

Previsão De Recalques Em Misturas De Solos Utilizados Como Liners Em Um Aterro Sanitário: Um Estudo Experimental

Thayná da Silva Nunes

Graduada em Engenharia Civil, UFC – Campus Russas, Russas-CE, Brasil, thayna.ja.25@gmail.com

Thiago Fernandes da Silva

Professor, UFC – Campus Crateús, Crateús – CE, Brasil, thiagofernandes@crateus.ufc.br

Daniela Lima Machado da Silva

Professora, UFC – Campus Russas, Russas-CE, Brasil, danielalms@ufc.br

RESUMO: O presente estudo teve como objetivo prever os recalques sofridos em solos utilizados como camada de base (*liner*) em um aterro sanitário localizado no semiárido paraibano, por meio do ensaio de adensamento unidirecional. Os solos investigados foram o solo natural local e uma argila bentonítica proveniente de Boa Vista-PB, coletados na área adjacente ao aterro sanitário durante a execução da camada de base, composta por 20% de argila bentonítica (massa/massa). Após a coleta, os materiais foram enviados à Universidade Federal de Campina Grande para realização da caracterização geotécnica e ensaio de adensamento unidirecional. Foram preparados corpos de prova das misturas com teores de 5%, 15% e 25% de argila bentonítica, compactados no ponto ótimo sob energia Proctor Normal. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFC, utilizando cargas variando de 40 a 640 kPa, que resultaram em deformações específicas de 6,5%, 10,5% e 9,5% para as misturas com 5%, 15% e 25% de argila bentonítica, respectivamente. Concluiu-se que, nas condições experimentais do ensaio de adensamento unidirecional deste estudo e para as cargas aplicadas, as misturas não apresentam recalques capazes de causar danos estruturais significativos ao aterro sanitário.

PALAVRAS-CHAVE: Misturas solo-bentonita, Caracterização Geotécnica, Adensamento, Liner, Aterro sanitário.

ABSTRACT: The present study aimed to predict the settlements experienced by soils used as liner in a sanitary landfill located in the semi-arid region of Paraíba, Brazil, using the unidirectional consolidation test. The investigated soils included the local natural soil and a bentonite clay from Boa Vista-PB, collected from the area adjacent to the landfill during the construction of the liner, composed of 20% bentonite clay (by mass). After collection, the materials were sent to the Federal University of Campina Grande for geotechnical characterization and unidirectional consolidation testing. Specimens were prepared with mixtures containing 5%, 15%, and 25% bentonite clay, compacted at the optimum moisture content using Standard Proctor energy. Tests were conducted at the Soil Mechanics Laboratory of UFC, applying loads ranging from 40 to 640 kPa, resulting in specific deformations of 6.5%, 10.5%, and 9.5% for the mixtures with 5%, 15%, and 25% bentonite clay, respectively. It was concluded that under the experimental conditions of this study's unidirectional consolidation test and for the applied loads, the mixtures do not exhibit settlements capable of causing significant structural damage to the sanitary landfill.

KEYWORDS: Soil-bentonite mixtures, Geotechnical Characterization, Compression, Liner, Landfill.

1 INTRODUÇÃO

As camadas de base dos aterros sanitários, conhecidas como *liners*, desempenham um papel crucial na prevenção da contaminação do solo e do lençol freático. Para otimizar a vida útil dos aterros, é essencial investigar diversos aspectos construtivos, especialmente as características dos solos utilizados. Dentre essas

características, Tapahuasco (2009) enfatiza a importância da análise dos recalques nos aterros, pois isso permite avaliar a integridade das estruturas e o desempenho após o confinamento.

Considerando a relevância da avaliação de recalques nos *liners*, o estudo detalhado do comportamento mecânico dos *liners* é crucial para o funcionamento eficiente dos aterros, sendo fortemente influenciado pelo confinamento e pela carga da massa aterrada. Na composição dos *liners*, são comumente utilizadas misturas de solo local, bentonita, geomantas, entre outros materiais, sendo a adição de bentonita bastante utilizada, pois garante uma redução da permeabilidade à água da camada.

Devido ao fato de ser composta principalmente por argilominerais do tipo 2:1, as bentonitas empregadas na confecção de *liners* devem ser submetidas a uma análise rigorosa do processo de adensamento, pois isso pode resultar em recalques capazes de afetar a estabilidade das células de resíduos. Portanto, o objetivo deste estudo é prever os recalques em solos utilizados como *liner* em um aterro sanitário localizado no semiárido paraibano, utilizando ensaio de adensamento unidirecional com amostras compactadas no ponto ótimo, sob energia de compactação Proctor Normal.

2 METODOLOGIA

2.1 Campo Experimental

O aterro sanitário analisado ocupa uma área total de 64 hectares, dos quais 39,4 hectares são dedicados à construção de células para acondicionamento dos RSU. Em operação desde julho de 2015, foi projetado para receber 350 toneladas de resíduos por dia, com uma expectativa de vida útil de 25 anos. Atualmente, recebe aproximadamente 700 toneladas diárias de resíduos dos municípios de Campina Grande e região (Figura 1).

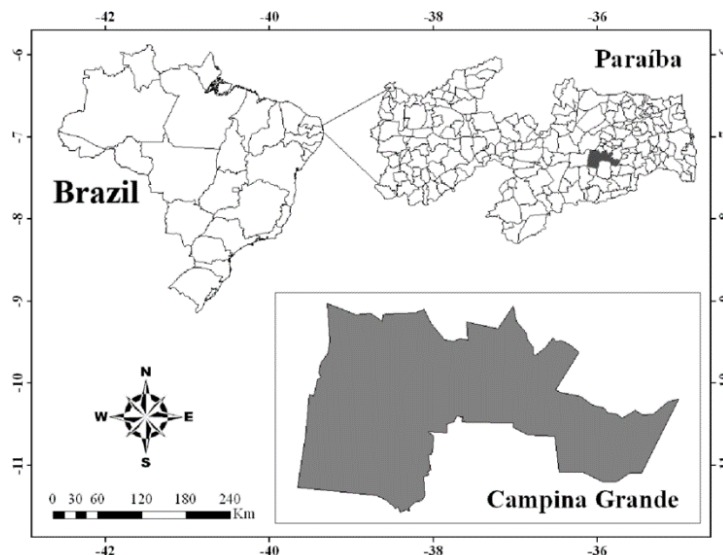


Figura 1. Localização do município de Campina Grande-PB. Fonte: Licarião, Bezerra e Alves (2013).

2.2 Coleta de Material

O solo bentonítico utilizado neste estudo foi coletado de uma jazida em Boa Vista - PB, conhecida por sua abundância desse material. O *liner* do aterro sanitário investigado já utiliza uma mistura de solo natural da área do próprio aterro e solo bentonítico, com uma proporção de 20% de solo bentonítico em massa. Amostras deformadas desses materiais foram diretamente coletadas na área circundante ao aterro, localizada nas coordenadas 7° 16' 26''S 36° 01' 05''W. A pesquisa foi conduzida em colaboração entre a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e a Universidade Federal do Ceará (UFC), e as amostras foram inicialmente enviadas ao Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFCG (LGA/UFCG) para posterior transporte ao Laboratório de Mecânica dos Solos da UFC, em Fortaleza-CE.

2.3 Ensaios Laboratoriais

Um estudo investigou como diferentes teores de bentonita afetam a compressibilidade e as propriedades do solo utilizado no liner (revestimento) de um aterro sanitário. Foram analisadas proporções de 5%, 15% e 25% (em massa) de solo bentonítico. O objetivo era verificar como a compressibilidade se comporta em misturas com teores menores e maiores do que a composição padrão adotada para os liners do aterro, que é de 20%. Todos os ensaios foram realizados com amostras deformadas, pois a coleta de amostras indeformadas do liner executado em campo estava inviabilizada pela massa de resíduos que as cobria. A caracterização geotécnica das misturas seguiu os métodos descritos na Tabela 1

Tabela 1. Ensaios de caracterização geotécnica realizados e suas metodologias.

Ensaio	Metodologia
Preparação das amostras	NBR 6457 (2016)
Umidade higroscópica	NBR 6457 (2016)
Massa específica dos grãos	NBR 6508 (2016)
Granulometria	NBR 7181 (2016)
Compactação	NBR 7182 (2016)
Limite de liquidez	NBR 6459 (2016)
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (2016)
Ensaio de adensamento unilateral	NBR 16853 (2020)

Os corpos-de-prova (CPs) foram moldados no ponto ótimo de compactação sob energia Proctor Normal (Figura 2A). Posteriormente, foram saturados e se iniciaram os carregamentos (Figura 2B).

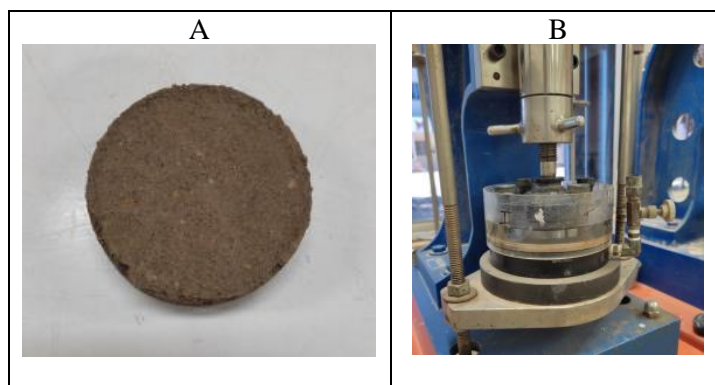


Figura 2. Ensaio de adensamento unilateral. A) Corpo-de-prova após moldagem no anel da célula de adensamento; B) Carregamentos sendo impostos ao corpo-de-prova durante o ensaio.

O ensaio de adensamento unidirecional foi conduzido no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFC. Durante o ensaio, foram aplicadas cargas nos seguintes valores: 40, 80, 160, 320 e 640 kPa. Essas cargas foram selecionadas com base no estudo realizado por Araújo Neto (2016), que investigou os recalques ocorridos no mesmo aterro sanitário considerando cenários onde ocorre o alteamento total das células.

3 RESULTADOS

3.1 Granulometria

A composição granulométrica dos solos (Solo natural local e solo bentonítico) e das misturas analisadas (5%, 15% e 25%) encontram-se apresentados na Tabela 2. Cabe salientar que a classificação das frações granulométricas foi realizada em acordo com a NBR 6502 (2022).

Tabela 2. Granulometria das misturas de solos (solo natural local + bentonita)

Fração	Sn	5%	15%	25%	Sb
Pedregulho (%)	20,51	10,6	8,6	0,41	0
Areia grossa (%)	3,52	10,2	8,7	3,6	3,2
Areia média (%)	8,21	21,2	19,6	22,6	4,5
Areia fina (%)	52,25	41,1	41	48,8	4,1
Silte (%)	8,31	16,9	13	11,6	30,2
Argila (%)	7,2	10	9,1	13,1	58
W (%)	20,51	10,6	8,6	0,41	0

Sn: solo natural local; Sb: solo bentonítico; $\gamma_{d,max}$: peso específico dos grãos; W: umidade higroscópica.

Com o aumento do teor de bentonita, observou-se um aumento nas porcentagens de finos e uma diminuição nos percentuais de pedregulho e areia. Esse comportamento também foi identificado no estudo realizado por Morandini e Schneider (2017) e por Costa (2019). De acordo com Morandini e Schneider (2017), o aumento da fração de argila devido à adição de bentonita era esperado e resulta em alterações nas propriedades mecânicas e hidráulicas do solo. Além disso, com base na granulometria das misturas, podemos inferir que o aumento do percentual de argila terá um impacto direto na ocorrência de recalques por adensamento. Isso ocorre porque, em solos com maior porcentagem de finos, a drenagem é lenta e a dissipação de pressões neutras ocorre ao longo do tempo.

3.2 Limites de Atterberg

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados encontrados para o Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP).

Tabela 3. Resultados dos Limites de Atterberg para as misturas analisadas.

Parâmetro	Sn	5%	15%	25%	Sb
LL (%)	NL	NP	24,3	31,2	178,0
LP (%)	NP	NP	19,3	20,2	60,0
IP (%)	0	NP	5,0	11,0	118,0

Sn: solo natural local; Sb: solo bentonítico.

O LL aumentou significativamente à medida que houve incremento no teor de solo bentonítico. Essa tendência é consistente com os resultados encontrados por Kumar e Yong (2002), Khalid *et al.* (2019) e Morandini e Schneider (2017), que também observaram um aumento linear desse índice com a adição de bentonita à mistura. Segundo Pinto (2006), Terzaghi estabeleceu uma correlação entre o LL e o índice de compressão do solo. Assim, podemos inferir que a compressibilidade das misturas também aumenta com a adição de solo bentonítico.

A bentonita é comumente conhecido por ser um solo de alta plasticidade, e os resultados das misturas demonstraram o esperado aumento nos resultados e IP e LL. De acordo com a classificação do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), as misturas com 5% e 15% de bentonita são classificadas como areia-siltosa (SM), enquanto a mistura com 25% é classificada como areia argilosa (SC). No estudo conduzido por Morandi Ni e Schneider (2017), observou-se que, com maiores adições de solo bentonítico, houve uma

maior plasticidade e incremento na compressibilidade. Ademais, no estudo realizado por Bicalho *et al.* (2017), identificou-se que o IP também possui uma relação linear com a deformabilidade do solo.

3.3 Compactação

O ensaio de compactação sob energia de Proctor Normal foi realizado para os três teores: 5, 15 e 25% e as curvas de compactação para cada teor podem ser analisadas no Gráfico 1.

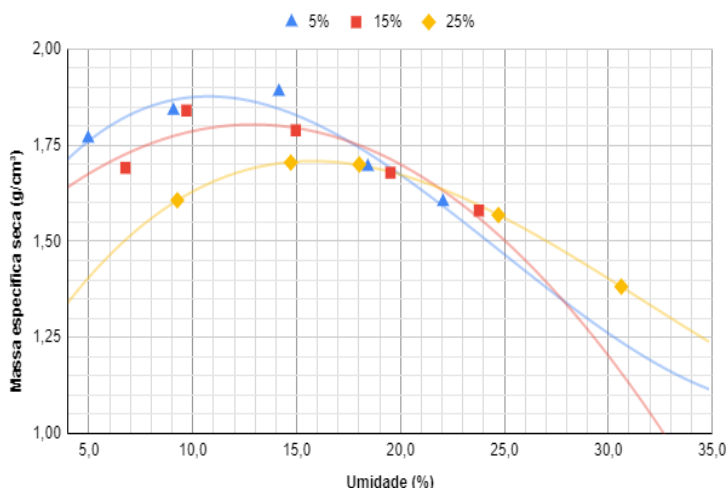


Gráfico 1. Curvas de compactação das misturas 5, 15 e 25%, sob energia Proctor Normal.

Com o aumento do teor de bentonita nas misturas, ocorreu redução na massa específica aparente seca do material e o aumento da umidade ótima. O aumento da umidade é decorrente da capacidade da bentonita de absorver água, sendo razoável um aumento na umidade com o aumento do teor de bentonita.

Segundo Sobti e Singh (2017), tal padrão ocorre por conta da formação de um gel ao redor das partículas do solo, que ocasiona um aumento no tamanho efetivo, aumentando assim o percentual de vazios e reduzindo a massa específica aparente seca. Esse comportamento também foi observado nos estudos de Khalid *et al.* (2019), Sobti e Singh (2017), Costa (2019) e Kumar e Yong (2002). Como observado por Araújo Neto (2016), o aumento do percentual de vazios favorece a capacidade de armazenamento de líquidos, o que, caso não haja uma drenagem adequada, pode retardar o processo de adensamento.

3.4 Ensaio de adensamento unidirecional

Os CPs contendo amostras de solo deformadas das misturas analisadas, tiveram seus índices físicos aferidos, os quais encontram-se ilustrados na Tabela 4, enquanto que nos Gráficos 2A, 2B, 2C, 2D e 2E, estão apresentadas a variação de altura ao longo do tempo ocorrida para estágios de carregamentos de 40 kPa, 80kPa, 160 kPa, 320 kPa e 640kPa, respectivamente.

Tabela 4. Índices Físicos dos CPs no ensaio de adensamento unidirecional.

Solo Bentonítico (%)	5	15	25
Umidade de moldagem (%)	8,8	10,7	16,6
Peso específico aparente seco (kN/m³)	18,8	18,5	17,7
Índice de vazios inicial	2,70	2,68	2,45

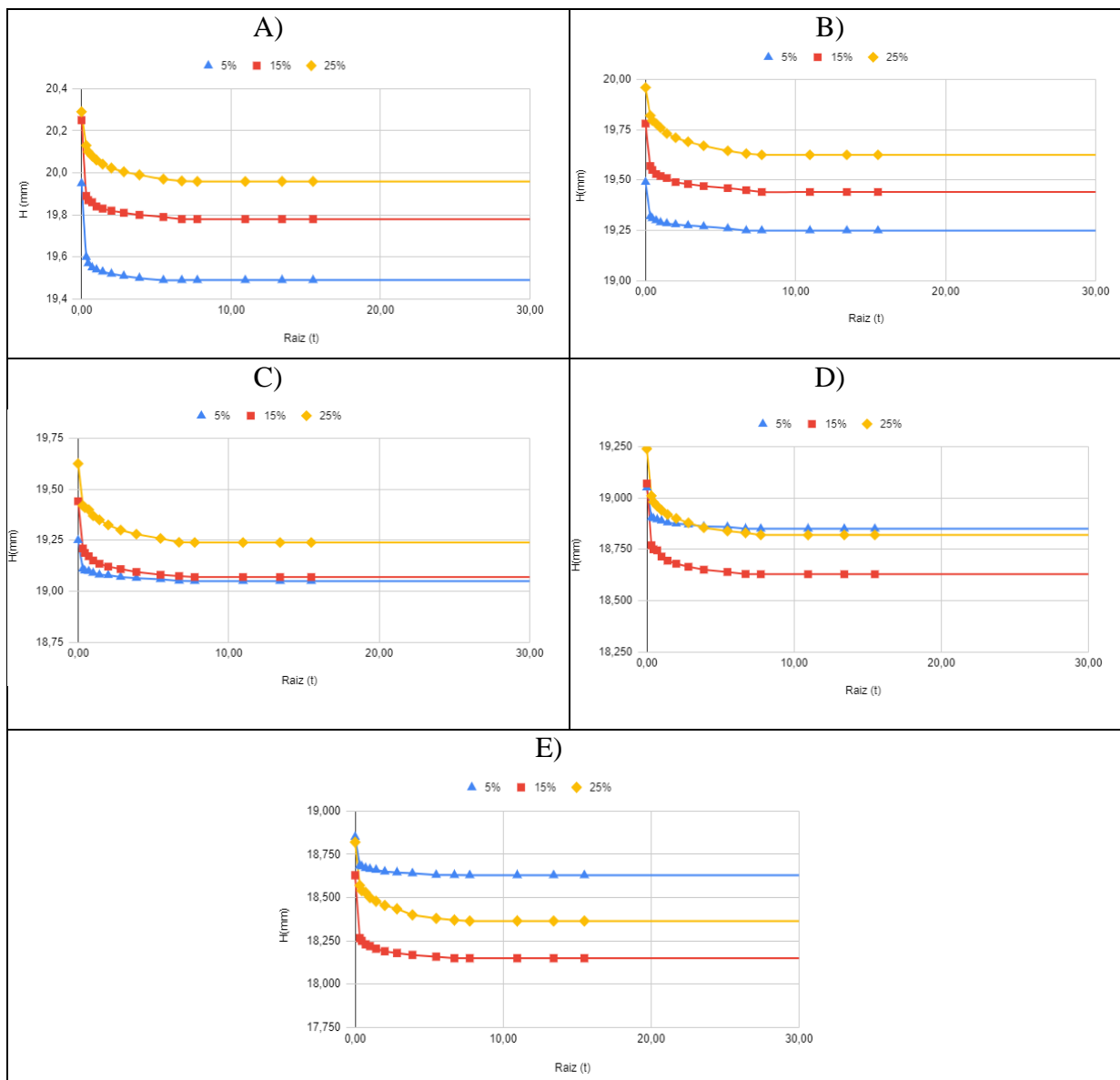


Gráfico 2. Variação das alturas ao longo do tempo, considerando as cargas: A) 40 kPa; B) 80 kPa; C) 160 kPa; D) 320 kPa; E) 640 kPa.

Ao observar o comportamento da variação da altura ao longo do tempo para as três misturas estudadas, verifica-se que não houve um padrão linear, visto que a amostra de 15% foi a que apresentou maiores deslocamentos verticais. Na Tabela 5 constam os deslocamentos totais dos CPs.

Tabela 5. Deslocamentos verticais totais das misturas.

DESLOCAMENTOS TOTAIS			
Solo Bentonítico	5%	15%	25%
Deslocamentos verticais (mm)	1,321	2,100	1,925
Deslocamentos verticais (%)	6,61	10,5	9,63

Assim, é possível inferir que adições de bentonita afetam os recalques do solo, porém não de forma linear, o que permite inferir que existem teores mais apropriados que outros para minimizar os recalques. De forma semelhante ao obtido com as misturas, Sobti e Singh (2017) observaram que o efeito da bentonita nas características geotécnicas foi maior quando o teor de bentonita ultrapassou 10%.

Bicalho *et al.* (2002) observaram ainda que, para teores um pouco superiores a 20% de bentonita a matriz argilosa domina o comportamento da mistura sem que haja contato entre os grãos de areia, e isso contribui para uma normalização do índice de plasticidade das misturas, que também influi diretamente na compressibilidade da amostra.

No Gráfico 3 encontram-se ilustradas as relações entre os índices de vazios versus tensão aplicada, em escala logarítmica, para os estágios de carregamento e descarregamento. A partir desses gráficos, foi possível determinar os coeficientes de compressão, conforme se observa na Tabela 6.

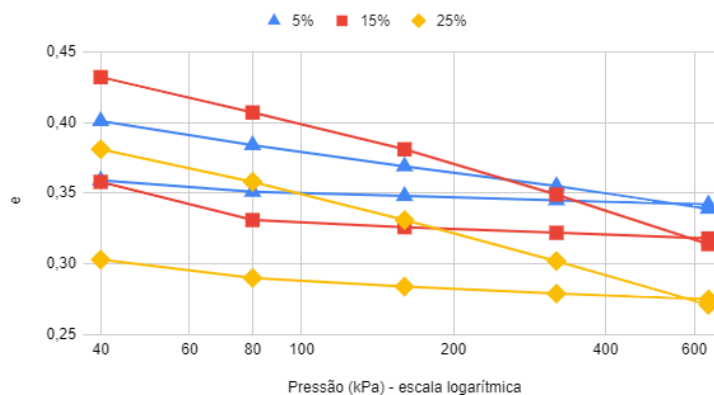


Gráfico 3. Índice de vazios versus logaritmo das pressões aplicadas.

Tabela 6 - Índices de compressão das amostras

Solo Bentonítico	5%	15%	25%
Cc	0,035	0,106	0,090

É possível observar que a amostra contendo 15% de solo bentonítico mostra-se mais compressível do que as demais, sendo a de 5% a menos compressível. Isso confirma que o aumento do teor de bentonita tende a aumentar a compressibilidade do solo natural, porém não de forma linear. Cabe salientar que, conforme destacado por Terzaghi, Peck e Mesri (1996), a determinação da deformação específica que causa ruptura durante o ensaio de adensamento depende de fatores como a composição do solo, seu estado inicial, a carga aplicada e a taxa de aplicação dessa carga. Portanto, conclusões acerca da ruptura das misturas analisadas só podem ser realizadas mediante a execução de ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial, considerando as condições de campo às quais o liner estará submetido.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mistura com 15% de bentonita demonstrou a maior compressibilidade, com uma deformação específica de 10,5%. Recomenda-se a realização de ensaios de compressão triaxial em condições não-drenadas para determinar as tensões de ruptura e a deformação específica máxima durante o rompimento. Isso contribuirá para garantir a segurança na utilização desses solos em liners de aterros sanitários.

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo de Geotecnia Ambiental da UFCG pela colaboração e ao Laboratório de Mecânica dos Solos da UFC – Campus do Pici pela prontidão na execução dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO NETO, C. L. de. "Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão das deformações de aterros sanitários." ("Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e ... - Ibict") 2016. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e

Ambiental) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6.457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.

_____. NBR 6.459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.

_____. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016c.

_____. NBR 7.180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016d.

_____. NBR 7.181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016e.

_____. NBR 7.182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016f.

_____. NBR 16853: Solo – Ensaio de adensamento unidirecional. Rio de Janeiro, 2020.

_____. Solos e rochas – Terminologia. Rio de Janeiro, 2022.

BICALHO, K. V., CAVASSANI, M. R., REINE CASTELLO, R., UBERESCILAS, F.P. *Características de Compressibilidade de Argilas Arenosas Moles*, 2002. 8 Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, v. 1, 303-312.

COSTA, W. W. M. L. *Estudo da permeabilidade em solos utilizados em camada de base de aterro sanitário no semiárido paraibano*. 2019. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

KHALID, U.; REHMAN, Z. U.; LIAO, C.; FAROOQ, K.; MUJTABA, H. Compressibility of Compacted Clays Mixed with a Wide Range of Bentonite for Engineered Barriers. *Arabian Journal for Science and Engineering*, [S.L.], v. 44, n. 5, p. 5027-5042, 2 Jan. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13369-018-03693-7>.

KUMAR, S.; YONG, W. Effect of Bentonite on Compacted Clay Landfill Barriers. (“Sci-Hub | Effect of Bentonite on Compacted Clay Landfill Barriers. Soil ...”) *Soil And Sediment Contamination: An International Journal*. Carbondale, p. 71-89. 15 Jan. 2002.

LICARIAO, M. R., BEZERRA, D. M., ALVES, R. R. (2013). *Wild birds as pets in Campina Grande, Paraíba State, Brazil: an ethnozoological approach*. (“Wild birds as pets in Campina Grande, Paraíba State, Brazil: An ...”) *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 85(1), 201-213.

MORANDINI, T. L. C.; SCHNEIDER, V. C. Compressibilidade em misturas de solo laterítico, bentonita e fibras para uso em barreiras de fluxo. *Holos Environment*, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 66, 16 jul. 2017. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v17i1.11887>.

SOBTI, J., SINGH, S. K. (2017). Sorption behavior of heavy metals in sand-bentonite-coal ash mixes for use as a liner material in landfills. (“Experimental and Numerical Studies on Usage of Soil ... - Springer”) *International Journal of Geotechnical Engineering*.

TAPAHUASCO, W. F. C. (2009). *Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um novo modelo de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação*. (“(PDF) Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um ...”) (Doctoral dissertation, Tese de Doutorado–Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil, UnB).

TERZAGHI, K., PECK, R.B. (1987) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 685 p.