

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Comportamento Geotécnico de Liners de Aterros Sanitários pelo Incremento de Bentonita

Thiago Fernandes da Silva

Doutorando, PPGECA/UFCG, Campina Grande-PB, Brasil, engthiagofernandes1989@gmail.com

Alisson do Nascimento Lima

Mestrando, PPGECA/UFCG, Campina Grande-PB, Brasil, alissonnascimentolim@gmail.com

Vitor Braga de Azevedo

Graduando, UFCG, Campina Grande-PB, Brasil, vitorba.eng@gmail.com

William de Paiva

Professor, UEPB, Campina Grande-PB, Brasil, w.paiva461@gmail.com

Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

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

RESUMO: Liners são elementos de fundamental importância em aterros sanitários e geralmente são constituídas por solos argilosos de baixa permeabilidade. Nem sempre há jazidas com esse tipo de solo disponíveis. Uma solução é incrementar bentonita ao material que irá compor tal camada, objetivando a diminuição da permeabilidade em virtude do preenchimento dos poros pela expansão do material após hidratação. O objetivo desse trabalho é estudar o comportamento das propriedades geotécnicas e hidráulicas de liners utilizados em aterros sanitários, considerando incremento de bentonita na sua composição. Foram coletados solos em jazidas no Aterro Sanitário em Campina Grande-PB, levados para laboratório e, em seguida, planejadas misturas pela adição de bentonita ao solo natural, tendo também variação da umidade. Essas amostras foram submetidas a ensaios de caracterização geotécnica e de permeabilidade, e por fim, analisados com auxílio de ferramentas estatísticas. Os resultados mostraram, de forma quali-quantitativa, que o incremento de bentonita promove melhorias na impermeabilização. Porém, é essencial que a umidade de moldagem seja analisada, pois é necessária a mudança na estrutura das partículas para que haja acomodação dos grãos e consequente redução dos vazios, como comprovados pela superfície de resposta. Concluiu-se que, apenas o incremento de bentonita não é suficiente para aumentar a impermeabilização dessas camadas.

PALAVRAS-CHAVE: camada de base, permeabilidade e bentonita.

ABSTRACT: Liners are elements of fundamental importance in sanitary landfills and are generally made up of low permeability clayey soils. There are not always deposits with this type of soil available. One solution is to add bentonite to the material that will compose this layer, aiming to reduce permeability due to the filling of the pores by the expansion of the material after hydration. The objective of this work is to study the behavior of the geotechnical and hydraulic properties of liners used in sanitary landfills, considering the increment of bentonite in its composition. Soils were collected from deposits at the Sanitary Landfill in Campina Grande-PB, taken to the laboratory and, then, mixtures were planned by the addition of bentonite to the natural soil, also having moisture variation. These samples were submitted to geotechnical characterization and permeability tests, and finally, analyzed with the aid of statistical tools. The results showed, in a quali-quantitative way, that the increment of bentonite promotes improvements in waterproofing. However, it is essential that the molding moisture be analyzed, as it is necessary to change the structure of the particles so that there is accommodation of the grains and consequent reduction of voids, as evidenced by the response surface. It was concluded that the increment of bentonite alone is not enough to increase the waterproofing of these layers.

KEYWORDS: liner, permeability and bentonite.



1 Introdução

Camadas de impermeabilização de base (*liners*) são elementos de fundamental importância em aterros sanitários, pois protegem o meio ambiente de contaminação proveniente da percolação de lixiviado nos corpos hídricos e no subsolo da região (BOSCOV, 2008).

Este líquido, como um dos subprodutos da degradação dos RSU, possui em sua composição a presença de metais pesados, compostos inorgânicos e matéria orgânica dissolvida (YE *et al.*, 2019). Os custos de remediação de áreas contaminadas são elevados, o que reforça a necessidade de atendimento aos critérios técnicos até então estabelecidos.

Porém, nem sempre há jazidas com solos de baixa permeabilidade disponíveis. Uma solução amplamente utilizada na construção de *liners* é a adição de bentonita, material argiloso com alta predominância de argilominerais montmoriloníticos, e, por esse motivo, apresentam elevado potencial de expansão e retenção de líquidos (GRIM E GUVEM, 2011; SOARES, 2012).

A adição desse material promove diminuição da permeabilidade devido ao preenchimento dos poros e expansão após hidratação (NORRIS *et al.*, 2018). Além disso, misturas solo-bentonita são capazes de se manter eficiente por anos, trazendo segurança e durabilidade, quando aplicadas em aterros sanitários (MALUSIS E BARLOW, 2020).

Apesar dos processos de fissuração serem mais preponderantes na camada de cobertura, estes também são importantes na camada de base. Quando elevados teores de bentonita são adicionados na mistura, fissuras podem ser provocadas e, conseqüentemente, a formação de caminhos preferenciais de fluxo por essa base, prejudicando as características de estanqueidade dessa camada (ABBEY, EYO E NG'AMBI, 2020). Entende-se ser essencial estudar o comportamento geotécnico das *liners* quando incrementadas por bentonita, além de verificar o atendimento ao critério de permeabilidade estabelecidos nas normativas.

Portanto, o objetivo desse trabalho é estudar o comportamento das propriedades hidráulicas e geotécnicas em *liners* utilizados em aterros sanitários, considerando incremento de bentonita na sua composição.

2 Metodologia

A área de estudo deste trabalho é o Aterro Sanitário em Campina Grande (ASCG), localizado no estado da Paraíba, Brasil (Figura 1). O ASCG recebe diariamente cerca de 850 toneladas de resíduos, dos quais, cerca de 95% é proveniente do município de Campina Grande e 5% vem de 56 outros municípios dos Estados da Paraíba e de Pernambuco.

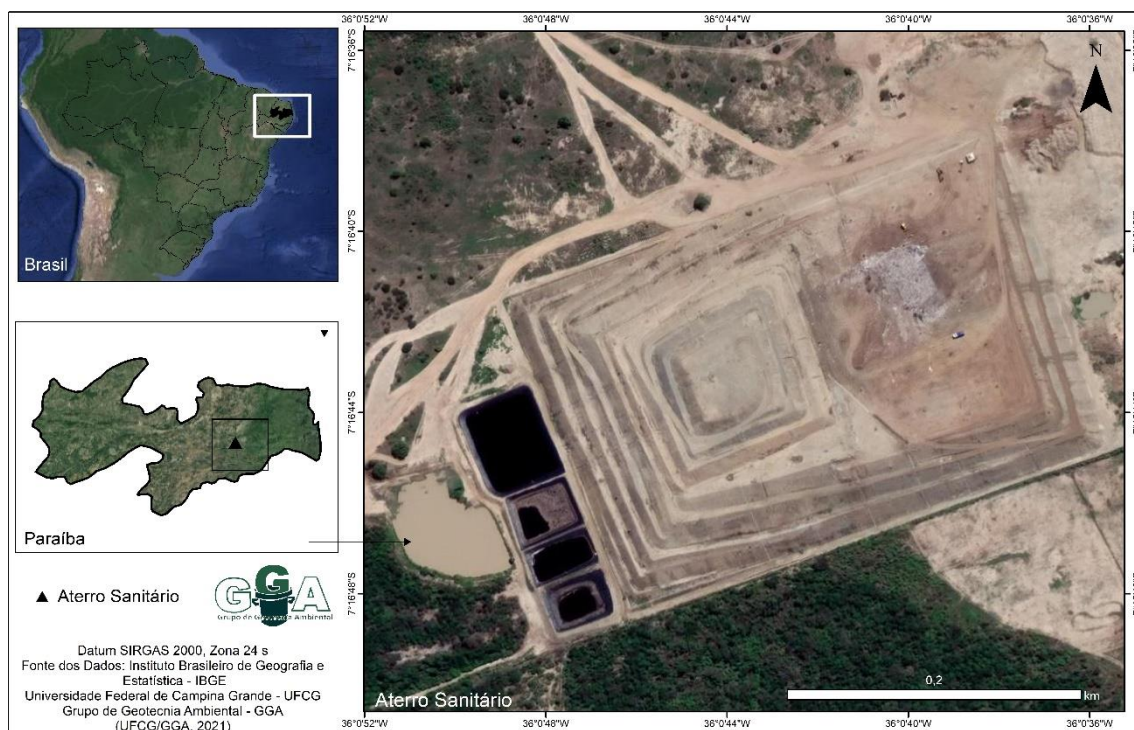


Figura 1. Localização do ASCG

No campo em estudo, *liners* são executadas a partir da mistura e compactação de dois tipos de solos, um primeiro extraído na área do próprio Aterro (Solo natural) e por bentonita oriunda de jazida no município de Boa Vista – PB.

Foram realizadas coletas de amostras deformadas de ambos os solos, que ficam armazenados ao ar livre no entorno do ASCG, seguindo os procedimentos da NBR 6457/2016 (ABNT, 2016a). Então, essas amostras foram acondicionadas em sacos e levados ao Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Para o estudo do comportamento geotécnico de diferentes misturas de solo-bentonita, amostras destes solos foram submetidas aos ensaios de caracterização geotécnica, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Normas utilizadas para realização dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos do ASCG

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

Foi realizado um planejamento experimental (fatorial) para definições dos parâmetros dependentes e independentes, assim como seus respectivos níveis utilizados na moldagem dos corpos de prova. Esse planejamento foi um Delineamento Composto Central (DCC) do tipo 2^k com 2 fatores, 2 níveis e 3 pontos centrais, resultando em 7 experimentos (Tabela 2). As variáveis independentes definidas foram a umidade e o percentual de bentonita, assim como suas respectivas respostas foram os valores de permeabilidade à água. Este planejamento se mostra adequado tendo em vista conhecer, de forma quantitativa, como se dá o comportamento da permeabilidade pela variação dos parâmetros independentes. Além do mais, foi possível realizar um número mínimo de ensaios com elevado grau de confiabilidade estatística.



Tabela 2. Planejamento dos ensaios de permeabilidade à água para *liners*

Experimentos N°	Umidade (%)	Bentonita (%)	Permeabilidade à água (m/s)
1	7	5	P1
2	7	25	P3
3	15	5	P3
4	15	25	P4
5	11	15	P5
6	11	15	P6
7	11	15	P7

Para cada experimento planejado, foram realizadas caracterizações geotécnicas em virtude da adição de bentonita ao Solo natural, nos percentuais definidos de 5, 15 e 25% em relação ao volume total da moldagem. Além do mais, foram adotadas umidades que variaram de 7, 11 e 15%. Esses percentuais foram adotados em consonância com os valores adotados na operação do referido Aterro.

Após moldagem dos corpos de prova com energia de compactação *Proctor* Normal, estes então foram levados para realização de ensaio de permeabilidade com auxílio de um permeâmetro de parede flexível *Tri-flex 2* da *ELE International*. Para esse ensaio, seguiu-se as recomendações da ASTM D5084 (ASTM, 2016).

A saturação foi realizada por contrapressão e a tensão efetiva aplicada durante o ensaio de 30 kPa, para representar o carregamento mínimo que a camada de base está submetida em campo. A verificação da saturação do corpo de prova foi realizada pelo parâmetro B, utilizando um sensor do tipo LVDT, onde considerandou-se saturados quando este valor atingia o mínimo de 0,95.

Com auxílio do *Software Statistica 12.0* foi possível obter parâmetros estatísticos (R^2 e p-valor) e superfícies de respostas previstas por uma equação constitutiva, que pode ser adotada para previsão da permeabilidade à água, assim como para processos de otimização em liners de aterros sanitários com condicionantes similares. O nível de confiança do modelo é de 95%.

3 Resultados e Discussões

Os parâmetros da caracterização geotécnica realizados para o solo natural, a bentonita e as composições estudadas são apresentados na Tabela 3. Pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), verifica-se que o solo natural é uma areia siltosa (SM) e a bentonita como sendo uma argila de alta plasticidade (CH). A adição de solo bentonítico ao Solo natural confere características de plasticidade melhoradas, com aumento do teor de finos e do índice de plasticidade, saindo de uma classificação de areia siltosa para uma areia argilosa.

Tabela 3. Resultados da caracterização geotécnica dos solos adotados no estudo

Misturas	Solo natural	Bentonita	S5	S15	S25
Massa esp. dos grãos (g/cm ³)	2,67	3,05	2,76	2,75	2,75
LL (%)	19	178	22	26	28
LP (%)	-	60	18	19	20
Índice de plasticidade (%)	(NP)	118	4	7	8
(%) Pedregulho	6,7	0	14,49	7,45	6,87
(%) Areia grossa	7,3	2	7,61	6,55	4,63
(%) Areia média	26,0	1,9	21,90	21	20,5
(%) Areia fina	25,0	36,1	30,10	29,5	28
(%) Silte	22,8	19,9	12,10	17,96	17,17
(%) Argila	12,2	36,1	13,80	17,54	22,83



Classificação	SM	CH	SM	SM	SC
---------------	----	----	----	----	----

Legenda: S5 = Solo natural + 5% bentonita, S15 = Solo natural + 15% bentonita e S25 = Solo natural + 25% bentonita.

A bentonita é responsável por conferir plasticidade às misturas de solo, garantindo melhor trabalhabilidade do material, sobretudo devido à sua alta plasticidade e considerável teor de argilominerálias. Assim como no presente estudo, Morandini e Leite (2015), Silva (2017) e Karakan e Demir (2020) observaram uma tendência de aumento dos índices de plasticidade com aumento da quantidade de bentonita na mistura, melhorando consideravelmente as características impermeabilizantes em *liners* de aterros sanitários.

Quanto às características de compactação das misturas de solos estudadas, a Figura 2 mostra as curvas de compactação Proctor normal para cada solo. Dado o aumento do percentual de bentonita, observa-se o aumento da umidade ótima de compactação, e a redução do peso específico aparente seco máximo. De acordo com Pinto (2006) e Silva (2017), este fato ocorre devido ao aumento da fração fina na camada de solo compactado e sua consequente necessidade de maiores umidades para atingir seu peso específico aparente máximo, sobretudo em virtude da maior superfície específica de partículas finas.

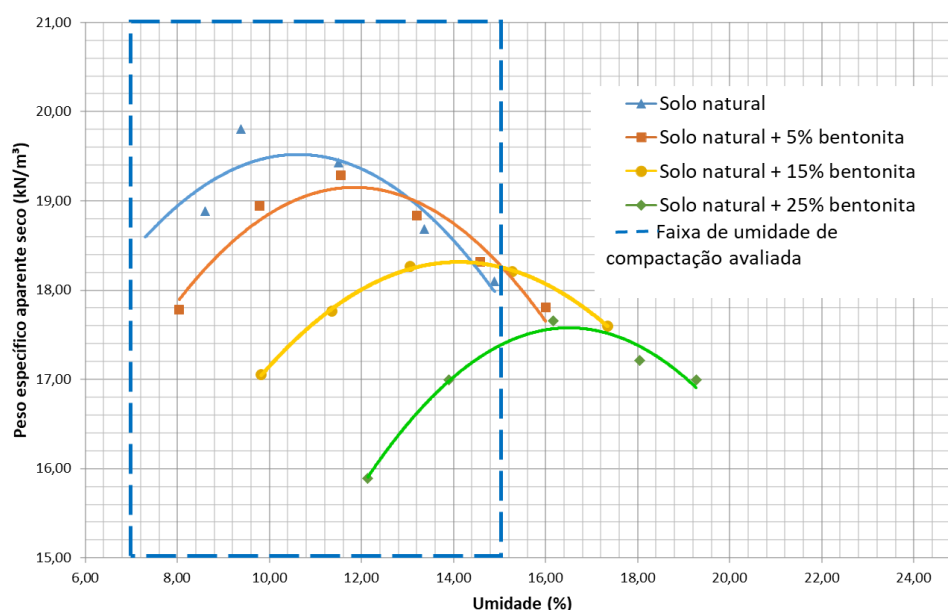


Figura 2. Curvas de compactação dos solos estudados

A respeito da permeabilidade à água, ao se avaliar apenas o solo natural quando compactado na umidade ótima, obteve-se um coeficiente de permeabilidade de $1,70 \cdot 10^{-8}$ m/s, o que atende preceitos da NBR 13.896 (ABNT, 1997) para aterros sanitários. No entanto, outras normativas nacionais (CETEST, 1993) e internacionais (USEPA, 2004) tratam este parâmetro como sendo satisfatório quando for menor que 10^{-9} m/s, justificando a necessidade de incremento de bentonita para melhorar as características impermeabilizantes dessa camada de base.

Após o incremento de bentonita, nas porcentagens definidas pelo planejamento fatorial, foi possível obter as respectivas permeabilidades para os experimentos, que podem ser vistas na Tabela 4. Percebe-se que o incremento do material bentonítico reduziu a permeabilidade para valores na ordem de 10^{-9} m/s, podendo atender a todas as recomendações normativas. Não obstante, o manejo da umidade de compactação também será um fator determinante para permitir desempenho hidromecânico adequado nas camadas de solos trabalhadas. Tais comportamentos, corroboram com estudos de Silva (2017) e Costa (2019).



Tabela 4. Resultados dos ensaios de permeabilidade à água para as *liners* planejadas

Experimentos N°	Umidade (%)	Bentonita (%)	Permeabilidade à água ($\times 10^{-9}$ m/s)
1	7	5	1,72
2	7	25	0,63
3	15	5	0,13
4	15	25	0,34
5	11	15	0,65
6	11	15	0,41
7	11	15	0,29

Com os resultados das permeabilidades obtidas foi possível desenvolver a superfície de respostas para permeabilidade à água em camada de base de aterro sanitário (Figura 3). Percebe-se uma redução do coeficiente de permeabilidade quando se aumenta o percentual de bentonita e a umidade do solo conjuntamente. O comportamento da superfície permite afirmar que apenas o incremento de bentonita não é suficiente para reduzir a permeabilidade.

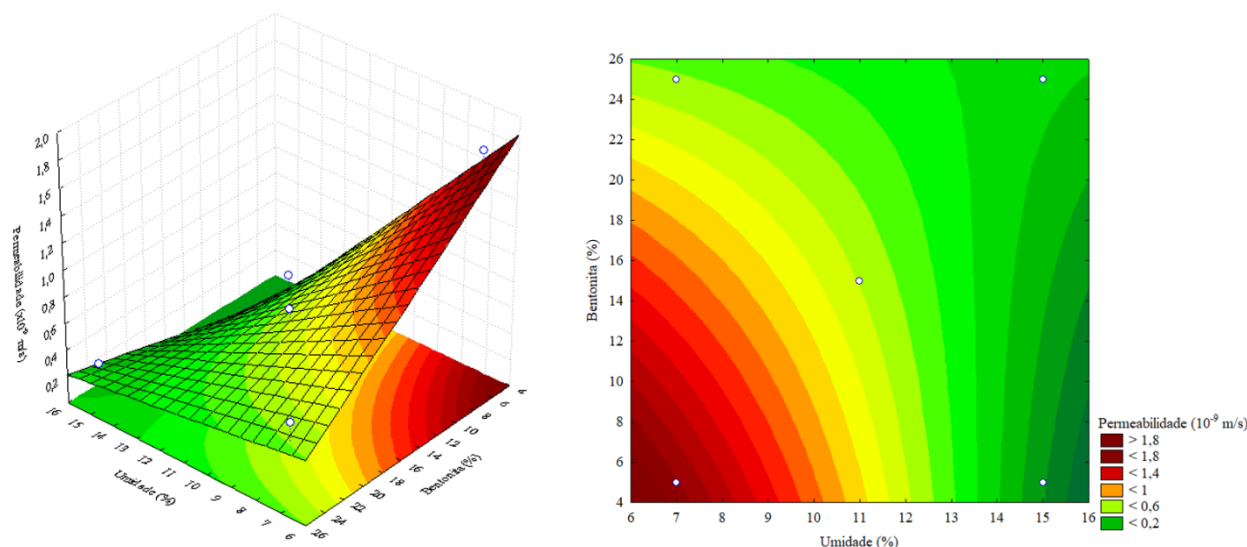


Figura 3. Superfície de respostas para a modelagem dos solos estudados

Partindo para a análise estatística dos dados, a Tabela 5 mostra o p-valor e o coeficiente do fator, que vai ditar o comportamento da equação constitutiva da superfície obtida. Tendo em vista o nível de significância de 5%, percebe-se que a umidade ($p < 0,05$) é o fator que apresentou maior relevância para o modelo. A análise de variância do modelo mostrou que o valor do coeficiente de determinação foi de 0,89, mostrando boa relação entre os dados observados e preditos.

Tabela 5. Análise de significância dos fatores do modelo de permeabilidade à água

Fator	p-valor	Coefficiente do fator
Umidade (%)	0,037	-0,24
Bentonita (%)	0,142	-0,11
Interação entre as variáveis	0,072	0,01
Intercepto	0,014	3,57

A equação constitutiva do comportamento da permeabilidade em função da umidade e do percentual de bentonita adicionado pode então ser obtido pela Equação 1.

$$P = 3,57 - 0,24 \times U - 0,11 \times B + 0,01 \times U \times B \quad (1)$$



Onde: P é a permeabilidade à água da camada de solo compactado ($\times 10^{-9}$ m/s), U é a umidade de moldagem da mistura (%) e B é o percentual de bentonita adicionado na mistura.

Com essa equação é possível estabelecer processos de otimização dos parâmetros para obtenção da permeabilidade desejada, bem como prever a permeabilidade de *liners* que utilizem composição de materiais similares e condições de compactação, dentro do intervalo dos parâmetros avaliados. Com isso, pode ser possível projetar camadas de base de aterros sanitários com grau de segurança ambiental estatisticamente testados.

O presente estudo se limitou à variação apenas desses dois parâmetros descritos, porém, pode-se inserir mais fatores de entrada no modelo, como energia de compactação por exemplo, o que eleva a quantidade de ensaios necessários assim como a complexidade do problema. Além do mais, foi utilizada uma superfície plana de modelagem, que pode ser testada também para modelos côncavos.

4 Conclusões

A partir dos resultados deste estudo, foi possível perceber que, apenas o incremento de bentonita não é suficiente para aumentar a impermeabilização das camadas de base de solos compactados para aterros sanitários. Percebeu-se ser necessário níveis de umidade que permitam a mudança na estrutura do solo, permitindo um arranjo mais denso, com tendência a uma estrutura dispersa.

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA) da Universidade Federal de Campina Grande pela disponibilidade dos equipamentos, materiais e orientações para desenvolvimento dessa e de outras pesquisas.

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*, 79(4), 2119-2130.
- American Society For Testing And Materials (2016). D5084. *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter* ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016a). NBR 6.457. *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016b). NBR 6.458. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016c). NBR 6.459. *Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016d). NBR 7.180. *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016e). NBR 7.181. *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). NBR 13.896: *Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016f). NBR 7.182. *Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Boscov, M. E. G. (2008). *Geotecnia ambiental*. Oficina de textos.
- Pinto, C.S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. Oficina de textos.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (1993). *Resíduos Sólidos Industriais*. 2. ed. São Paulo: CETESB. 233p.
- Costa, W. W. M. L. (2019). *Estudo da permeabilidade em solos utilizados em camada de base de aterro sanitário no semiárido paraibano*. (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande).
- Grim, R. E., & Guven, N. (2011). *Bentonites: geology, mineralogy, properties and uses*. Elsevier.
- Karakan, E.; Demir, S. *Observations and findings on mechanical and plasticity behavior of sand-clay mixtures*. Arabian Journal of Geosciences. 13, 1-20.
- Malusis, M. A.; Barlow, L. C. (2020). Comparison of Laboratory and Field Measurements of Backfill Hydraulic Conductivity for a Large-Scale Soil-Bentonite Cutoff Wall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(8), 04020070.
- Morandini, T. L. C.; Leite, A. L. (2015). Characterization and Hydraulic Conductivity of Tropical Soils Samples and Bentonite Mixtures for CCL Purposes. *Engineering Geology*, 196, 251-267.
- Norris, A., Di Emidio, G., Malusis, M. A., & Replogle, M. (2018). Modified bentonites for soil-bentonite cutoff wall applications with hard mix water. *Applied Clay Science*, 158, 226-235.
- Silva, T. F. (2017). *Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários*. (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande).
- Soares, V. (2012). *Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros sanitários* (Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo).
- USEPA – United States Environmental Protection Agency. *Solid waste disposal facility criteria technical manual*. Office of solid waste and emergency response. EPA-530-R-93-017. Washington DC.: USEPA, 1993. 11p.
- Ye, J., Chen, X., Chen, C., & Bate, B. (2019). Emerging sustainable technologies for remediation of soils and groundwater in a municipal solid waste landfill site--A review. *Chemosphere*, 227, 681-702.