraram que o solo da camada de cobertura apresenta predominância da fração silte, com variações menores nas frações de argila e areia. A classificação textural oscilou entre silte arenoso (sem defloculante) e silte areno-argiloso (com defloculante), evidenciando o efeito da dispersão na identificação da fração argilosa. A presença de argila é capaz de promover baixa condutividade hidráulica, o que é fundamental para um sistema de cobertura de aterros sanitários, porém espera-se normalmente que os ensaios sem defloculante reflitam melhor as condições de condutividade hidráulica de campo, do que os ensaios com defloculante.

Os valores obtidos dos Limites de Liquidez (LL), Limites de Plasticidade (LP) e Índices de Plasticidade (IP) para as amostras do solo da camada de cobertura estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores dos limites de consistência das amostras de solo M15 e M27.

	M15	M27
LL (%)	37	32
LP (%)	21	18
IP	16	14

Os dados de LL, LP e IP juntamente com a análise granulométrica (Tabela 1), possibilitaram a classificação das amostras de solo pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), conforme Figura 2.

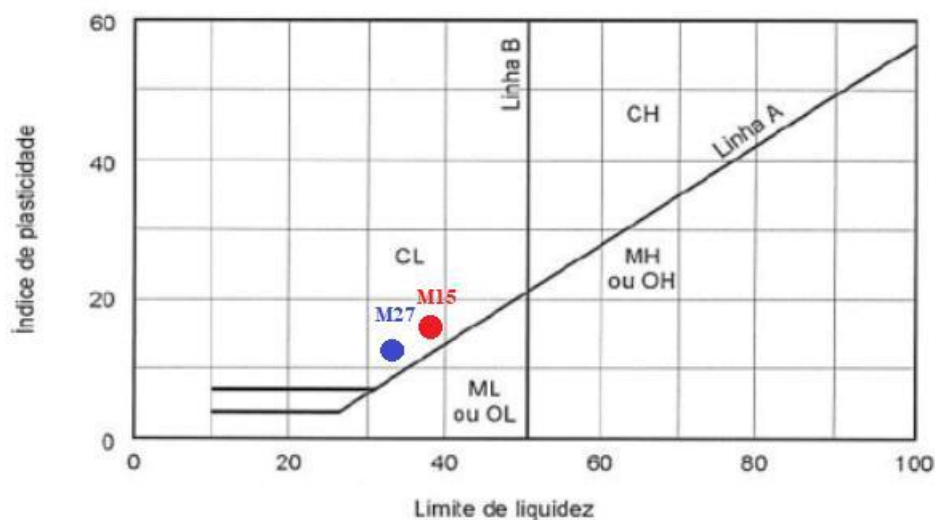


Figura 2. Carta de Plasticidade do Sistema Unificado de Classificação dos Solos e a classificação das amostras de solo M15 e M27.

Ambas as amostras foram classificadas no SUCS como sendo argila inorgânica de baixa plasticidade ou argila inorgânica de baixa compressibilidade (CL). A classificação do solo (CL) segue a recomendação da CETESB (1993). Segundo Araújo (2017), um solo classificado como CL pode apresentar características de baixa permeabilidade à água quando compactado, tornando-se uma boa opção para camada de cobertura de um aterro.

Para a determinação da mineralogia da fração argila, o resultado do ensaio de amostra orientada pode ser observado na Tabela 4. A montmorilonita apresenta alta capacidade de troca catiônica e expansibilidade, o que contribui para a redução da condutividade hidráulica. Nota-se

que quando a amostra fica sujeita a solvatação pelo etileno-glicol ou pelo aquecimento, ocorre o colapso da estrutura da montmorilonita. Esse colapso é o resultado do enfraquecimento das interações entre as camadas da montmorilonita, que pode ocorrer por vários fatores, como a expansão excessiva das camadas ou a perda de água entre elas, levando a diminuição do volume da estrutura.

Tabela 4. Resultado do ensaio de DRX pelo método de amostras orientadas, tratadas com etileno-glicol e com aquecimento.

Intensidade	M15	M27
1º	Quartzo	Quartzo
2º	Caulinita	Caulinita
3º	Montmorilonita	Ilita
4º	Haloisita	Haloisita
5º	Muscovita	Montmorilonita

As frações finas, silte e argila, são o interesse desse estudo já que por serem mais ativas quimicamente, possuem potencial de reter parte da água infiltrada, reduzindo assim, a formação de lixiviados. A presença do argilomineral expansivo Montmorilonita é conveniente para a camada de cobertura final de um aterro sanitário, já que pela absorção de água o mineral aumenta seu volume, selando trincas e outros caminhos preferenciais de fluxo, dificultando a passagem de líquido para o interior do aterro.

No ensaio utilizando o permeâmetro, a amostra não ficou saturada, o que impossibilitou a realização do ensaio. Este fato sugere que a condutividade hidráulica dos solos da camada de cobertura da célula experimental é inferior aos 10^{-8} m/s, ordem de grandeza da leitura máxima de condutividade hidráulica que este permeâmetro possibilita. Este resultado não era esperado, considerando-se que a fração predominante na amostra é de silte. A explicação para isso é a presença de argilominerais expansivos, que reagem à entrada de água, tornando o solo menos permeável.

Para as curvas de retenção à água, por trajetória secagem ou umedecimento, o gráfico apresentado será apresentado em função dos teores de umidade gravimétrica (%), como pode ser observado na Figura 4.

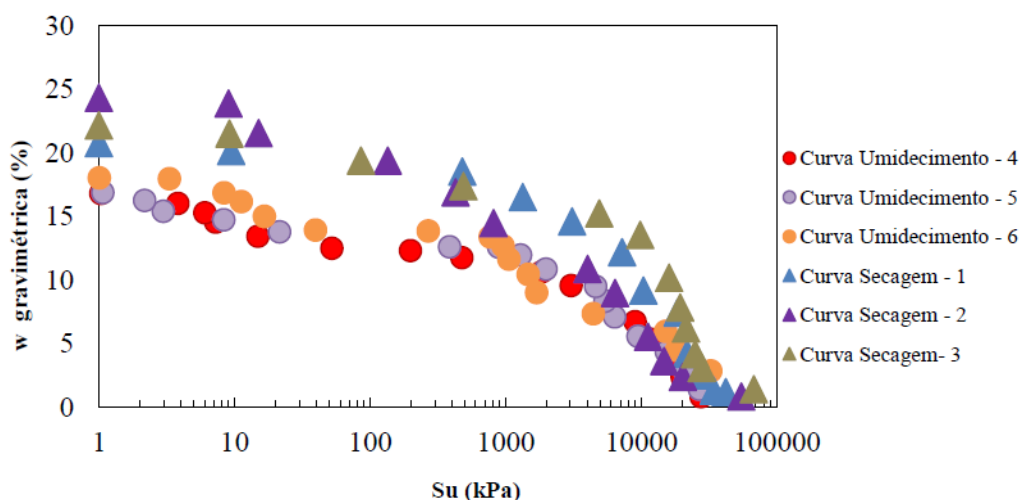


Figura 4. Curva de retenção à água por trajetória de secagem e por umedecimento.

De acordo com a Figura 4, observa-se que as curvas dos 3 corpos de prova de cada trajetória são semelhantes, o que gera a confiança nos resultados do ensaio. As pequenas diferenças refletem a variabilidade da estrutura dos solos ensaiados. É possível observar o fenômeno da histerese, onde as trajetórias de secagem e de umedecimento possuem maior diferença entre as 1 a 9.000 kPa (macroporosidade) e menor diferença a partir de 10.000 kPa. Essa característica confirma o comportamento não linear do solo, indicando que a retenção de água é afetada pela história de saturação. Ainda assim, os altos teores de umidade retida sugerem que o solo possui microporosidade significativa, reforçando seu potencial como barreira hidráulica.

Ao analisar o gráfico pode-se notar que embora o solo tenha sido caracterizado no ensaio granulométrico com defloculante, como silte areno-argiloso, as curvas de retenção têm comportamento de solo argiloso, provavelmente devido a presença de argilominerais expansivos e pela compactação do solo durante a sua implantação, o que diminui os macro poros e atenua a curvatura.

Verificou-se em campo, que a aparência da camada de cobertura era diferente durante épocas de seca e de chuvas. Na seca, o solo apresentava-se com superfície craquelada (Figura 5 A) e em épocas chuvosas o solo voltava para sua condição normal, sem trincas. As amostras indeformadas em anéis cilíndricos de alumínio, exibiram comportamento similar quando a amostra foi seca ao ar (Figura 5 B). Tais fatos podem ser explicados pela presença da montmorilonita, que foi detectada nos ensaios de DRX e revelam a grande capacidade de cicatrização.

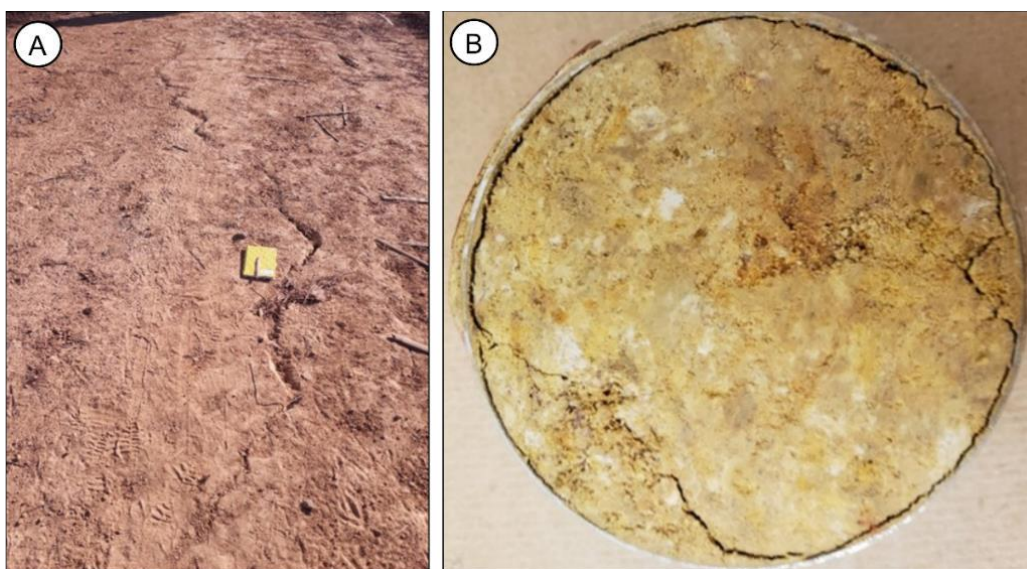


Figura 6. Trincas que surgem no solo da camada de cobertura final quando seco. **Fonte:** Própria Autora.

A retração volumétrica do solo em períodos de estiagem compromete sua integridade estrutural. As trincas observadas em campo e em laboratório durante a secagem das amostras indicam a formação de caminhos preferenciais para o fluxo de gases. Embora a montmorilonita apresente uma “capacidade de cicatrização” ao se reidratar, esse comportamento não é suficiente para garantir vedação contínua, especialmente em ciclos de umedecimento e secagem frequentes, como os observados em condições tropicais. Dessa forma, embora o solo seja eficiente contra a percolação de água, sua instabilidade volumétrica compromete seu uso como cobertura final ideal para aterros sanitários encerrados.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou resultados da caracterização geotécnica da camada de cobertura final da Célula Experimental construída no aterro sanitário Delta A, situada em Campinas – SP.

Os resultados laboratoriais indicaram que o solo é um silte areno-argiloso, classificado como argila inorgânica de baixa plasticidade (CL), com presença marcante de montmorilonita. Essa composição conferiu ao material uma baixa condutividade hidráulica, inferior a 10^{-8} m/s, atendendo aos requisitos técnicos para controle da infiltração de água pluvial. As curvas de retenção de água revelaram elevada capacidade de armazenamento hídrico, com comportamento típico de solos compactados contendo argilominerais expansivos.

No entanto, a análise de campo apontou que, em períodos de estiagem, o solo sofre retração e fissuração superficial, comprometendo sua integridade como barreira à emissão de gases. Esse comportamento é diretamente associado à presença da montmorilonita, que, embora benéfica para o desempenho hidráulico, confere ao solo instabilidade volumétrica significativa.

Dessa forma, conclui-se que:

- O solo avaliado é tecnicamente viável para o controle de infiltrações, cumprindo adequadamente sua função hidráulica;
- Sua performance como barreira gasosa é limitada, devido à formação de trincas em condições de seca;
- A presença de montmorilonita, embora contribua para a impermeabilidade, compromete a estabilidade estrutural da camada de cobertura;
- É recomendável o uso de soluções complementares, como misturas estabilizadas (com cimento ou polímeros), adição de solos não expansivos ou construção de sistemas multicamadas, para garantir o desempenho simultâneo nas funções de vedação líquida e gasosa;
- Estudos de monitoramento em longo prazo e avaliações em diferentes períodos sazonais são essenciais para a validação do desempenho real da camada de cobertura em campo.

Essas conclusões reforçam a importância de uma análise integrada entre propriedades geotécnicas, comportamento hidromecânico e desempenho ambiental, especialmente em solos com presença de argilominerais expansivos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas pelo suporte oferecido.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14545: Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos à Carga Variável (Método de Ensaio). Rio de Janeiro. 2000.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6502: Rochas e Solos. Rio de Janeiro. 1995.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6458: Determinação da Massa Específica dos Grãos. Rio de Janeiro. 2016a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro. 2016c.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro. 2016d.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro. 2016e.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS -. D5298-03: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. Philadelphia, 2003. 6p.

ARAUJO, P.S (2017) Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

BENATTI, J. C. B.; Leme, M.A.G.; Miguel, M.G. (2013). Concepção, projeto e construção de célula experimental de grandes dimensões para estudo de recalques em aterros sanitários. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e V Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos. Anais.Porto de Galinhas: ABMS.

BONDER, B.H. (2008). Curvas de Retenção de Água de um Solo Coluvionar de Campinas Obtidas Mediante técnicas de Laboratório e de Campo. Dissertação de mestrado da Faculdade de Eng. Civil, área de geotecnia da UNICAMP.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (1993). Resíduos Sólidos Industriais. 2. ed. São Paulo.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2013). Aterro Sanitário – Definições. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em: 09 Jan. 2012.

LEME, M.A.G. (2013). Caracterização de solo utilizado no sistema de barreira impermeabilizante de base de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos. Tese.

MAFORT, D.P. (2020). Aplicação do modelo tridimensional ao balanço hídrico de um aterro sanitário encerrado: Caso da célula experimental Delta A, Campinas – SP. Tese.

SÃO MATEUS, M.S.C (2008). Proposta de modelo para avaliação do balanço hídrico de aterros de resíduos sólidos urbanos: Estudo de caso do aterro metropolitano centro de Salvador. Tese. Programa de Pós-graduação de Engenharia.Universidade Federal do Rio de Janeiro. 9–90.

SNSA, Secretaria Nacional de Saneamento Básico (2008). Resíduos sólidos: Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários – guia do profissional em treinamento: nível 2. Belo Horizonte: ReCESA, 2008. 112 p. Disponível em: <<http://www.nurene.com.br/resid>