

Análise Da Expansão Livre De Misturas De Areia-Bentonita Inundadas Por Lixiviado De Aterro Sanitário

Thiago Fernandes da Silva

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

Victor Emmanuel Avelino Gomes Bahia

Mestrando, UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, victorbahia225@hotmail.com

Melissa da Silva Leite

Graduação em Engenharia Civil, UFCG, Campina Grande-PB, Brasil, melissadasilvaleite@hotmail.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 argila compactada (CCL) são utilizadas como revestimento de base de aterro sanitário. Essas camadas visam evitar o fluxo de contaminantes para o meio ambiente. Muitas vezes, são utilizadas misturas de areia-bentonita, que podem favorecer a expansão. No entanto, o lixiviado desses aterros apresenta influência na expansividade dos solos. Este trabalho tem como objetivo analisar os fenômenos envolvidos na interação solo-contaminante que afetam a expansividade de misturas de areia-bentonita com água e com lixiviado. Amostras de solos de um aterro sanitário e de bentonita foram coletadas, misturadas e caracterizadas em variadas proporções. Em seguida, foram moldadas camadas experimentais, que passaram por ensaios de expansão livre em célula edométrica inundadas com água e com lixiviado. Os resultados mostraram que, até o percentual de 10% de incremento, a camada exposta ao lixiviado apresentou maiores expansões que à água, comportamento que não foi verificado para o percentual de 20%. O contato com líquidos contaminados pode ter promovido, além da floculação das partículas, a dissolução de argilominerais e a redução da camada dupla difusa. Então, é possível concluir que, para execução de CCL, deve-se ter especial cuidado no incrementos de bentonita. Muitas vezes, espera-se uma expansão das partículas que não são verificadas.

PALAVRAS-CHAVE: Camada de solo compactado, Expansão, Lixiviado.

ABSTRACT: Compacted clay liners (CCL) are used as a landfill base liner. These layers aim to prevent the flow of contaminants into the environment. Sand-bentonite mixtures are often used, which can promote expansion. However, the leachate from these landfills influences the expansiveness of the soil. This work aims to analyze the phenomena involved in the soil-contaminant interaction that affect the expansiveness of sand-bentonite mixtures with water and leachate. Soil samples from a landfill and bentonite were collected, mixed and characterized in varying proportions. Then, experimental layers were molded, which underwent free expansion tests in an oedometric cell flooded with water and leachate. The results showed that, up to a 10% increase, the layer exposed to leachate showed greater expansions than to water, a behavior that was not observed for the 20% percentage. Contact with contaminated liquids may have promoted, in addition to particle flocculation, the dissolution of clay minerals and the reduction of the diffuse double layer. Therefore, it is possible to conclude that, when performing CCL, special care must be taken when adding bentonite. Many times, an expansion of the particles is expected and is not verified.

KEYWORDS: Compacted soil liner, Swelling, Leachate.

1 INTRODUÇÃO

Camadas de argila compactada (CCL ou *liners*) podem ser utilizadas como revestimento de base de aterros sanitários, seja como camada principal ou secundária, para evitar a migração de líquidos contaminantes (lixiviado) oriundos da biodegradação dos resíduos sólidos (Sarsby, 2013).

Essas camadas precisam obedecer a critérios geotécnicos de impermeabilização e compatibilidade química. Tendo em vista a dificuldade de encontrar jazidas de argila com qualidade adequada, muitas vezes, são utilizados solos da própria região incrementados com bentonita (Ojuri e Oluwatuyi, 2017; Silva, 2017). Karakan e Demir (2020) afirmam que o solo bentonítico incrementado é altamente expansivo, logo, deve-se ter rigoroso controle na dosagem dos materiais, tendo em vista evitar expansões excessivas quando em contato com a umidade. Esse comportamento pode promover a formação de trincas e caminhos preferenciais de fluxo, reduzindo a permeabilidade da camada.

Tradicionalmente, os testes de expansão são realizados com o solo em contato com a água. No entanto, o fluido percolante nas CCL são lixiviados de aterros sanitários, que apresentam elevadas concentrações de matéria orgânica, compostos inorgânicos, metais pesados, substâncias xenobióticas e uma diversidade de microrganismos. Então, entender a dinâmica da interação solo-contaminante e seus reflexos na expansão das camadas torna-se um problema complexo.

Srikanth e Mishra (2016) afirmam que incrementos de bentonita na faixa de 5% promovem expansão rápida e de menor grau, enquanto percentuais próximos a 20%, apresentam expansão significativa e que podem promover trincas em ciclos de secagem. Demdoun *et al.* (2020) testaram o efeito do lixiviado no comportamento hidromecânico de misturas de areia-bentonita e verificaram que houve redução da expansão de todas as amostras ensaiadas com lixiviado em relação a amostras ensaiadas com água de torneira.

Então, este trabalho tem como objetivo analisar os fenômenos envolvidos na interação solo-contaminante que afetam a expansividade de misturas de areia e bentonita com água e com lixiviado de aterro sanitário.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Coleta e caracterização dos materiais

Os materiais (solos e lixiviado) utilizados nesta pesquisa foram obtidos em um Aterro Sanitário localizado no município de Campina Grande (ASCG), Estado da Paraíba. Os solos são utilizados na camada de impermeabilização de base do ASCG. Essa camada é constituída por uma areia no próprio empreendimento, denominada de Solo Local (SL), e Bentonita (B), obtida de jazida localizada no município de Boa Vista – PB, que fica a 25 km de Campina Grande e é o maior produtor nacional deste tipo de argila.

Estes solos foram coletados em sacos plásticos e levados ao Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Em seguida, foram espalhados em bandejas e expostos à secagem ao ar livre, para posterior destorroamento, homogeneização e separação de amostras, conforme recomendações da NBR 6457/2016 (ABNT, 2016a). Com as amostras separadas, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, conforme recomendações das normas especificadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Ensaios de caracterização geotécnica realizados nos solos

Ensaio	Norma
Limite de liquidez (LL)	NBR 6459 (ABNT, 2016b)
Limite de plasticidade (LP)	NBR 7180 (ABNT, 2016d)
Massa específica dos grãos	NBR 6458 (ABNT, 2016c)
Análise granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2016e)
Compactação	NBR 7182 (ABNT, 2016f)

A partir dos dados de caracterização, os solos puderam ser classificados de acordo com o Sistema de Classificação Unificado dos Solos (SUCS) e seu comportamento pode ser previamente conhecido.

Os líquidos utilizados para imersão das amostras de solo foram água destilada e lixiviado *in natura*. O percolado utilizado nesta pesquisa foi extraído diretamente do tubo de descarga proveniente da Lagoa de Tratamento de Lixiviado (LTL). As amostras do líquido foram coletadas e armazenadas, conforme orientações de CETESB (2011), e levadas ao LGA para caracterização físico-química. Os ensaios de turbidez, pH, alcalinidade, Demanda química de Oxigênio (DQO) e sólidos totais foram realizados no LGA, de acordo com procedimentos recomendados por APHA (2023).

2.2 Misturas de solos e moldagem dos corpos de prova

Com os solos destorroados e homogêneos, foram realizadas misturas de SL e B (Figura 1), em variadas proporções (peso seco). Os incrementos de bentonita nas misturas variaram entre 0 e 20%, conforme recomendações de Komine (2004), sendo obtidas as seguintes amostras: SL (0% de bentonita), SB10 (10% de bentonita) e SB20 (20% de bentonita). Todas as misturas foram caracterizadas seguindo os ensaios discriminados na Tabela 1.



Figura 1 – Mistura de Solo Local e Bentonita

A moldagem das amostras de solo foi realizada seguindo os parâmetros determinados no ensaio de compactação Proctor Normal (umidade ótima e peso específico seco máximo) para cada mistura. As amostras foram moldadas por compactação estática em uma prensa de compressão, conforme energia estabelecida, com dimensões de 2,52 cm de altura por 11,40 cm de diâmetro. Após moldagem, as amostras foram levadas ao aparelho de adensamento.

2.3 Ensaio de expansão livre

Os ensaios de expansão livre foram executados seguindo as recomendações da Norma ASTM 4546-21 (ASTM, 2021) em um aparelho de adensamento automatizado (Figura 2). Para tal, as amostras de areia-bentonita compactadas foram colocadas em célula edométrica, com drenagem permitida, e aplicação de carga de assentamento de 1 kPa. Em seguida, o fluido de interesse (água ou lixiviado) foi colocado no corpo do anel e foi acompanhada a expansão que ocorre quando o solo entra em contato com o líquido. Os ensaios foram realizados com uma amostra para cada mistura discriminada no item 2.2.

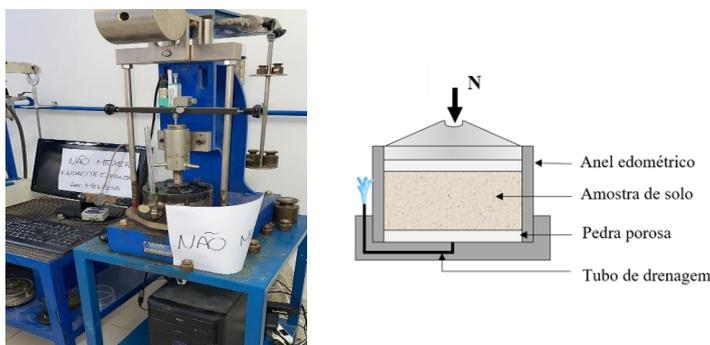


Figura 2 – Ensaio de expansão livre em aparelho de adensamento automatizado

A prensa edométrica automatizada realiza medições de altura do corpo de prova a cada 10 segundos, num total de 24 horas de acompanhamento. A expansão livre é obtida pela deformação sofrida pela amostra durante o ensaio, conforme demonstrado na Equação 1.

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta H}{H_i} \times 100 \quad (1)$$

Onde: ε_l é a expansão livre, ΔH é a variação na altura do corpo de prova e H_i é a altura inicial da amostra.

Para cada uma das amostras SL, SB10 e SB20 foram realizados ensaios com água e com lixiviado, separadamente. A partir dos resultados experimentais, foi observado como o fluido contaminante, em comparação com a água, afetou a expansão das amostras de solo, de acordo com o aumento de incremento de solo expansivo (Bentonita).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização dos materiais

Os dados obtidos nos ensaios de caracterização geotécnica de SL e B, bem como das misturas SB10 e SB20 são apresentados na Tabela 2. Para SL, a massa específica dos grãos foi de $2,67 \text{ g.cm}^{-3}$, apresentando LL de 20% e LP nulo, caracterizando-o como não plástico. Segundo Carvalho (2004), é comum que solos abundantes em quartzo tenham valores de massa específica com valores em torno de $2,67 \text{ g.cm}^{-3}$. Com dados obtidos pela curva granulométrica (Figura 2), este solo foi classificado de acordo com a SUCS como sendo uma areia siltosa (SM).

Tabela 2 – Caracterização de misturas solo local-bentonita utilizados em camadas de base

Parâmetros geotécnicos	SL	B	SB10	SB20
Umidade higroscópica (%)	2,37	9,30	2,82	2,92
Massa específica dos grãos (g.cm^{-3})	2,67	2,42	2,65	2,60
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
Classificação SUCS	SM	CH	SM	ML

O solo bentonítico utilizado nas misturas apresentou um índice de plasticidade (IP) de 121%. Neste sentido, Mitchell e Soga (2005) sugerem uma alta presença do argilomineral montmorilonita para solos com limite de liquidez variando de 100% a 900% e limite de plasticidade variando de 50% a 100%. A massa

específica dos grãos para este mesmo solo foi de $2,42 \text{ g.cm}^{-3}$, sendo classificado como sendo uma argila inorgânica de alta plasticidade (CH).

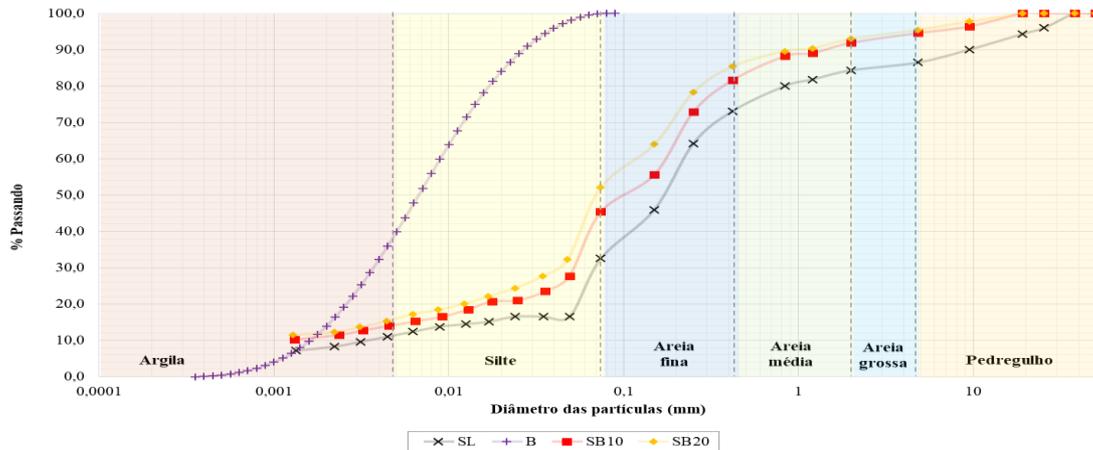


Figura 3 – Curvas de distribuição granulométrica de SL, B, SB10 e SB20

Os resultados experimentais mostram que o incremento de bentonita aumenta discretamente os limites de consistência do solo, com tendência linear. Srikanth e Mishra (2016) e Karakan e Demir (2020) pesquisaram misturas de areia-bentonita e observaram que incrementos de bentonita promoviam alteração linear nos limites de consistência dos solos. No entanto, o aumento relatado por esses estudos foi bem mais significativo, que pode ser explicado devido ao nível de pureza dos materiais utilizados pelos autores.

Apesar da variação nos limites de consistência do solo serem discretos, percebeu-se que houve uma mudança na classificação do solo no percentual de 20% de acréscimo de bentonita. Isso se deve ao fato de que, o incremento de bentonita elevou consideravelmente as porcentagens de material fino na mistura, sobretudo areia fina, silte e argila.

A Figura 4 mostra as curvas de compactação obtidas para SL, B, SB10 e SB20. Observou-se que, com o aumento do teor de bentonita, a curva é deslocada para baixo e para a direita. Percebe-se que, conforme se aumenta o teor de bentonita, menor a massa específica seca máxima e maior a umidade ótima das camadas experimentais. Srikanth e Mishra (2016) observaram esse comportamento para as misturas areia-bentonita, pois verificaram que, conforme se aumenta o teor de finos, maior é a superfície específica do solo. Esse comportamento também foi análogo ao observado por Baldev *et al.* (2020) ao estudar misturas de bentonita-vermiculita e Varaprasad *et al.* (2020) ao estudar estabilização de solos expansivos, com cinza e resíduo de carbureto de cálcio.

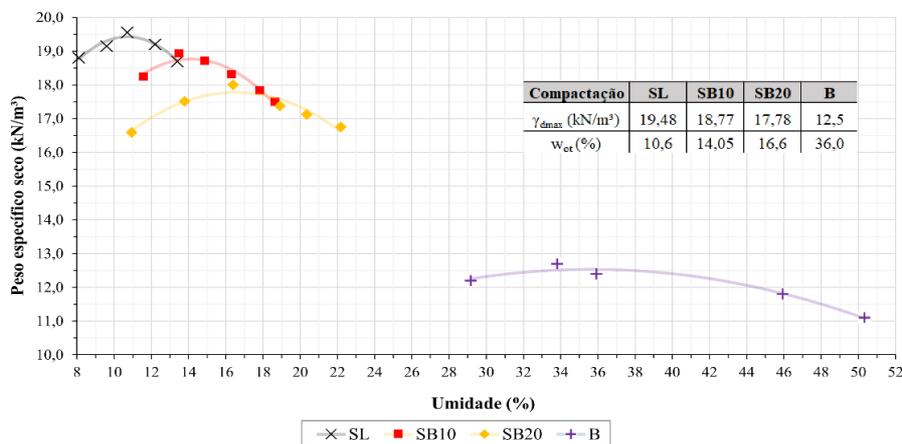


Figura 4 – Curvas de compactação de SL, B, SB10 e SB20

Na Tabela 3 constam os parâmetros físico-químicos do lixiviado utilizado nos ensaios de expansão. Os ensaios de turbidez, pH, alcalinidade (AT), Demanda química de Oxigênio (DQO) e sólidos totais (ST) indicam que o fluido utilizado possui características de elevada toxicidade, podendo comprometer o potencial expansivo das camadas de solo enriquecidas com bentonita.

Tabela 3 – Parâmetros físico-químicos do lixiviado utilizado

Parâmetro	Valor
Temperatura	34°
Vazão	37,06 m ³ .dia ⁻¹
ST	14.500 mg.L ⁻¹
Turbidez	364 NTU
pH	8,16 mg.L ⁻¹
AT	8.500 mg.L ⁻¹
DQO	12.253 mg.L ⁻¹

3.2 Expansão livre dos solos

Na Figura 5 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de expansão livre de todas as misturas inundadas com água e com lixiviado. Os valores encontrados de expansão livre variaram entre 0,2 e 9,4% para água e entre 0,89 e 6,26% para o lixiviado.

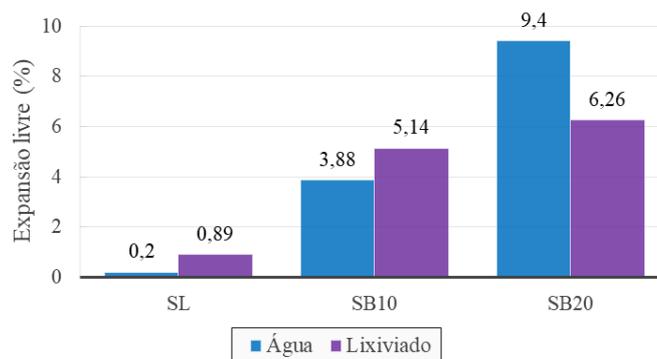


Figura 5 – Expansão livre das amostras SL, SB10 e SB20

De acordo com os parâmetros estabelecidos por Seed *et al.* (1962) e por Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), percebe-se que as misturas SB10 e SB20 atingem um grau de expansividade elevado. Nota-se que há um aumento na expansão à medida que a porcentagem de bentonita é elevada na amostra. Isso ocorre em virtude de que a bentonita utilizada contém argilominerais que são altamente expansivos na presença de líquidos, como a montmorilonita.

Amadi (2013) observou que, para misturas de argila-bentonita, incrementos de 0% e 10% aumentaram a expansão livre de 17% para 31%, respectivamente. Abbey, Eyo e Ng'ambi (2020) confirmam o comportamento expansivo de amostras de solos incrementados por bentonita com teores de 0% a 75% de bentonita. Verificou-se que a expansão livre variou de 12 a 39%.

De acordo com Ferreira (1995), o processo expansivo do solo está ligado ao tipo de argilomineral predominante em sua microestrutura. Logo, quando a classificação de determinado solo muda, a reação desse solo também muda. Isso ocorreu nesse estudo, considerando que SL e SB10 são classificados como SM e SB20 como ML.

Todas as amostras foram compactadas com água, seguindo parâmetros de umidade ótima e peso específico seco máximo. Para teores de bentonita entre 0 e 10%, percebe-se que a expansão da amostra imersa em lixiviado é maior quando comparada com a água. Nesse intervalo, pode-se analisar que o comportamento da mistura de solos é governada predominantemente pela fração arenosa. Acontece que a presença de um

fluido contaminado em contato com o solo pode ter promovido a floculação das partículas, que resulta em maior expansividade.

Para o teor de incremento de 20%, aconteceu o contrário, sendo a expansão menor quando exposta ao lixiviado. A fração argilosa parece começar a governar o comportamento expansivo da mistura. Neste caso, o contato com líquidos contaminados pode ter promovido, além da floculação das partículas, a dissolução de argilominerais e a redução da camada dupla difusa.

Este comportamento foi observado para Proia *et al.* (2016), que verificou que, para percentuais de até 10% de bentonita, a mistura manteve as características do solo arenoso originário. Para incrementos acima de 60%, o comportamento geotécnico era governado pela argila bentonítica. Entre 10 e 60%, os autores concluíram que haveria um comportamento intermediário e mais complexo.

Os mecanismos de expansibilidade físico-químicos dependem da disponibilidade de água, do tipo e quantidade de cátions trocáveis e da ordem de interação entre a água e estes cátions (Gomes e Silvani, 2022). Assim, pode-se afirmar que a expansão de um solo depende diretamente da sua capacidade de troca catiônica (CTC), podendo atingir uma maior expansão caso o contaminante seja compatível com a necessidade físico-química daquele solo.

Considerando as informações apresentadas, nota-se que a interação dos líquidos com a camada incrementada de bentonita apresenta considerável expansão. Essa expansão pode ser benéfica para o comportamento impermeabilizante, tendo em vista que os vazios do solo serão reduzidos. No entanto, quando camadas com maiores teores de bentonita são expostas ao líquido contaminante, esta expansão é reduzida.

4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, é possível concluir que:

- o incremento de bentonita em areias pode viabilizar tecnicamente o uso de materiais naturais na confecção de camadas de solo compactado, seja como camada primária ou secundária, a depender do caso. Foi mostrado que o incremento gradual de bentonita promove mudanças na classificação dos solos, assim como na plasticidade desenvolvida pelo material. Estudos anteriores comprovam que há redução considerável da permeabilidade para estas misturas. Entende-se ser uma medida benéfica, sobretudo em regiões que tem disponibilidade de materiais para a composição, como na região de coleta dos materiais (Campina Grande – PB).
- O processo de hidratação das camadas de solo compactado pelo contato com diferentes fluidos mostrou-se divergente para as misturas. Para percentuais de incremento de bentonita relativamente baixos, verifica-se que fração de areia governa majoritariamente o comportamento geotécnico da mistura. Quando esse incremento ultrapassa os 20%, percebe-se que a fração argilosa começa a ter grande influência no comportamento.
- A partir dos resultados experimentais, pode-se inferir que o lixiviado promoveu ataque químico nas partículas dos argilominerais, promovendo assim redução da expansão, quando comparado com a água. Esse ataque promove, entre outros fenômenos, a floculação das partículas, dissolução de argilominerais e redução da camada dupla difusa.

Portanto, verificou-se que os fenômenos apontados afetaram a expansividade das misturas e, conseqüentemente, podem não promover o efeito de redução dos vazios esperado. Então, para execução de CCL, deve-se ter especial cuidado nos incrementos de bentonita, uma vez que espera-se uma expansão das partículas que não são verificadas quando em contato com líquidos contaminados. Isso pode promover, entre outras coisas, aumento da permeabilidade da camada, bem como formação de caminhos preferenciais de fluxo.

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

- Abbey, S. J.; Eyo, E. U.; Ng'ambi, S (2020). Swell and microstructural characteristics of high-plasticity clay blended with cement. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 79, n. 4, p. 2119-2130.
- Amadi, A. A (2013). Swelling characteristics of compacted lateritic soil– bentonite mixtures subjected to municipal waste leachate contamination. *Environmental Earth Sciences*, v. 70, n. 6, p. 2437-2442.
- APHA – American Public Health Association (2023). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Ed. 24. AWWA and WEF.
- Baldev, D.; Kumar, A.; Chauhan, P.; Muthukumar, M.; Shukla, S. K (2020). Hydraulic and volume change characteristics of compacted clay liner blended with exfoliated vermiculite. *International Journal of Environment and Waste Management*, v. 25, n. 4, p. 430-440.
- Carvalho, J. B. Q (2004). *Fundamentos da mecânica dos solos*. 2. ed. Campina Grande: Editora Marcone, 310p.
- 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.
- Demdoum, A.; Gueddouda, M. K.; Goual, I.; Souli, H.; Ghembaza, M. S (2020). Effect of landfill leachate on the hydromechanical behavior. *Construction and Building Materials*, v. 234, p. 117356.
- Ferreira, S. R. M (1995). *Colapso e expansão de solos naturais não saturados devidos à inundação*. Tese de Doutorado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Gomes, H. G. S.; Silvani, C (2022). *Solos expansivos: mecanismos de expansão e tratamento*. Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências.
- Karakan, E.; Demir, S (2020). Observations and findings on mechanical and plasticity behavior of sand-clay mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 13, n. 983.
- Komine, H (2004). Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand–bentonite mixture backfill. *Applied Clay Science*, v. 26, p. 13–19.
- Mitchell, J. K.; Soga, K (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. [S.l: s.n.], v. 158.
- Ojuri, O. O.; Oluwatuyi, O. E (2017). Strength and hydraulic conductivity characteristics of sand-bentonite mixtures designed as a landfill liner. *Jordan Journal of Civil Engineering*, v. 11, n. 4, p. 614-622.
- Proia, R.; Croce, P.; Modoni, G. Experimental investigation of compacted sand-bentonite mixtures. *Procedia Engineering*, v. 158, p. 51-56.
- Sarsby, R. W (2013). *Environmental Geotechnics*. ICE Publishing, 2^a ed.
- Seed, H. B.; Woodward Jr, R. J.; Lundgren, R (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, v. 88, n. 3, p. 53-87.
- Silva, T. F (2017). *Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- 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.
- Varaprasad, K.; Jayaramudu, T.; Kanikireddy, V.; Toro, C.; Sadiku, E. R (2020). Alginate-based composite materials for wound dressing application: A mini review. *Carbohydrate polymers*, v. 236, p. 116025.
- Vijayvergiya, V. N.; Ghazzaly, O. I (1973). *Prediction of swelling potential for natural clays*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils. p. 227-236.