

## Percolação de Lixiviado de Diferentes Aterros Sanitários em Camadas de Base de Solo Compactado

Esther Almeida Lima

Graduação em Engenharia Civil, UFCG, Campina Grande-PB, Brasil, esther.almeida@estudante.ufcg.edu.br

Thiago Fernandes da Silva

Professor de Magistério Superior, UFC, Crateús - CE, Brasil, engthiagofernandes1989@gmail.com

Daniela Lima Machado da Silva

Professora de Magistério Superior, UFC, Russas-CE, Brasil, danielalms@ufc.br

Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Professora de Magistério Superior, UFCG, Campina Grande-PB, Brasil, veruschkamonteiro@hotmail.com

**RESUMO:** Camadas de base em aterros sanitários (CCL) são projetadas para evitar a contaminação do meio ambiente. A regulamentação exige o dimensionamento baseado na permeabilidade à água, que tem características distintas do lixiviado de aterros. O objetivo deste estudo foi compreender os fenômenos envolvidos na interação solo-contaminante que afetam a permeabilidade em CCL de diferentes aterros sanitários. Foram coletados Solo Local (SL) e Bentonita (B) em aterro no município de Campina Grande (Paraíba). Estes solos foram misturados até a proporção de 80% de SL e 20% de B e ensaios de caracterização geotécnica foram conduzidos. Também foram coletados lixiviado dos aterros de Campina Grande e Sousa, que passaram por ensaios de caracterização físico-química. Foram moldados corpos de prova e realizados ensaios de permeabilidade à água e ao lixiviado. Observou-se que a quantidade de bentonita presente exerce uma influência significativa sobre a permeabilidade com todos os fluidos. As amostras ensaiadas com lixiviado apresentaram maiores coeficientes de permeabilidade. Entende-se que o fluido contaminante pode ter provocado a floculação das partículas, minimizado a expansão dos argilominerais e reduzido a espessura da camada dupla difusa das partículas. Como consequência, tem-se um aumento da permeabilidade. As amostras de solo com 20% de bentonita são mais indicadas para a impermeabilização, atendendo as normas nacionais e internacionais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aterro sanitário, Camada de solo compactado, Permeabilidade ao lixiviado.

**ABSTRACT:** Compacted Clay Liners (CCL) are designed to prevent contamination of the environment. Regulation requires sizing based on water permeability, which has different characteristics than landfill leachate. The objective of this study was to understand the phenomena involved in the soil-contaminant interaction that affect the permeability in CCL of different landfills. Local Soil (SL) and Bentonite (B) were collected from a landfill in the municipality of Campina Grande (Paraíba). These soils were mixed to a proportion of 80% SL and 20% B and geotechnical characterization tests were conducted. Leachate was also collected from the Campina Grande and Sousa landfills, which underwent physical-chemical characterization tests. Test specimens were molded and water and leachate permeability tests were carried out. It was observed that the amount of bentonite present exerts a significant influence on the permeability with all fluids. Samples tested with leachate showed higher permeability coefficients. It is understood that the contaminating fluid may have caused flocculation of the particles, minimized the expansion of clay minerals and reduced the thickness of the diffuse double layer of the particles. As a consequence, there is an increase in permeability. Soil samples with 20% bentonite are best suited for waterproofing, meeting national and international standards.

**KEYWORDS:** Landfill, Compacted Soil Liner, Leachate Permeability.

## 1 INTRODUÇÃO

Aterros sanitários são a forma mais utilizada para disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) em todo o mundo. Estes empreendimentos necessitam de elementos de vedação, como as camadas de revestimento de base, que garantam estanqueidade estrutural, impedindo o fluxo do líquidos contaminantes para o meio ambiente externo à célula sanitária.

Geralmente, a maioria das normas técnicas exigem que o coeficiente de permeabilidade à água para as camadas de base desses aterros seja da ordem de  $10^{-9}$  m/s (USEPA, 1993). Para se alcançar tal permeabilidade, muitas vezes são incrementados solos expansivos, como a bentonita, ao solo da própria localidade (Komine, 2004).

No entanto, esse coeficiente de permeabilidade à água não corresponde à situação real de campo, onde o fluido percolante é o lixiviado (percolado). Este fluido contaminante apresenta elevadas concentrações de matéria orgânica, compostos inorgânicos, metais pesados, substâncias xenobióticas e uma diversidade de microrganismos. Além do mais, as características bio-físico-químicas do lixiviado proveniente de aterros sanitários são amplamente distintas, a depender da composição gravimétrica, do clima local, do método de disposição e operação do aterro, da idade dos resíduos, entre outros aspectos (Ogundiran e Afolabi, 2008).

Então, o estudo da interação do solo com o lixiviado, que infiltra nas camadas de impermeabilização, representa um problema complexo. As interações ocorridas entre o percolado e a camada de base de aterros são devidas às forças osmóticas, causadas por diferenças de concentração de íons ou sais, através de uma membrana, bem como ligações iônicas, covalentes e de outras naturezas químicas. Essa interação pode causar desidratação, dissolução de certos componentes e maior fragilidade da estrutura (Sarsby, 2013). Tais manifestações tem como consequência fissurações no solo, permitindo a ocorrência de caminhos preferenciais de fluxo, e posterior migração do líquido contaminante para o subsolo (Middeloff *et al.*, 2020).

A compreensão de como esses líquidos afetam o comportamento das camadas de solo passa pelo estudo das propriedades físico-químicas desses materiais e pelo entendimento da interação entre o fluido com as partículas de solo. Estudos como de Gupt *et al.* (2021) têm sido desenvolvidas no sentido de investigar essa interação entre diferentes fluidos percolantes em meios porosos. Estes estudos apontam que a polarização das partículas do fluido, processos de adsorção e espessura da camada dupla difusa em partículas de solo apresentam significativa influência no comportamento da permeabilidade das camadas de solo.

Então, esta pesquisa tem como objetivo compreender os fenômenos envolvidos na interação solo-contaminante que afetam a permeabilidade à água e ao lixiviado em camadas de base de solo compactado de diferentes aterros sanitários. Tais medidas visam garantir a segurança ambiental nessas camadas e possibilitar ganhos de vida útil nos empreendimentos de disposição de resíduos sólidos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Coleta e caracterização dos solos

Neste estudo, dois tipos de solos são usados: um material arenoso e uma bentonita. A areia foi obtida de jazidas de um aterro sanitário localizado na cidade de Campina Grande (PB). A bentonita foi extraída de jazidas no município de Boa Vista (PB). Esses solos foram coletados e levados em sacos plásticos para o Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Em seguida, foram realizados os processos de secagem, destorroamento e quarteamento para obtenção de amostras representativas, conforme recomendações da NBR 6457/2016.

Com essas amostras foram realizados os seguintes ensaios de caracterização geotécnica: Limite de liquidez (LL) - NBR 6459/2016, Limite de plasticidade (LP) - NBR 7180/2016, Massa específica dos grãos - NBR 6458/2016, Análise granulométrica - NBR 7181/2016 e Compactação - NBR 7182/2016. As amostras ensaiadas foram identificadas como Solo Local (SL) e Bentonita (B).

### 2.2 Coleta e caracterização do lixiviado

O lixiviado foi coletado nas lagoas de estabilização e tratamento de aterros sanitários localizados nos municípios de Campina Grande (ASCG) e Sousa (ASS). As amostras foram armazenadas, conforme orientações de CETESB (2011) e levadas ao LGA para caracterização físico-química. Foram realizados os ensaios de turbidez, pH, alcalinidade, Demanda Química de Oxigênio (DQO) e sólidos totais, de acordo com procedimentos de APHA (2023).

Para determinação da viscosidade do lixiviado, utilizou-se o viscosímetro de Cannon-Fenske, seguindo procedimentos descritos na norma ASTM D445-2021. A execução do ensaio foi feita com o líquido em temperatura ambiente, elevando-se as temperaturas em torno de 30, 35 e 40°C.

### 2.3 Definição das misturas e moldagem dos corpos de prova

Foram realizadas misturas entre SL e B, em relação ao peso seco das amostras, nas seguintes proporções: 90% de SL e 10% de B (SB10) e 80% de SL e 20% de B (SB20). De acordo com Komine (2004), percentuais de bentonita até 20% são suficientes para reduzir consideravelmente o coeficiente de permeabilidade da camada de solo compactado e promover estabilidade estrutural. Os solos foram misturados (Figura 1) e homogeneizados por 20 minutos.



Figura 1 – Mistura de solo local com bentonita

As amostras ensaiadas foram compactadas em cilindro metálico com 10 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura. Foram moldados 3 corpos de prova (SL, SB10 e SB20) para cada fluido, seguindo os parâmetros de umidade ótima e massa específica seca máxima, obtidas no ensaio de compactação Proctor normal.

### 2.3 Ensaios de permeabilidade à água e ao lixiviado

Para a realização dos ensaios de permeabilidade na condição saturada das misturas de solo à água e ao lixiviado nas amostras, foi utilizado o permeâmetro de parede flexível e carga constante do tipo Tri-Flex 2 (Figura 2a) com temperatura controlada de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Os procedimentos do ensaio são descritos pela norma ASTM D5084-2016a.



Figura 2 – Permeâmetro de parede flexível Tri-flex 2: a) painel de controle e corpo de prova ensaiado; b) uso de tanques de inox para percolação de lixiviado na amostra de solo.

Inicialmente, o corpo de prova é inserido na câmara e é aplicada uma tensão confinante, garantindo o processo de adensamento do corpo de prova e preenchimento dos vazios do solo por água, até que não haja mais saída de água do corpo de prova. Em seguida, inicia-se a percolação do fluido de forma ascendente, com aplicação de uma pressão de 200 kPa, conforme recomendações normativas.

O ensaio pode ser finalizado quando as leituras de volume de água na entrada e na saída do corpo de prova forem estáveis e a razão entre as duas, em pelo menos quatro leituras ao longo do tempo, situe-se no intervalo de 0,75 e 1,25. Se os coeficientes de permeabilidade forem menores que  $1 \times 10^{-10}$  m/s esse erro deve ser considerado no intervalo de 0,50 e 1,50. Para a determinação da permeabilidade saturada do solo ao lixiviado utiliza-se a Equação 1.

$$k = \frac{V \times L}{P_B \times A \times T} \quad (1)$$

Onde:  $k$  é o coeficiente de permeabilidade saturado (cm/s),  $V$  é o volume de líquido lido entre o tempo inicial e final (cm<sup>3</sup>),  $L$  é o comprimento do corpo de prova (cm),  $P_B$  é a diferença de pressão entre a entrada e a saída (cm.ca),  $A$  é a área da seção do corpo de prova (cm<sup>2</sup>) e  $T$  é o tempo entre a leitura inicial e final (s).

Para percolação de lixiviado, são realizadas adaptações no equipamento para que o fluido não danifique o circuito interno e o sistema de pressões, além de preservar características do fluido pela exposição à luz. Para tal, utilizaram-se tanques auxiliares de aço inox, como mostrado na Figura 2b, que apresenta orifícios onde é possível aplicar pressões para induzir a percolação de lixiviado no solo.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Caracterização dos solos

Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica de SL, B, SB10 e SB20 podem ser visualizados na Tabela 1. Foi possível constatar como o incremento de bentonita influenciou nos parâmetros geotécnicos das misturas.

Tabela 1 – Resultados da caracterização geotécnica dos solos e misturas estudadas

Parâmetros geotécnicos	SL	B	SB10	SB20
Umidade higroscópica (%)	2,37	9,30	2,82	2,92
Massa específica dos grãos (kN.m <sup>-3</sup> )	26,7	24,2	26,5	26,0
Limite de liquidez (%)	20,00	180,00	24,00	35,00
Limite de plasticidade (%)	-	59,00	17,00	23,00
Índice de Plasticidade (%)	NP	121,00	7,00	12,00
Pedregulho (%)	13,50	0,00	5,42	4,51
Areia (%)	59,50	0,00	49,20	43,39
Silte (%)	15,00	60,00	30,88	35,80
Argila (%)	12,00	40,00	14,50	16,30
Classificação SUCS	SM	CH	SM	ML

A amostra de solo local apresentou um peso específico dos grãos de 26,7 kN.m<sup>-3</sup>, sendo este um valor coerente com indicações de Pinto (2006) para solos arenosos. No caso da bentonita, o resultado de 24,2 kN.m<sup>-3</sup>, que difere do obtido por Gupt *et al.* (2021) de 28,8 kN.m<sup>-3</sup>, mas que pode ser explicado pela presença de impurezas e pela diferença dos óxidos presentes entre as duas amostras. Entende-se ser necessária repetição deste ensaio para verificação desta propriedade do solo bentonítico.

Pode-se observar que a umidade higroscópica aumenta levemente à medida que é adicionada bentonita na mistura. A alta porcentagem de areia nas amostras SN, SB10 e SB20 justifica a baixa capacidade de retenção de água devidos aos vazios existentes entre as partículas, o que é oposto no caso da BP que predominância de partículas finas o que reduz os poros e permite que a água seja retida no solo.

O SL não apresenta plasticidade. Com o incremento de B, as misturas elevam seus índices de plasticidade, ainda considerados baixos, mas suficientes para melhorar a acomodação das partículas. Percebe-se que o teor de finos também aumentou. Solos com granulação mais fina tem maior capacidade de retenção e tendem a desenvolver limites de consistência mais elevados (Pinto, 2006). Esses valores são coerentes com os

obtidos por Costa (2019), que indicam que B tem natureza cálcica. Camargo (2012), apresentou valores de limite de liquidez de 403%, sendo que este autor utilizou bentonita sódica, que apresenta maior capacidade de expansão.

Percebe-se que o incremento de B em SL promoveu alterações na classificação do solo, seguindo a classificação SUCS. De acordo com as frações granulométricas e limites de consistência, as amostras SL e SB10 apresentaram uma classificação diferente em relação a SB20, passando de uma areia siltosa para um silte de baixa compressibilidade.

Ao analisar a composição granulométrica do solo é possível constatar de acordo com CETESB (1993), que as misturas SB10 e SB20 podem ser usadas em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários, pois possuem mais de 30% de finos em sua composição.

As curvas de compactação dos solos e misturas podem ser visualizadas na Figura 5. É possível observar que o SL, apresenta elevado peso específico seco máximo em relação a B, SB10 e SB20. À medida que é adicionado bentonita, o peso específico máximo é reduzido e a umidade é aumentada. Pinto (2006) constata esses dados quando afirma que para solos granulares, a curva de compactação se desloca para cima e para a esquerda, o inverso dos solos finos, que curva se desloca para baixo e para direita. Portanto, o teor de argila de uma amostra, é diretamente proporcional a sua umidade, já no caso do peso específico aparente seco máximo é ao contrário, pois solos argilosos possuem valores baixos.

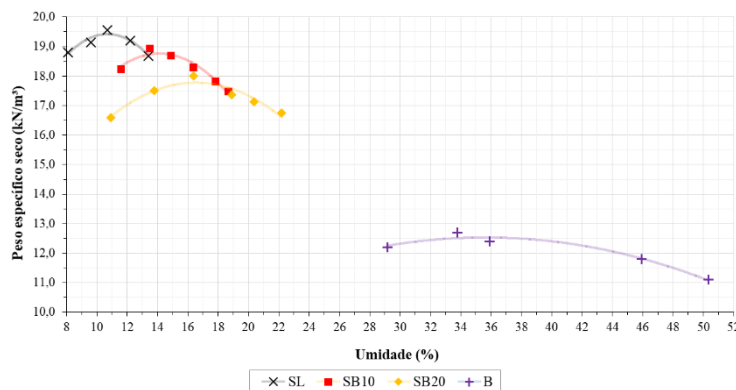


Figura 3 – Curvas de compactação de SL, B, SB10 e SB20

### 3.2 Caracterização do lixiviado

Os dados referentes às análises físico-químicas do lixiviado do ASCG e do ASS utilizado nos ensaios de permeabilidade constam na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros físico-químicos do lixiviado do ASCG e do ASS

Aterro	pH	Temperatura (°C)	Alcalinidade (mg/L)	Ácidos Voláteis (mgH/L)	DQO (mgO2/L)	Cloretos (mg/L)	Nitrogênio amoniacal (mgN/L)	Sólidos Totais (mg/L)
ASCG	8,17	34,0	8.500	1.350	12.253	5.348,34	1.477	14.500
ASS	7,41	32,5	2.250	-	3.162	4.048,74	357	-

Os valores obtidos estão na faixa indicada por Souto e Povinelli (2007) para aterros brasileiros, que indicam uma faixa provável de 7,2 e 8,6. O pH está ligado diretamente ao processo de digestão anaeróbica presente no interior das células sanitárias. Souto e Povinelli (2007) também definem faixas máximas para todos os outros parâmetros e os valores encontrados estão dentro de todos os intervalos mencionados.

Foi possível constatar uma diferença expressiva no valor da DQO e na Alcalinidade dos dois Aterros, que pode ser justificada por algumas características, como a idade do aterro e o tempo de disposição dos resíduos (Ferreira, 2010). Acontece que o ASCG apresenta uma fase de aterramento de aproximadamente 8 anos, apresentando um líquido contaminante mais escuro e viscoso, que pode ser confirmado pelas informações da Figura 4. Já o ASS tem apenas 3 anos, sendo considerado um aterro jovem, com resíduo iniciando a fase de decomposição da matéria orgânica.

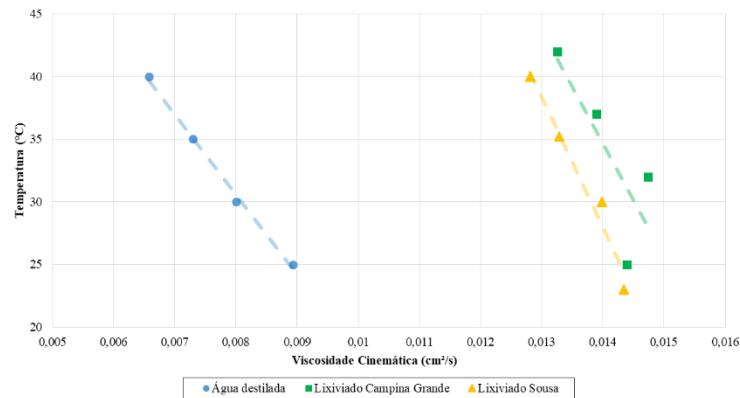


Figura 4 – Resultados da viscosidade cinemática da água destilada e do lixiviado do ASCG e do ASS

É possível observar que o comportamento da viscosidade corresponde às observações de Souza *et al.* (2014), que afirma que o lixiviado tende a ser mais viscoso em temperaturas mais baixas e em concentrações mais altas. Tendo em vista que os ensaios de permeabilidade foram realizados a uma média de temperatura de 23°, encontrasse uma viscosidade de 0,01528 cm<sup>2</sup>/s para o aterro de Campina Grande o 0,01434 cm<sup>2</sup>/s para o de Sousa. Comparando esses valores pode-se observar que o ASCG é 6,15% mais viscoso que o lixiviado de Sousa.

### 3.2 Permeabilidade à água e ao lixiviado

Os resultados dos ensaios de permeabilidade à água e ao lixiviado do ASCG e ASS, utilizando o permeâmetro de parede flexível Tri-flex 2, com as amostras SL, SB10 e SB20, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficiente de permeabilidade à água e ao lixiviado do ASCG e do ASS

Mistura	Permeabilidade (m/s)		
	Água destilada	Lixiviado Campina Grande	Lixiviado Sousa
SL	1,98.10 <sup>-8</sup>	5,59.10 <sup>-8</sup>	1,35.10 <sup>-7</sup>
SB10	3,31.10 <sup>-9</sup>	8,73.10 <sup>-9</sup>	2,22.10 <sup>-8</sup>
SB20	8,71.10 <sup>-10</sup>	7,11.10 <sup>-10</sup>	8,71.10 <sup>-9</sup>

De acordo com critério definido pela USEPA (1993), no qual a permeabilidade máxima aceita para CCL é 1.10<sup>-9</sup> m.s<sup>-1</sup>, as misturas SB10 e SB20 obtiveram resultados satisfatórios, tanto para água como para o lixiviado do ASCG. No entanto, no caso do lixiviado do ASS, apenas a mistura SB20 atende aos critérios da normativa referida.

Apesar de ser classificado como uma areia siltosa, o solo local possui um considerável potencial de vedação para ser usado em camada de base de aterros, quando compactados nas condições ideais. Esse potencial é potencializado pelo incremento de bentonita. Estudos de Srikanth e Mishra (2016) afirmam que isso se deve ao fato de que incrementos de bentonita aumentam o teor de finos da mistura e promovem o preenchimento dos vazios do solo. Na presença de umidade, essas partículas de argila apresentam um processo de expansão, reduzindo os caminhos de fluxo.

A Figura 5 mostra que o coeficiente de permeabilidade do solo diminui à medida que é incrementado a bentonita. Verifica-se que esse comportamento independe do fluido que percola as amostras. Pesquisas de Costa (2019), que trabalharam com permeabilidade ao lixiviado, também obtiveram redução da permeabilidade à medida que o teor de bentonita na mistura aumentava, independente do fluido.

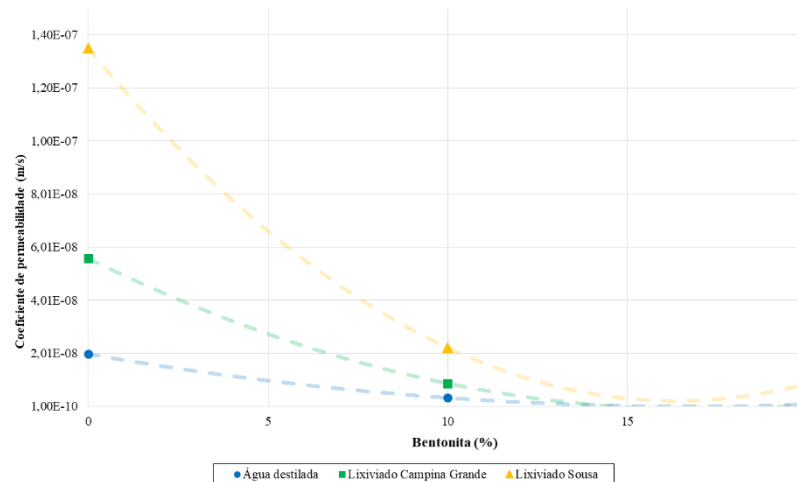


Figura 5 – Curvas dos Ensaios de Permeabilidade

É válido destacar que, para teores iniciais de incremento de bentonita entre 0 e 10%, há um distanciamento entre os coeficientes de permeabilidade. Nesse intervalo, os valores da permeabilidade para o lixiviado do ASS e do ASCG são maiores que à água. Esse comportamento foi similar a pesquisas desenvolvidas por Benson *et al.* (2018) e Wang *et al.* (2019). Evidencia-se que há influência do fluido contaminante nos parâmetros de vedação das camadas. Ahmadi *et al.* (2021) explicam que esse aumento da permeabilidade se deve à minimização do potencial expansivo das argilas, à redução da espessura da camada dupla difusa e à floculação das partículas.

Para incrementos de bentonita acima de 15%, há uma convergência entre as permeabilidades para os diversos fluidos estudados. Isso possibilita analisar que, quando quantidades ideais de bentonita são adicionadas à mistura, mesmo que haja redução da expansão das partículas, isso não é suficiente para inviabilizar seu uso como CCL, obedecendo aos parâmetros de permeabilidade estabelecidos por USEPA (1993). Então, há segurança no tocante à permeabilidade pelo incremento de bentonita para fins de composição da camada de revestimento de base de aterros sanitários.

#### 4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e análises realizadas no desenvolvimento desta pesquisa, é possível concluir que:

- Incrementos de bentonita em solos arenosos alteram parâmetros geotécnicos (limites de consistência, granulometria e capacidade de retenção de líquidos) da camada compactada final, reduzindo a permeabilidade, independente do fluido percolante;
- A interação do solo com líquidos contaminantes promove floculação das partículas, minimização da expansão e redução da espessura da camada dupla difusa. Isso explica o aumento significativo da permeabilidade para solos percolados por lixiviado quando comparados com percolação de água;
- A dosagem da quantidade de incremento de bentonita na mistura é um fator relevante no desempenho de camadas de solo compactadas utilizadas como revestimento de base de aterros sanitários. Caso quantidades inferiores de solo bentonítico sejam misturados, pode-se não ter o efeito impermeabilizante requerido, sobretudo em virtude do efeito da interação do solo com o contaminante. Do contrário, se quantidades maiores que o necessário forem incrementadas, pode-se ter um efeito adverso de expansibilidade excessiva nas amostras, causando formação de caminhos preferenciais de fluxo. No caso em estudo, quantidades significativas entre 15 e 20% de incremento de bentonita são ideais para garantir estanqueidade e segurança ambiental para a camada com quaisquer dos fluidos estudados.

#### AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq) e ao Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA – American Public Health Association (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. ed. 24. AWWA and WEF.
- Benson, C. H.; Chen, J. N.; Edil, T. B.; Likos, W. J (2018). Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners Permeated with Coal Combustion Product Leachates. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 144, n. 4, p. 04018011.
- Camargo, K. R (2012). *Avaliação da condutividade hidráulica e da resistência ao cisalhamento de misturas solo-bentonita: estudo de caso de um aterro sanitário localizado em Rio Grande (RS)*. São Carlos.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Resíduos Sólidos Industriais*. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233p.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2011). *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas*. São Paulo: CETESB, 327 p.
- Costa, W. W. M. L (2019). *Estudo da permeabilidade em solos utilizados em camada de base de aterro sanitário no semiárido paraibano*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.
- Ferreira, A. G (2010). *Estudo dos lixiviados das frações do aterro sanitário de São Carlos – SP por meio da caracterização físico-química*. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, 134p.
- Gupt, C. B.; Bordoloi, S.; Sahoo, R. K.; Sekharan, S (2021). Mechanical performance and micro-structure of bentonite-fly ash and bentonite-sand mixes for landfill liner application. *Journal of Cleaner Production*, v. 292, p. 126033.
- Komine, H (2004). Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand–bentonite mixture backfill. *Applied Clay Science*, v. 26, p. 13–19.
- Middelhoff, M.; Cuisinier, O.; Masrouri, F.; Talandier, J.; Conil, N (2020). Combined impact of selected material properties and environmental conditions on the swelling pressure of compacted claystone/bentonite mixtures. *Applied Clay Science*, v. 184.
- Ogundiran, O. O.; Afolabi, T. A (2008). Assessment of the physicochemical parameters and heavy metals toxicity of leachates from municipal solid waste open dumpsite. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 5 (2), p. 243-250.
- Pinto, C. S (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3ª ed. São Paulo: Ed. Oficina de Texto.
- Sarsby, R. W (2013). *Environmental Geotechnics*. ICE Publishing, 2ª ed.
- Souto, G. D.; Povinelli, J (2007). *Características do lixiviado de aterros sanitários no Brasil*.
- Srikanth, V.; Mishra, A. K (2016). A Laboratory Study on the Geotechnical Characteristics of Sand–Bentonite Mixtures and the Role of Particle Size of Sand. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 2, n. 1, p. 1–10.
- Wang, B.; Xu, J.; Chen, B.; Dong, X.; Dou, T (2019). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to inorganic waste leachate. *Applied Clay Science*, v. 168, n. November 2018, p. 244–248.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency (1993). *Solid waste disposal facility criteria technical manual*. Office of solid waste and emergency response. EPA-530-R-93-017. Washington DC.