

**DESEMPENHO HIDRÁULICO DE SOLO ENRIQUECIDO COM BENTONITA  
PARA USO EM LINERS DE ATERRO SANITÁRIO**  
**HYDRAULIC PERFORMANCE OF SOIL ENRICHED WITH BENTONITE FOR  
USE IN LANDFILL LINERS**

Nicole Martins Aragão<sup>1\*</sup>  
Thiago Fernandes da Silva<sup>2\*\*</sup>  
Paulo Rubens Melo Camelo<sup>3\*\*\*</sup>

**RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo comparar o desempenho hidráulico de camadas de solo compactado (CCL) melhoradas com diferentes teores de bentonita sódica e cálcica com o solo local de Crateús utilizado na impermeabilização de aterros sanitários. Para isso, foram realizadas análises de caracterização física e geotécnica dos materiais e de suas misturas, a fim de avaliar a influência da bentonita na condutividade hidráulica. Os ensaios laboratoriais incluíram testes de compactação, permeabilidade e limites de consistência, permitindo investigar as modificações nas propriedades do solo com a adição de diferentes percentuais de bentonita. Os resultados demonstraram que o incremento de bentonita sódica e cálcica alterou significativamente a condutividade hidráulica do solo, destacando-se as misturas com bentonita sódica como as mais eficientes na redução da permeabilidade. As misturas com 10% de bentonita sódica atingiram condutividade hidráulica inferior a  $10^{-9}$  m/s, atendendo às exigências da USEPA para camadas de impermeabilização em aterros sanitários. Conclui-se que a bentonita sódica, em comparação com a bentonita cálcica, apresenta melhores resultados em relação a permeabilidade para aplicação em camadas de impermeabilização de aterros sanitários, proporcionando maior segurança contra a infiltração de contaminantes no solo e nos lençóis freáticos.

**Palavras-chave:** impermeabilização; camada de argila compactada; bentonita.

**ABSTRACT**

This work aims to compare the hydraulic performance of compacted soil layers (CCL) improved with different sodium and calcium bentonite contents with the local soil from Crateús

---

<sup>1\*</sup> Estudante de Engenharia Ambiental e Sanitária no Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará.

<sup>2\*\*</sup> Professor Assistente no Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará.

<sup>3\*\*\*</sup> Técnico no Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará.

used for waterproofing landfills. To this end, physical and geotechnical characterization analyzes of the materials and their mixtures were carried out in order to evaluate the influence of bentonite on hydraulic conductivity. The laboratory tests included compaction, permeability and consistency limits tests, allowing the investigation of changes in soil properties with the addition of different percentages of bentonite. The results demonstrated that the increase in sodium and calcium bentonite significantly changed the hydraulic conductivity of the soil, highlighting the mixtures with sodium bentonite as the most efficient in reducing permeability. Mixtures with 10% sodium bentonite achieved hydraulic conductivity of less than  $10^{-9}$  m/s, meeting USEPA requirements for waterproofing layers in landfills. It is concluded that sodium bentonite, compared to calcium bentonite, presents better results in relation to permeability for application in waterproofing layers of landfills, providing greater security against the infiltration of contaminants into the soil and groundwater.

**Keywords:** waterproofing; compacted clay layer; bentonite.

Data de Submissão: 28/09/2024.

Data de aprovação: XX/XX/XXXX.

DOI: 10.0000/0000-057x20160000.

## 1. INTRODUÇÃO

Em aterros sanitários, as camadas de revestimento de base (liners) são essenciais para evitar a contaminação do solo e dos lençóis freáticos por poluentes gerados pela biodegradação dos resíduos. Essas camadas devem atender a critérios geotécnicos que garantam baixa permeabilidade ( $<1 \times 10^{-9}$  m/s), durabilidade, resistência mecânica e compatibilidade com os resíduos (Caetano et al., 2022). Tradicionalmente, o uso de solos argilosos compactados tem sido predominante, mas, com o avanço da tecnologia, geossintéticos como geomembranas e geocompostos bentoníticos (GCL - Geosynthetic Clay Liners) têm sido cada vez mais utilizados como alternativas.

O uso de camadas de argila compactada (CCL - Compacted Clay Liners) continua sendo uma solução econômica e sustentável, especialmente em regiões onde há disponibilidade de solos adequados, capazes de regenerar naturalmente. No entanto, em locais onde solos de baixa permeabilidade são escassos, a adição de bentonita, tanto sódica quanto cálcica, tem sido adotada como estratégia para melhorar as propriedades de impermeabilização do solo

(REBELO, 2003; KNOP, 2007). A bentonita sódica, com sua maior capacidade de expansão ao ser umedecida, é amplamente utilizada para reduzir a permeabilidade, enquanto a bentonita cálcica, com menor expansibilidade, pode ser aplicada em projetos que demandam requisitos menos rigorosos de vedação.

Embora os geossintéticos ofereçam alta eficiência como barreiras impermeáveis, eles apresentam custos elevados, limitando sua adoção em determinados projetos (MANASSERO et al., 2018). Por isso, a utilização de CCL, mesmo com as limitações relacionadas à espessura da camada e à variação de volume em ciclos de umedecimento e secagem, permanece uma alternativa viável, principalmente em locais onde a disponibilidade de solos adequados é baixa e o uso de geossintéticos não é economicamente viável (SHANKAR, 2017).

Diante da predominância de lixões no cenário nacional e das restrições técnicas e financeiras para a implantação de aterros sanitários, este estudo propõe investigar o uso de misturas de solo local com bentonita sódica e cálcica como alternativa para a impermeabilização de aterros. O objetivo é avaliar o comportamento hidráulico dessas misturas, identificando sua eficácia como CCL e propondo soluções técnicas que possam contribuir para a execução de aterros sanitários mais seguros e sustentáveis, especialmente em regiões onde há escassez de solos de baixa permeabilidade.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Analisar o comportamento hidráulico de misturas de solo local de Crateús – CE, com bentonita sódica e cálcica para uso como CCL de aterros sanitários.

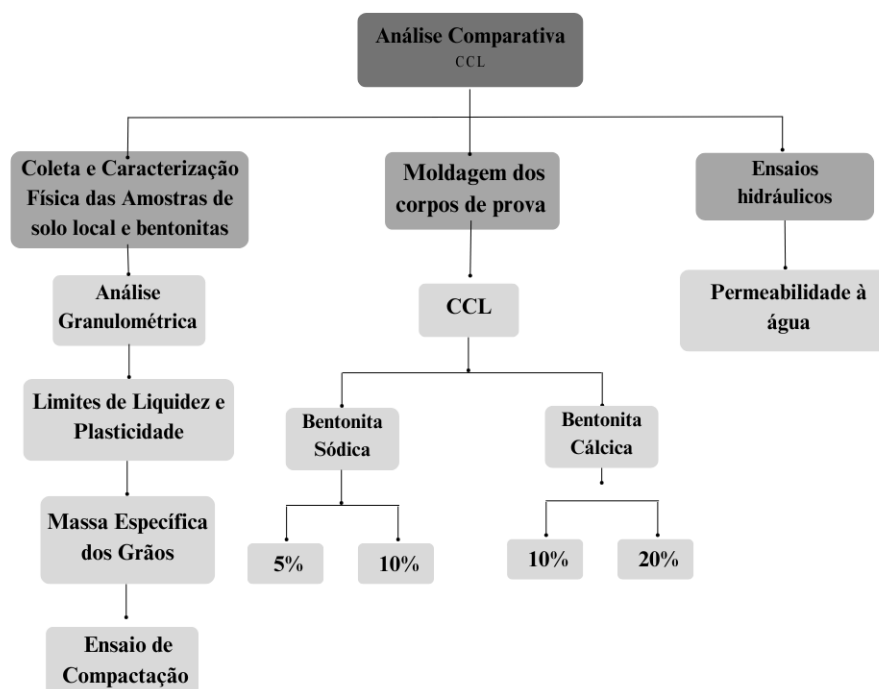
### **2.2 Objetivo específicos**

- Caracterizar o solo local e as bentonitas sódicas e cálcicas.
- Investigar alterações na caracterização física de misturas de solo local pelo incremento de bentonita.
- Comparar a condutividade hidráulica do CCL com diferentes proporções de bentonita.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

As análises comparativas de permeabilidade foram realizadas utilizando CCL enriquecidos com diferentes proporções de bentonita sódica e cálcica ao solo local do lixão de Crateús. As etapas da investigação experimental, que incluem a preparação das amostras e os ensaios de laboratório, estão detalhadas a seguir e ilustradas na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma da Pesquisa



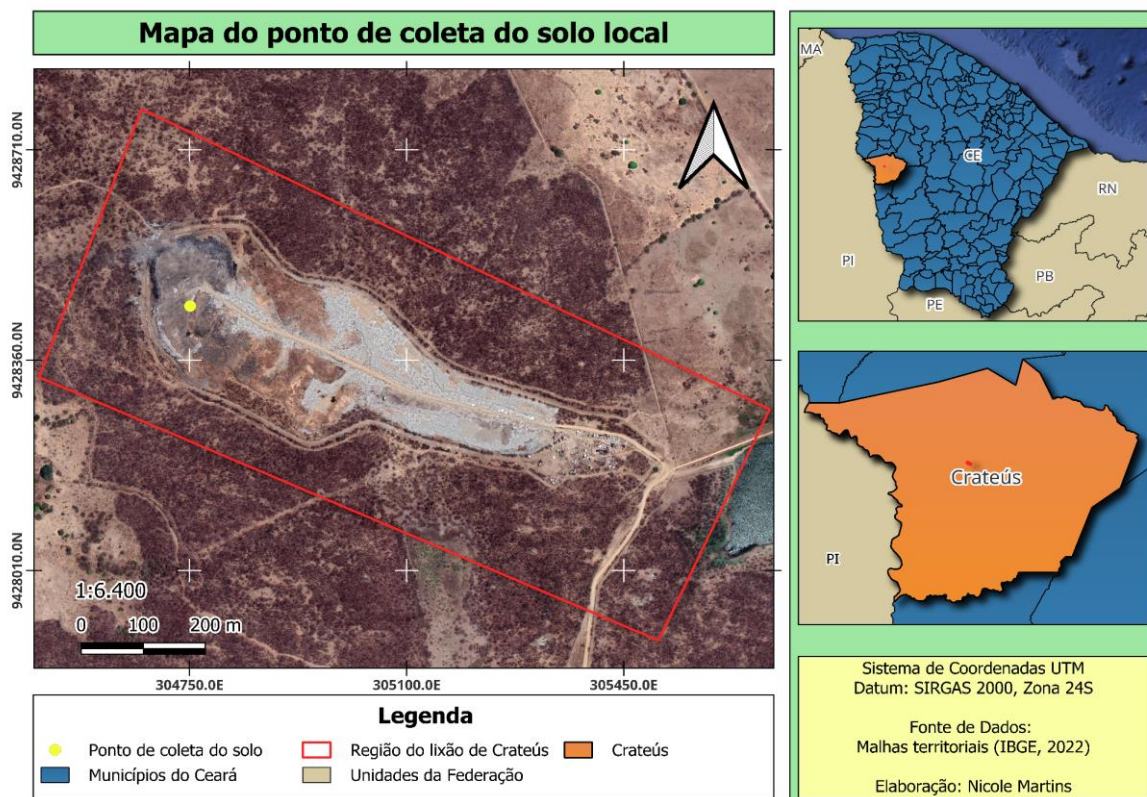
Fonte: elaborada pela autora, 2024.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Solo Local

Para este estudo, as amostras de “solo local”, que será chamada neste trabalho de solo local do lixão (SLL), foram coletadas na área do lixão de Crateús, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 9604 (ABNT, 2016a) e NBR 6457 (ABNT, 2016b), assegurando a representatividade do material.

**Figura 2 - Mapa de localização do local da amostragem.**



**Fonte: elaborada pela autora, 2024.**

Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em baldes plásticos devidamente identificados e, em seguida, transportadas para o Laboratório de mecânica dos solos (LMS) da Universidade Federal do Ceará - Campus Crateús, onde foram submetidas aos ensaios laboratoriais. A Figura 3 ilustra o processo de retirada das amostras.

**Figura 3 - Coleta de solo no lixão de Crateús**



**Fonte: elaborada pela autora, 2024.**

### **3.1.2 Bentonita**

As bentonitas sódica e cálcica são oriundas de jazidas localizadas no município de Boa Vista - PB. As bentonitas extraídas naturalmente se apresentam como cálcicas e o seu uso industrial exige que sejam ativadas com carbonato de sódio (barrilha), para serem transformadas em sódicas (Luz, 2008). Então, essas amostras foram acondicionadas em sacos e levadas ao LMS.

### **3.1.3 Misturas**

Foram preparadas misturas de SLL com bentonita nos seguintes teores: 5% e 10% de bentonita sódica, e 10% e 20% de bentonita cálcica, denominadas SLL + BS 5%, SLL + BS 10%, SLL + BC 10% e SLL + BC 20%, respectivamente. As proporções de solo e bentonita foram determinadas com base na massa seca dos materiais.

O procedimento para a preparação das misturas para o ensaio de compactação e permeabilidade cumpriu os seguintes passos:

- 1- O solo foi peneirado com malha de 2 mm para garantir uniformidade e, em seguida, homogeneizado;
- 2- A bentonita foi adicionada gradualmente nas proporções estabelecidas, e a mistura foi homogeneizada manualmente;
- 3- A água foi incorporada de forma gradual na quantidade necessária, assegurando a completa integração dos materiais.

## **3.2 Métodos**

A metodologia incluiu a preparação de misturas com diferentes teores de bentonita, a realização de ensaios laboratoriais para caracterização das amostras e uma análise comparativa das propriedades dos solos tratados em relação aos critérios de desempenho esperados para camadas de impermeabilização.

### **3.2.1 Ensaio de Caracterização:**

Na fase de caracterização geotécnica, foram conduzidos ensaios independentes no solo natural e nas bentonitas, sódica e cálcica, com o objetivo de determinar suas propriedades. As

misturas de solos com diferentes teores de bentonita foram preparadas em laboratório, utilizando uma balança de precisão de 0,01 g.

Para analisar o comportamento geotécnico de diversas misturas de solo-bentonita e da bentonita cálcica e sódica, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica em amostras desses solos, conforme indicado no Quadro 1.

**Quadro 1 - Ensaios de caracterização geotécnica e mecânica dos solos e respectivas normas utilizadas.**

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

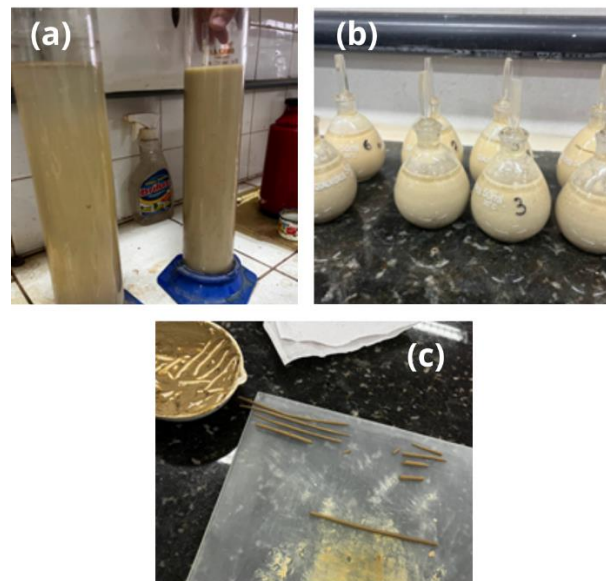
**Fonte: elaborada pela autora, 2024.**

Utilizando os dados dos limites de consistência e a análise granulométrica, procedeu-se à classificação das amostras de solo conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), seguindo as diretrizes da norma D2487 (ASTM, 2011). Para o ensaio de compactação a escolha do cilindro será orientada pelo padrão estabelecido, optando pelo cilindro pequeno. Para a execução do ensaio, será utilizado um soquete pequeno, seguindo as especificações necessárias.

A caracterização da bentonita utilizada neste estudo foi realizada com base em uma adaptação da metodologia descrita por Lukiantchuki (2007), a qual se fundamenta na NBR 7181:2016. Dado o comportamento expansivo característico da bentonita, foi necessário ajustar a quantidade de material nos ensaios para garantir resultados mais precisos.

Para o ensaio de granulometria conjunta (Figura 4), normalmente realizado com 70g de material conforme a NBR 7181:2016, foi utilizada uma quantidade menor, de aproximadamente 25g. Além disso, o material foi deixado em repouso por cerca de cinco dias em uma solução de 125 mL de hexametáfosfato de sódio, a fim de garantir a completa dispersão e hidratação das partículas, já que a bentonita tende a reter água e exige um tempo prolongado para se dispersar adequadamente.

**Figura 4 – Ensaios de Caracterização: (a) Ensaio de Granulometria Conjunta (Sedimentação da Bentonita), (b) Ensaio de massa específica dos grãos, (c) Ensaio de Limite de Plasticidade.**



**Fonte: elaborada pela autora, 2024.**

No ensaio de massa específica dos grãos, a metodologia seguiu a NBR 6458:2016 com adaptações descritas pela autora Lukiantchuki (2007) para lidar com a alta expansibilidade do material. A quantidade de bentonita foi reduzida para um intervalo de 3g por picnômetro de 50 mL (Figura 4), em comparação com os 50g normalmente utilizados para outros solos. Esse ajuste foi necessário devido à tendência da bentonita de aumentar de volume em contato com a água, o que tornaria inviável o uso de maiores quantidades de material em picnômetros de pequeno volume. Para garantir uma hidratação adequada, o material foi deixado em repouso por cinco dias em água destilada antes da realização do ensaio, garantindo que a bentonita estivesse totalmente expandida e hidratada, já que períodos inferiores, como 12 horas, não eram suficientes para essa completa hidratação.

### **3.2.2 Definição das amostras**

A moldagem das amostras utilizadas como CCL será realizada de acordo com os parâmetros obtidos pelo ensaio de compactação correspondente na NBR 7182 (ABNT, 2016). No Quadro 2, mostra a composição das amostras que foram utilizadas no ensaio de compactação e permeabilidade.

**Quadro 2 - Corpos de prova (moldagem)**

<b>Amostras</b>	<b>Composição</b>
-----------------	-------------------



Amostra 1	mistura de SLL com 10% de bentonita cálcica
Amostra 2	mistura de SLL com 5% de bentonita sódica
Amostra 3	mistura de SLL com 20% de bentonita cálcica
Amostra 4	mistura de SLL com 10% de bentonita sódica
Amostra 5	SLL

**Fonte: elaborada pela autora, 2024.**

### 3.2.3 Ensaios de Permeabilidade

Na avaliação da eficiência da impermeabilização, serão conduzidos ensaios de permeabilidade saturada em todas as amostras moldadas com uso de permeâmetro de parede rígida, conforme recomendações da NBR 14.545 (ABNT, 2021).

A norma NBR 14545/2021 foi adotada para conduzir os ensaios de permeabilidade do solo a água, optando pelo Método A, que utiliza contrapressão para assegurar uma saturação efetiva do corpo de prova. Este método é preferível, uma vez que o coeficiente de permeabilidade tende a decrescer com o aumento da quantidade de ar presente no material. O Método A ocorre em um nível controlado de tensões efetivas, sendo mais rigoroso e requerendo equipamentos mais sofisticados, que foram realizados na UFC - Campus Pici.

Os passos para a realização do Método A incluem a preparação do corpo de prova, conforme já descrito na seção 3.1.3, a saturação foi realizada com percolação ascendente, a determinação da curva de percolação através de uma percolação descendente com gradiente hidráulico constante, e o cálculo do coeficiente de permeabilidade, utilizando a equação específica fornecida na norma. É importante ressaltar que durante o adensamento prévio, a altura do corpo de prova é monitorada periodicamente para evitar expansão significativa ou colapso. Foi utilizada a altura de 3 cm do corpo de prova. Este conjunto de procedimentos visou fornecer uma avaliação robusta das propriedades hidráulicas do solo e da eficácia da impermeabilização.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

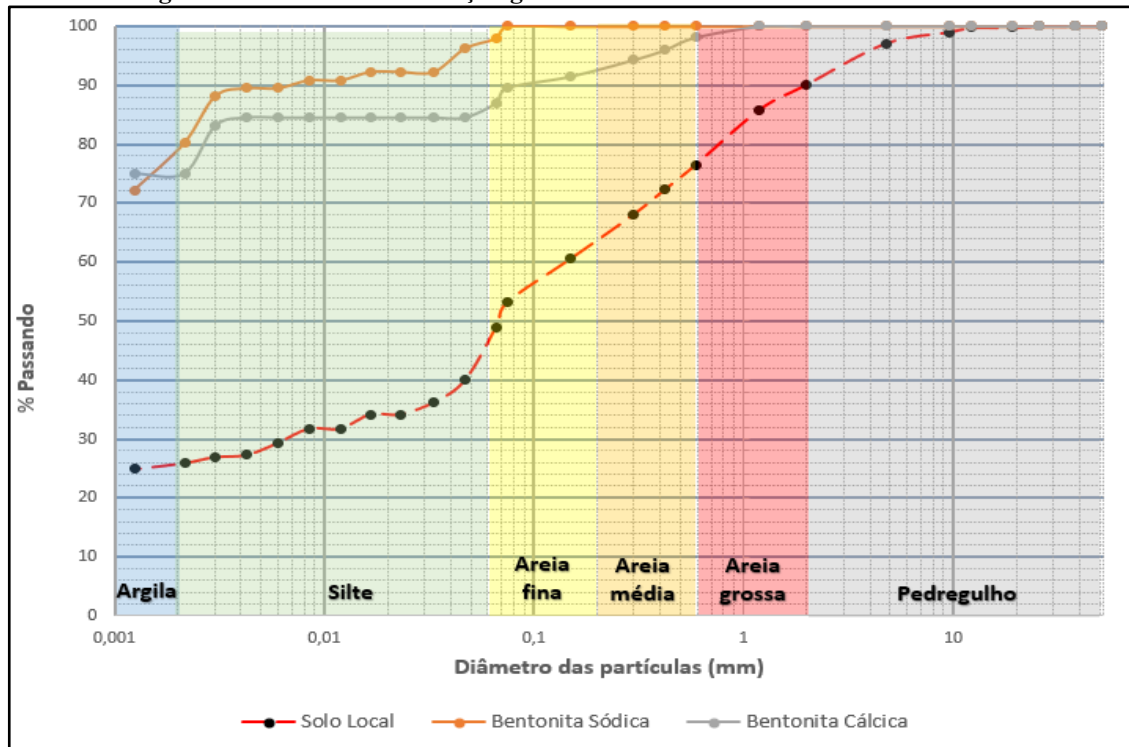
### 4.1 Ensaios de Caracterização

#### 4.1.1 Análise Granulométrica

Esse resultado é fundamental para a classificação do solo e auxilia na definição de seu

comportamento em aplicações de engenharia. Na Figura 5, são apresentadas as curvas granulométricas do SLL e das bentonitas sódica e cálcica, permitindo uma comparação entre as diferentes composições.

**Figura 5 - Curva de distribuição granulométrica do SLL e bentonitas sódica e cálcica.**



Fonte: elaborada pela autora, 2024.

A curva granulométrica mostra uma ampla faixa de tamanhos de partículas no SLL, com uma transição gradual, típica de solos argilosos. A curva sugere uma boa graduação e estabilidade do solo, ideal para camadas de base em aterros sanitários. Os dados sobre a granulometria dos solos serão melhor discutidos segundo os resultados retirados a partir da curva granulométrica (Tabela 1).

**Tabela 1 – Frações dos Solos (SLL e Bentonitas).**

Fração (%)		SLL		Bentonita Sódica		Bentonita Cálcica	
<b>Pedregulho</b>		10,00		0,00		0,00	
<b>Areia</b>	<b>grossa</b>	13,48	44,00	0,00	2,55	1,86	13,80
	<b>média</b>	13,53		0,00		5,70	
	<b>Fina</b>	17,00		2,55		6,23	
<b>Silte</b>		20,00		18,63		11,18	
<b>Argila</b>		26,00		78,82		75,02	

Fonte: elaborada pela autora, 2024.

A fração argilosa dos solos foi de 26% para o SLL, 78% para a bentonita sódica e 75%

para a bentonita cálcica. A curva granulométrica das amostras destaca as diferenças de comportamento entre o SLL e as bentonitas. O SLL, com uma maior fração de areia, apresenta uma permeabilidade relativamente maior quando comparado às bentonitas. Em contrapartida, a bentonita sódica, com uma fração elevada de partículas finas, é altamente coesiva e expansiva, características que as tornam ideal para aplicações em barreiras de impermeabilização. Já a bentonita cálcica, embora também argilosa, tem um comportamento menos expansivo e uma textura mais siltosa, o que pode influenciar na escolha de seu uso para finalidades específicas.

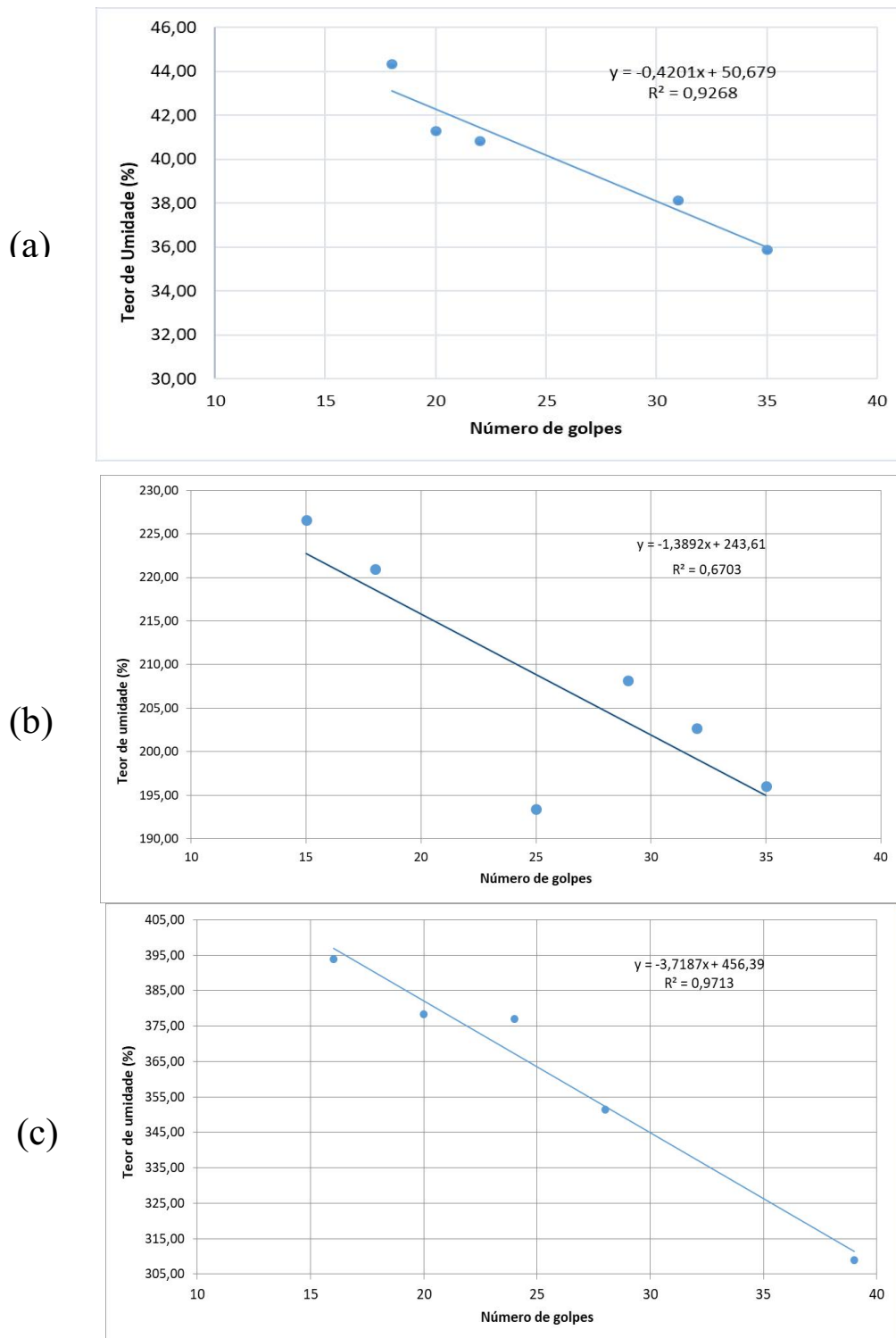
As curvas granulométricas confirmam que a bentonita sódica possui uma granulometria mais fina do que a bentonita cálcica. Paula (2024) corrobora esses resultados, apontando que a bentonita cálcica possui tamanho médio de partículas de 11,2  $\mu\text{m}$ , enquanto a bentonita sódica ativada apresenta um  $d_{50}$  de 1,06  $\mu\text{m}$ , evidenciando a maior finura da sódica. Essas características granulométricas são determinantes para o comportamento geotécnico de cada tipo de material.

A baixa permeabilidade do solo é adequada para impermeabilização, mas a adição de bentonita, conforme investigado neste trabalho, pode melhorar ainda mais a capacidade de retenção de contaminantes e eficiência do sistema. Conforme dito por Bitencourt (2016) a bentonita tem uma massa específica maior que o solo local utilizado no seu estudo, sendo assim, o peso específico das misturas apresenta valores crescentes, sendo o esperado a curva granulométrica deste trabalho também reflete essa variação nas características do material. Enquanto o SLL apresenta partículas mais grossas (areia), que tendem a ter menor massa específica, as bentonitas, ricas em partículas finas e argilosas, exibem uma maior capacidade de compactação e densidade.

#### **4.1.2 Limites de Consistência**

Os limites de consistência fornecem informações importantes sobre a plasticidade do solo, permitindo avaliar como ele se comporta frente a variações de umidade. A Figura 6 apresenta os resultados dos limites de liquidez para o SLL (a), bentonita cálcica (b) e bentonita sódica (c).

**Figura 6 - Limites de Liquidez: (a) SLL; (b) Bentonita Cálcica; (c) Bentonita Sódica.**



**Fonte: elaborada pela autora, 2024**

A curva da Figura 6 (a) indica que o Limite de Liquidez (LL) do SLL é em torno de 40%, valor significativamente menor do que os LL das bentonitas cálcica (209%) e sódica (363%) apresentados na Figura 6 (b,c), respectivamente. Isso reflete a menor capacidade do SLL de absorver água e se expandir, em comparação com as bentonitas, que são altamente expansivas e com maior capacidade de troca catiônica. Esses resultados sugerem que a adição

de bentonita ao SLL pode melhorar suas propriedades expansivas e de impermeabilização, tornando-o mais adequado para barreiras impermeabilizantes.

Os resultados de limite de liquidez (LL) deste estudo apresentam algumas variações em relação à literatura mais antiga. Daniel e Koerner (1995) indicam que o LL da bentonita cálcica geralmente varia entre 100% e 150%, mas no presente estudo, esse valor foi de 209%, sugerindo características mais expansivas. No entanto, o LL permanece menor do que o observado por Barbieri (2022), que obteve 244%. Já para a bentonita sódica, o LL de 363% está dentro da faixa esperada (300% a 500%) relatada por Daniel e Koerner (1995), e próximo aos 505% encontrados por Barbieri (2022). Esses altos valores de LL indicam a alta capacidade de absorção de água e expansividade, propriedade típica das bentonitas, sendo adequados para uso em barreiras impermeabilizantes, onde a plasticidade e expansividade são essenciais para vedação eficaz.

A seguir, a Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para Limite de Plasticidade do SLL e referentes às bentonitas.

**Tabela 2 - Resultados Limite de Plasticidade**

Resultados Umidade	SLL	Bentonita Sódica	Bentonita Cálcica
Ensaio 1 (%)	25,0	47,0	53,7
Ensaio 2 (%)	24,5	46,3	55,0
Ensaio 3 (%)	24,5	43,9	54,3
Média (%)	25	46	54

**Fonte: elaborada pela autora, 2024.**

No presente estudo, o limite de plasticidade obtido foi de 46% para a bentonita sódica e 54% para a bentonita cálcica. Esses valores indicam que ambas as bentonitas possuem alta plasticidade, característica importante para a aplicação em barreiras de impermeabilização.

Comparando com o estudo de Barbieri (2022), que reportou valores de 80% para a bentonita sódica e 100% para a bentonita cálcica, observa-se uma diferença significativa. Esses resultados mais elevados podem ser atribuídos a uma maior pureza ou à ativação industrial das bentonitas analisadas, o que aumenta suas características expansivas e, conseqüentemente, seus

limites de plasticidade.

Já os resultados encontrados por Silva (2017) para a bentonita cálcica, que obteve um limite de plasticidade de 44%, são bastante próximos aos obtidos no presente estudo (54%), visto que ambas as amostras são provenientes da mesma região. Isso sugere uma consistência nos resultados para este tipo de bentonita, reafirmando sua alta plasticidade e comportamento expansivo adequado para o uso em camadas impermeabilizantes.

#### 4.1.3 Classificação dos Solos

Pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), verifica-se que o SLL é uma argila de baixa plasticidade arenosa (CL) ASTM (2017) e as bentonitas como sendo uma argila de alta plasticidade (CH). Na tabela 3 irá apontar a síntese dos resultados da caracterização e assim a classificação dos solos.

**Tabela 3 - Síntese dos resultados de caracterização física.**

		<b>SLL</b>	<b>Bentonita Sódica</b>	<b>Bentonita Cálcica</b>
<b><math>\rho_s(\text{g/cm}^3)</math></b>		2,66	2,84	2,95
<b>Limites de Consistência</b>	LL (%)	40	363	209
	LP (%)	25	46	54
	IP (%)	15	317	155
<b>Índice de Atividade de Skempton</b>		0,6	4	2,1
<b>Classificação Unificada</b>		CL	CH	CH

**Fonte: elaborada pela autora, 2024.**

Com base nos resultados de caracterização apresentados na Tabela 3, a análise da classificação dos solos pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), que tem como base o ensaio de peneiramento, limite de liquidez e plasticidade (Das, 2017), indicou que o SLL é do tipo CL. Isso é coerente com o valor de limite de liquidez (LL) de 40% e o índice de plasticidade (IP) de 15%, ambos característicos de solos menos expansivos e de menor atividade, refletido também no Índice de Atividade (IA) de 0,6, podendo ser classificado como argila normal, por estar dentro do intervalo  $0,75 < A < 1,25$  (Skempton, 1953). Esses resultados indicam que o SLL não é considerado ativo, já que um IA inferior a 0,75 caracteriza solos com baixa atividade e pouca tendência à expansão.

Em contraste, as bentonitas sódica e cálcica foram classificadas como argilas de alta plasticidade (CH), típicas de solos expansivos. A bentonita sódica apresentou um LL de 363%

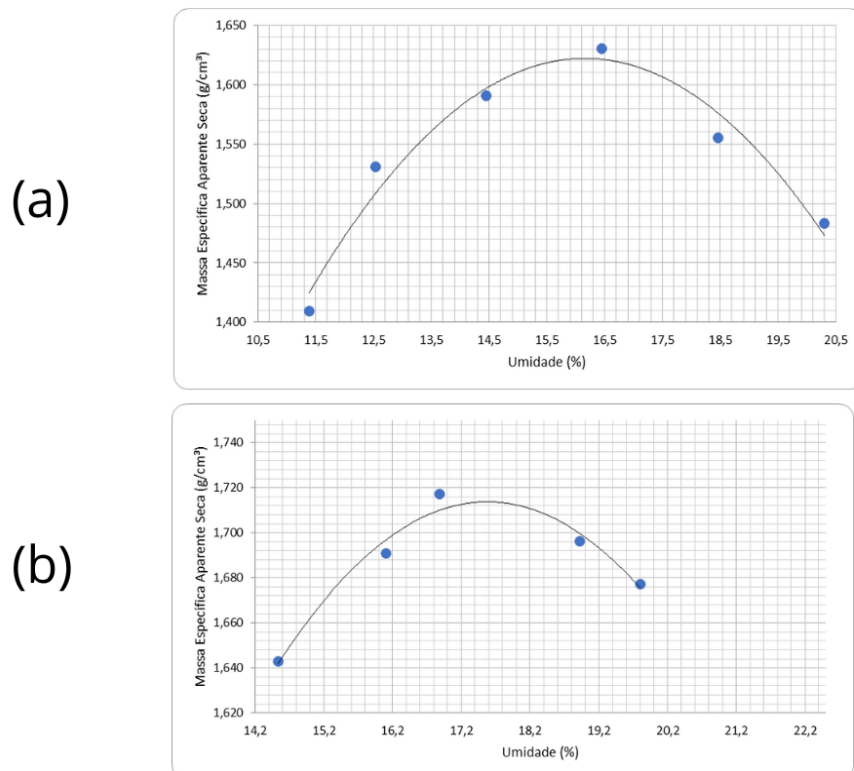
e um IA de 4,0, enquanto a bentonita cálcica teve LL de 209% e IA de 2,1%. Esses altos valores de IA, superiores a 1,0 indicam que ambas são argilas ativas com elevado potencial expansivo, o que corrobora com as observações de Lima (2022) e Ameratunga et al. (2016).

Segundo Rowe et al. (1995) e Araújo (2017), para camadas de base de aterros sanitários, o IP deve ser superior a 7%. Todos os materiais testados atendem a esse critério, com o SLL apresentando IP de 15%, enquanto as bentonitas sódica e cálcica alcançaram valores muito mais elevados, 317% e 155%, respectivamente. Esse comportamento é esperado para argilas montmoriloníticas, que possuem alta capacidade de absorção de água, promovendo expansão significativa.

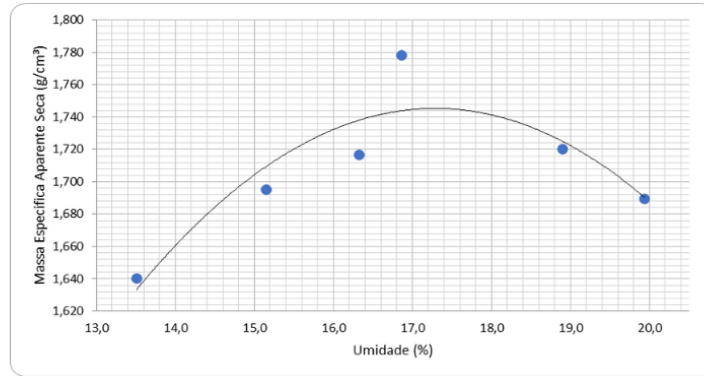
## 4.2 Compactação

As curvas de compactação dos solos de todas as amostras já mostradas na seção 3.2.2, ilustradas na Figura 6, mostram o comportamento do solo e das misturas com diferentes teores de bentonita. Os valores de umidade ótima e massa específica aparente máxima estão organizados na Tabela 4, permitindo uma comparação entre o solo do lixão e as misturas com bentonita sódica e cálcica.

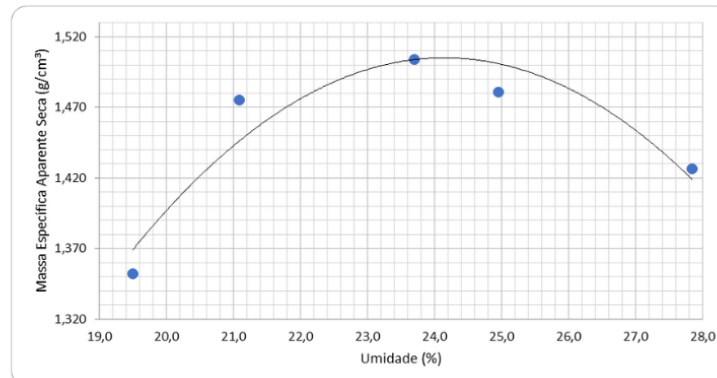
**Figura 6 - Curvas de Compactação: (a) SLL; (b) SLL+ BS 5%; (c) SLL+ BS 10%; (d) SLL + BC 10%; (e) SLL + BC 20%.**



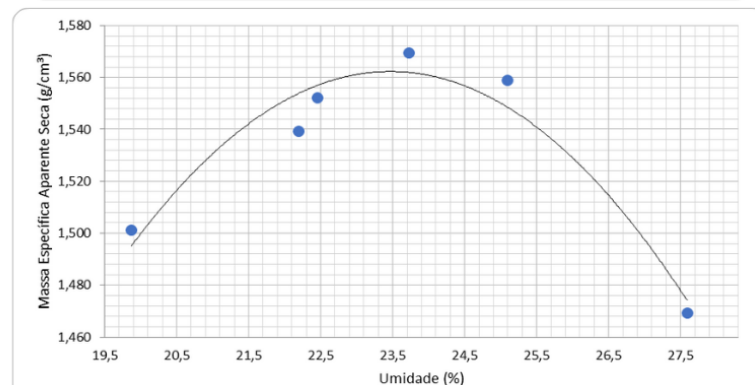
(c)



(d)



(e)



Fonte: elaborada pela autora, 2024.

Tabela 4 - Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Máxima.

Amostra	W ótima. (%)	$\rho_d$ (g/cm³)
SLL	16,2	1,63
SLL + BS 5%	17,5	1,71
SLL + BS 10%	17,2	1,74
SLL + BC 10%	24,0	1,50
SLL + BC 20%	23,5	1,56

Fonte: elaborada pela autora, 2024



A Tabela 4 apresenta os valores de umidade ótima e massa específica aparente máxima para as diferentes misturas de SLL com bentonita sódica e bentonita cálcica. As curvas de compactação (Figura 6) ilustram a variação da massa específica em função da umidade, destacando os seguintes valores experimentais: para o SLL, a umidade ótima foi de 16,2%, com massa específica de 1,63 g/cm<sup>3</sup>. Quando foram adicionados 5% e 10% de bentonita sódica, a umidade ótima aumentou para 17,5% e 17,2%, respectivamente, enquanto a massa específica atingiu 1,71 g/cm<sup>3</sup> e 1,74 g/cm<sup>3</sup>. Já com a adição de 10% e 20% de bentonita cálcica, houve um aumento considerável na umidade ótima ao comparar com o SLL, chegando a 24% e 23,5%, respectivamente, com massas específicas máximas de 1,50 g/cm<sup>3</sup> e 1,56 g/cm<sup>3</sup>.

A análise dos dados mostra que a adição de bentonita sódica levou a um aumento na massa específica aparente máxima, alcançando 1,74 g/cm<sup>3</sup> para a mistura com 10% de BS. Isso sugere uma maior densidade compactada, o que pode ser atribuído à interação entre as partículas finas da bentonita sódica e o solo, promovendo uma compactação mais eficiente. Cunha (2012) reforça essa ideia ao apontar que solos com maior plasticidade tendem a apresentar um maior índice de compressão, o que se reflete nos valores mais elevados de densidade para as misturas com bentonita sódica.

Em contraste, a introdução de bentonita cálcica nas misturas exigiu um teor de umidade significativamente superior, com valores de até 24%, o que indica uma maior demanda por água para a acomodação das partículas. A massa específica máxima obtida foi inferior à das misturas com bentonita sódica, o que pode ser explicado pelo comportamento menos expansivo da bentonita cálcica, resultando em uma menor densidade compactada. De acordo com Massad (2010), a compactação tende a reduzir a compressibilidade do solo, e a adição de materiais coesivos, como as bentonitas, pode resultar em menores variações dos índices de vazios. Nesse contexto, os resultados evidenciam que a bentonita sódica, devido à sua maior plasticidade e capacidade de interação com o solo, proporciona um desempenho superior na compactação, enquanto a bentonita cálcica, embora também melhore a plasticidade do solo, exige maior umidade para atingir uma compactação eficaz.

### **4.3 Permeabilidade**

Os resultados dos ensaios de permeabilidade, realizados com a condição de umidade ótima, estão apresentados na Tabelas 5. São mostrados os valores obtidos tanto para o solo puro quanto para as misturas com bentonita, sendo elas SLL+BS 5% (solo local com bentonita sódica 5%), SLL+BS 10% (solo local com bentonita sódica 10%), SLL+BC 10% (solo local com

bentonita cálcica 10%), SLL+BC 20% (solo local com bentonita cálcica 20%), revelando o comportamento de cada uma das composições frente à permeabilidade.

**Tabela 5 - Condições e resultados dos ensaios de permeabilidade para o SLL e suas misturas.**

Amostra	W mold. (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	K20(m/s)
SLL	18,1	1,61	98,65	$1,83 \times 10^{-7}$
SLL+BS 5%	17,6	1,71	99,53	$4,17 \times 10^{-8}$
SLL+BS 10%	21,2	1,72	98,39	$9,24 \times 10^{-10}$
SLL+BC 10%	24,2	1,50	99,64	$1,86 \times 10^{-8}$
SLL+BC 20%	25,6	1,55	98,86	$1,24 \times 10^{-9}$

**Fonte: elaborada pela autora, 2024**

Os resultados dos ensaios de permeabilidade para o solo local (SLL) e suas misturas com diferentes proporções de bentonita cálcica (BC) e sódica (BS) apresentam uma clara relação entre o incremento de bentonita e a redução da permeabilidade. O SLL, com um coeficiente de permeabilidade de  $1,83 \times 10^{-7}$  m/s, mostra uma permeabilidade significativamente maior em comparação com as misturas com bentonitas, o que é esperado para solos predominantemente argilosos. Com o incremento de 10% de bentonita sódica, o valor de permeabilidade atingiu  $9,24 \times 10^{-10}$  m/s, dentro das especificações da Agência de Proteção Ambiental (United States of Environmental Protection Agency – USEPA)(1993), que estabelece o limite de condutividade hidráulica inferior ou igual a  $10^{-9}$  m/s para as camadas de base de aterros sanitários.

Esse comportamento é consistente com o estudo de Rowe (2000), que aponta que misturas contendo entre 4% e 10% de bentonita apresentam permeabilidades inferiores a  $10^{-9}$  m/s, desde que bem compactadas. No presente estudo, a mistura com 5% de bentonita sódica já reduziu a permeabilidade para  $4,17 \times 10^{-8}$  m/s, demonstrando uma clara tendência de queda na condutividade hidráulica à medida que o teor de bentonita sódica aumenta. Por outro lado, a bentonita cálcica, com 10% e 20% de adição ao solo, apresentou permeabilidades de  $1,86 \times 10^{-8}$  e  $1,24 \times 10^{-9}$  m/s, respectivamente. Esses valores são menores que os do SLL, porém superiores aos obtidos com a bentonita sódica, evidenciando a maior eficiência da bentonita sódica em reduzir a permeabilidade, como também destacado por Lima (2022).

Esse efeito é explicado pela natureza das montmorilonitas presentes na bentonita sódica, que, segundo Silva (2017), possuem alta capacidade de troca catiônica e maior capacidade de expansão ao absorver água, condizente com o seu índice de atividade, o que contribui para uma melhor vedação dos poros entre os grãos de solo, reduzindo a permeabilidade. Por sua vez, a bentonita cálcica tem um comportamento expansivo menor, refletido nos valores de permeabilidade mais elevados. A observação de Lima (2022) sobre a redução da permeabilidade ao se preencher os vazios com partículas finas é corroborada por Srikanth & Mishra (2016), que destacam que o acréscimo de bentonita em solos argilosos pode ocupar esses espaços, contribuindo para a diminuição da condutividade hidráulica.

Além disso, Pinto (2006) menciona que solos argilosos saturados tendem a ter um processo lento de deformação devido à sua baixa permeabilidade. No contexto deste estudo, essa baixa permeabilidade, especialmente com a adição de bentonita sódica, demonstra que as misturas podem se comportar adequadamente como barreiras em aterros sanitários, atendendo às exigências de vedação.

## 5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste estudo permitiu a análise das misturas de SLL com diferentes teores de bentonita cálcica e sódica, com o objetivo de melhorar suas propriedades de impermeabilização, visando o uso como CCL em aterros sanitários. Foram realizados ensaios de caracterização física do SLL, além de ensaios de permeabilidade para avaliar a eficácia das misturas em atender aos critérios de condutividade hidráulica estabelecidos para camadas de base de aterros sanitários. As conclusões deste estudo são:

- O SLL foi classificado como CL (Argila de Baixa Plasticidade Arenosa), apresentou um Índice de Plasticidade (IP) de 11%, sendo assim um solo de plasticidade moderada. Sua massa específica seca máxima foi de  $1,61 \text{ g/cm}^3$  e a umidade ótima de 18,1%. O coeficiente de permeabilidade foi  $1,83 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , indicando uma permeabilidade relativamente alta para ser utilizado sem tratamento em camadas de impermeabilização, o que reforça a necessidade de aditivos como a bentonita.
- As bentonitas sódica e cálcica apresentaram comportamento distinto, influenciado por suas características mineralógicas. A BS, com sua alta capacidade de troca catiônica e expansividade, se destacou na retenção de umidade e modificação do solo, enquanto a BC, com menor capacidade expansiva, demonstrou comportamento menos eficaz, mas ainda significativo na melhora das propriedades geotécnicas.
- O incremento de bentonita, tanto sódica quanto cálcica, afetou diretamente a umidade

ótima e a massa específica seca das misturas. Com 10% de bentonita sódica (BS), a umidade aumentou para 21,2% e a densidade seca máxima foi de 1,72 g/cm<sup>3</sup>, enquanto com 20% de bentonita cálcica (BC), a umidade subiu para 25,6% e a densidade seca foi 1,55 g/cm<sup>3</sup>. Esse comportamento evidencia que a adição de bentonita aumenta a retenção de água e altera a compactação do solo, reduzindo sua densidade seca.

- As misturas com bentonita sódica mostraram uma maior eficiência na redução da permeabilidade. Com 10% de bentonita sódica, a condutividade hidráulica foi reduzida para  $9,24 \times 10^{-10}$  m/s, atendendo ao critério estabelecido pela USEPA para camadas de base de aterros ( $K \leq 10^{-9}$  m/s). A mistura com 5% de bentonita sódica já apresentou uma significativa redução, com um valor de  $4,17 \times 10^{-8}$  m/s, demonstrando o impacto positivo da bentonita sódica na vedação do solo.
- As misturas com bentonita cálcica também reduziram a condutividade hidráulica, porém com menor eficiência em comparação à bentonita sódica. A mistura com 20% de bentonita cálcica alcançou uma condutividade de  $1,24 \times 10^{-9}$  m/s, também dentro das exigências da USEPA, mas ainda superior à mistura com 10% de bentonita sódica. Com 10% de bentonita cálcica, o valor obtido foi de  $1,86 \times 10^{-8}$  m/s, indicando que uma maior proporção de bentonita cálcica é necessária para atingir condutividades próximas ao limite exigido.
- Dessa forma, a incorporação de bentonita sódica e cálcica ao SLL mostrou-se eficaz na melhoria das suas propriedades de impermeabilização. O SLL, quando misturado com bentonita sódica em teores de 10%, demonstrou ser uma alternativa técnica viável para o uso como CCL em aterros sanitários, proporcionando uma solução sustentável e de custo-benefício, especialmente em locais onde a disponibilidade de solos argilosos de alta plasticidade é limitada.

## REFERÊNCIAS

AMERATUNGA, Jay et al. Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering. New Delhi: Springer, 2016.

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016c). 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 (ABNT). NBR 14.545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6.459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7.180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7.181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7.182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9.604: Abertura de Poço e Trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 2016a.

ASTM. American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM D – 2487-17, 2017.

Barbieri, D. M., Lou, B., Dyke, R. J., Chen, H., Zhao, P., Memon, S. A., & Hoff, I. (2022). Calcium bentonite and sodium bentonite as stabilizers for roads unbound. *Cleaner Engineering and Technology*, 6(June 2021), 100372. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100372>

BITENCOURT, Bárbara Maria Oliveira. Influência do teor de bentonita nas propriedades hidromecânicas de um solo compactado. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

By Juliana Lukiantchuki Year: 2007 URL:  
<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-20092007-090827/publico/dissertacao.pdf>

CAETANO, M. O.; SCHUCK, T. E. de S.; CAMACHO, D. L. D.; GOMES, L. P. Liner para impermeabilização de aterros sanitários utilizando resíduos de construção e demolição. Revista AIDIS de Engenharia e Ciências Ambientais. Investigação, Desenvolvimento e Prática, v. 15, n. 1, p. 86–105, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.1.75468>>. Acesso em: 22 set. 2023.

CUNHA, C. L. D. S. Estudo das características de compressibilidade unidimensional e plasticidade de misturas de argila e areia. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.

DANIEL, D. E.; KOERNER, R. M. Waste containment facilities: guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover system. New York: ASCE, 1995. 354 p.

DAS, B. M - Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Ed. THOMSON

KNOP, A. Estudo do comportamento de liners atacados por ácido sulfúrico. 2007. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LIMA, Alisson do Nascimento. Permeabilidade à água e ao lixiviado de misturas solo-bentonita em aterro sanitário. 2022. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2022. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/28723>>.

LUZ, Adão Benvindo da; OLIVEIRA, Cristiano Honório de. Argila-bentonita.(2008).

MANASSERO, M.; BENSON, C. H.; BOUAZZA, A. Solid waste containment systems. ISRM International Symposium 2000, IS 2000, n. September 2021, 2018.

MASSAD, F. Obras de terra - curso básico de geotecnia. 2ª. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

MORANDINI, Thiago Luiz Coelho; DO LAGO LEITE, Adilson. Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes. *Engineering Geology*, v. 196, p. 251-267, 2015.

PAULA, Baptista Leme. Uso de bentonita como aditivo impermeabilizante em argamassa polimérica cimentícia. 2024.

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos. 3ª. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

REBELO, K. M. W. Resistência de interface entre geomembranas e solos através do ensaio de Ring Shear. 2003. 216 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ROWE, R. K. Barrier systems. In: *Geotechnical and Geoenvironmental engineering handbook*. Ontario, Kluwer academic publishers, 2000, chapter 25, p. 25, p. 739-788.

ROWE, R. K.; QUIGLEY, R. M.; BOOKER, J. R., *Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities*, E&FN Spon, London, 1995, 390 p.

SHANKAR, M. Uma; MUTHUKUMAR, M. Comprehensive review of geosynthetic clay liner and compacted clay liner. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2017. p. 032026.

SILVA, Thiago Fernandes da et al. Comportamento geotécnico de liners de aterros sanitários pelo incremento de bentonita. In: *Anais do XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos...* Campinas: Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/comportamento-geotecnico-de-liners-de-aterros-sanitarios-pelo-incremento-de-bent?lang=pt-br>>. Acesso em: 16 nov. 2023.

SILVA, Thiago Fernandes da. Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/390>>.

SKEMPTON, A. W. The Colloidal Activity of Clays, *Proceedings, 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Londres, v. 1, p. 57-61, 1953.

SRIKANTH, V.; MISHRA, A. K. 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, 2016.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA INFLUÊNCIA DO TEOR DE BENTONITA NA  
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE UM  
SOLO ARENOSO UTILIZADO COMO BARREIRA IMPERMEABILIZANTE.

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.