



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CAMPUS DE RUSSAS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAMILA BARBOZA DE OLIVEIRA

**MELHORAMENTO DE LINER PARA IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS
SANITÁRIOS UTILIZANDO ARGILA VERMELHA**

RUSSAS

2023

CAMILA BARBOZA DE OLIVEIRA

MELHORAMENTO DE LINER PARA IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS
SANITÁRIOS UTILIZANDO ARGILA VERMELHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do Campus Russas da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Daniela Lima Machado
da Silva.

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O46m Oliveira, Camila Barboza de.
Melhoramento de liner para impermeabilização de aterros sanitários utilizando argila vermelha / Camila Barboza de Oliveira. – 2023.
52 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Daniela Lima Machado da Silva.

1. Solo. 2. Permeabilidade. 3. Camada de Base. 4. Aterro Sanitário. I. Título.

CDD 620

CAMILA BARBOZA DE OLIVEIRA

MELHORAMENTO DE LINER PARA IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS
SANITÁRIOS UTILIZANDO ARGILA VERMELHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do Campus Russas da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovada em 21 de novembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Daniela Lima Machado da Silva (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC) - campus Russas

Profª. Laís Cristina Barboza Costa (Avaliadora Interna)
Universidade Federal do Ceará (UFC) - Campus Russas

Engenheira Auciane Dyrllen da Silva (Examinadora Externa)

A Deus.

Aos meus pais, aos meus avós, por acreditarem e confiarem em mim, me dando força quando não havia mais. A minha vitória também é de vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser meu suporte quando não acreditei que nada mais poderia dar certo, por me guiar em todos os momentos, ser minha força e minha calma, por ter permitido a realização desse sonho, e nunca me deixado desistir.

Aos meus pais, Adelaide e Fabiano, que mesmo não concordando com minhas escolhas, estiveram comigo, me apoiaram e sonharam junto comigo.

A todos os meus tios e tias que sonharam comigo e me apoiaram de alguma maneira.

A minha orientadora Professora Daniela, aos técnicos Thiago Sena e Myckelle Ferreira, por todo apoio e conhecimento transmitido a mim, ao longo deste ano.

Aos professores Daniela Lima, Camila Maia, Mylene Melo e Esequiel Mesquita, por terem me acolhido como bolsista ao longo do meu percurso acadêmico, me proporcionando diversas experiências engrandecedoras e auxiliando financeiramente com minha estadia na cidade durante este período.

Aos meus amigos Renato Maciel, Daisy Siqueira, Andrea Sousa, Kliweer Oliveira e Orlando Oliveira, que estiveram comigo desde o início, sofrendo e vivendo juntos as melhores histórias.

Aos meus amigos Bruna Elida, Roberta Feijão, Alber Ryan, Pedro Rabelo e Gabriel Santos, que encontrei ao longo dessa jornada, por não me deixarem sozinha nos momentos mais difíceis deste ano, pelas conversas e momentos vivenciados.

Ao Gilmar Silveira e Laís Diógenes, por compartilharem junto comigo essa loucura, sorrirmos, brigamos e rimos bastante, guardarei todos esses momentos com carinho.

Enfim, a todas as pessoas que passaram pelo meu caminho nesse período, que não só dividiram comigo o Campus, a EJ, as aulas, as festas, os projetos, as bolsas, estágio, trabalho, mas também a vida e com certeza me fizeram uma pessoa e profissional melhor.

“Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!” (MARIO SERGIO CORTELLA)

RESUMO

Atualmente, a alternativa mais utilizada para a disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é o Aterro Sanitário, sendo uma das suas camadas constituintes, a camada de base. Esta camada tem a função de impedir o fluxo de lixiviados para o subsolo, corpos hídricos superficiais e lençóis freáticos próximos. Em geral, quando o solo natural não apresenta capacidade suficiente de impermeabilidade que atenda as diretrizes normativas e legislações nacionais, usa-se a composição com outros tipos de materiais, como solos argilosos. O objetivo deste trabalho é realizar análises de permeabilidade a partir de misturas de solos, a fim de determinar a melhor composição para a aplicação na camada de base de um aterro sanitário. O campo experimental para o desenvolvimento desse trabalho, foi o Aterro Sanitário do Vale do Jaguaribe, atualmente em fase de construção, localizado em Limoeiro do Norte - CE, onde foi coletada a amostra de Solo Natural, o Solo Argiloso em uma jazida no Município de Russas - CE. As amostras foram armazenadas no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará do Campus de Russas. Em seguida, os solos Solo Natural, Solo Argiloso e as misturas contendo 40 e 50% de Solo Argiloso foram preparadas para a caracterização geotécnica, determinação do coeficiente de permeabilidade, além da caracterização química e mineralógica. Com base nos resultados, onde pode-se citar a condutividade hidráulicas das misturas com valores de $7,13 \cdot 10^{-7}$ para o Solo Natural, $1,4 \cdot 10^{-8}$ e $1,4 \cdot 10^{-8}$ para as misturas de 40% e 50% de argila consecutivamente. Verificou-se que as misturas atendem aos parâmetros exigidos por norma, com isso, conclui-se que a mistura do Solo Natural onde está localizado o Aterro Sanitário, misturado com o solo argiloso pode ser aplicada na composição da camada de base da referida obra.

Palavras-chave: solo; permeabilidade; camada de base; aterro sanitário.

ABSTRACT

Currently, the most used alternative for the disposal of Urban Solid Waste (MSW) is the Landfill, one of its constituent layers being the base layer. This layer has the function of preventing the flow of leachate into the subsoil, surface water bodies and nearby groundwater. In general, when the natural soil does not have sufficient impermeability capacity to meet regulatory guidelines and national legislation, a composition with other types of materials is used, such as clayey soils. The objective of this work is to carry out permeability analyzes using soil mixtures, in order to determine the best composition for application in the base layer of a landfill. The experimental field for the development of this work was the Vale do Jaguaribe Landfill, currently under construction, located in Limoeiro do Norte - CE, where the Natural Soil sample was collected, the Clay Soil in a deposit in the Municipality of Russias - CE. The samples were stored in the Soil Mechanics and Paving Laboratory of the Federal University of Ceará on the Russas Campus. Then, the Natural Soil, Clay Soil and mixtures containing 40 and 50% Clay Soil were prepared for geotechnical characterization, determination of the permeability coefficient, in addition to chemical and mineralogical characterization. Based on the results, where we can mention the hydraulic conductivity of the mixtures with values of $7.13 \cdot 10^{-7}$ for the Natural Soil, $1.4 \cdot 10^{-8}$ and $1.4 \cdot 10^{-8}$ for the mixtures of 40% and 50% clay consecutively. It was verified that the mixtures meet the parameters required by standard, therefore, it is concluded that the mixture of Natural Soil where the Landfill is located, mixed with clayey soil can be applied in the composition of the base layer of said work.

Keywords: soil; permeability; base layer; sanitary landfill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de aterro sanitário.....	19
Figura 2: Classificação da granulometria do solo segundo a NBR 6502.....	23
Figura 3: Principais APLs mínero-cerâmicos brasileiros.....	26
Figura 4: Localização da área do aterro consorciado regionalizado de Limoeiro do Norte - CE (CGIRS VJ).....	28
Figura 5: Execução da camada de base do Aterro.....	39
Figura 6: Fluxograma contendo os ensaios de caracterização dos solos e das misturas.....	30
Figura 7: Fases dos ensaios de caracterização geotécnica.....	31
Figura 8: Permeâmetro à carga variável da UFC – Campus Pici.....	32
Figura 9: Preparação dos corpo-de-prova.....	33
Figura 10: Leitura do desnível da água na bureta em função do tempo.....	33
Figura 11: Permeâmetro à carga constante da UFC – Campus Pici.....	34
Figura 12: Equipamento para realização de ensaio de fluorescência de raio-x (FRX).....	35
Figura 13: Curvas granulométricas dos solos (SN e argila) e misturas.....	36
Figura 14: Curvas de compactação dos solos (SN e Argila) e misturas.....	41
Figura 15 – Composição mineralógica do solo natural do aterro.....	41
Figura 16 – Composição química da argila.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores típicos de condutividade hidráulica.....	24
Tabela 2: Coeficiente e grau de permeabilidade de solos.....	27
Tabela 3: Caracterização do solo.....	31
Tabela 4: Resumo da caracterização geotécnica dos solos SN e argila e misturas M40% e M550%.....	37
Tabela 5: Proporção de partículas finas.....	38
Tabela 6: Limites de consistência do SN e misturas.....	39
Tabela 7: Valores limites para o IP de solos utilizados como camada de base em aterros sanitários.....	40
Tabela 8: Resumo dos resultados obtidos no ensaio de compactação.....	40
Tabela 9: Leituras durante o ensaio de permeabilidade para M40%.....	42
Tabela 10: Leituras durante o ensaio de permeabilidade para M50%.....	42
Tabela 11: Leituras durante o ensaio de permeabilidade para SN.....	42
Tabela 12: Coeficientes de permeabilidade à água obtidos para os solos estudados.....	42
Tabela 13: Limites de permeabilidade à água para solos usados em camadas de base em aterros sanitários.....	43
Tabela 14: Análise química dos solos.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características Geotécnicas de solo para utilização em aterros sanitários.....	22
Quadro 2: Composição das misturas estudadas e suas respectivas siglas.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials
CE - Estado do Ceará
CL - Argila de baixa plasticidade
cm - centímetro
cm² - centímetro quadrado
cm/s - centímetro por segundo
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
DRX – Difração de Raios-X
EDX – Fluorescência de Raios-X
g – unidade de medida em gramas
g/cm³ - grama por centímetro cúbico
GM – Geomembrana
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP – Índice de Plasticidade
k – prefixo de unidades que indica multiplicação por 1 mil
K – Coeficiente de permeabilidade à água
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de Plasticidade
m – unidade de metro
M – prefixo de unidades que indica multiplicação por 1 milhão
m³ - unidade de metro cúbico
NBR – Norma Brasileira Regulamentar
N – unidade de medida de força denominada Newton
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
SM - Areia Siltosa
SN - Solo Natural
SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFC - Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

% - Porcentagem

°C - Graus celsius

K - Coeficiente de permeabilidade

A - Área da seção transversal do corpo de prova

a - Área da seção transversal da bureta

Fc - Fator de correção

h_1 - Carga piezométrica inicial

h_2 - Carga piezométrica final

Δh - Variação da carga piezométrica

L - Espessura do corpo de prova

t - Tempo decorrido do ensaio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	17
<i>1.1.1 Objetivo Geral</i>	<i>17</i>
<i>1.1.2 Objetivos específicos</i>	<i>17</i>
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Resíduos Sólidos Urbanos e os Aterros Sanitários	18
2.2 Camadas de base em aterros sanitários	20
2.3 Fatores que influenciam no comportamento das camadas de base de aterros sanitários	23
2.4 Indústria da cerâmica vermelha	25
2.5 Características geotécnicas das argilas vermelhas	26
3 METODOLOGIA	28
3.1 Descrição Da Área Experimental	28
3.2 Solos Estudados	29
3.3 Procedimentos Experimentais	30
<i>3.3.1 Ensaios de caracterização geotécnica</i>	<i>31</i>
<i>3.3.2 Permeabilidade à água</i>	<i>32</i>
<i>3.3.3 Ensaios de caracterização química do solo</i>	<i>35</i>
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1 ENSAIOS GEOTÉCNICOS	36
<i>4.1.1 Caracterização Geotécnica</i>	<i>36</i>
<i>4.1.2 Limites de Atterberg e Índice de Plasticidade (IP)</i>	<i>39</i>
<i>4.1.3 Curvas de compactação</i>	<i>40</i>
<i>4.1.4 Permeabilidade à água</i>	<i>41</i>
4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	44
4.2.1 Análise de Espectrometria de Fluorescência de Raio X	44

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
5.1 Conclusões	46
5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros	46
REFERÊNCIAS:	47

1 INTRODUÇÃO

O aumento na produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), devido ao rápido crescimento da população e ao avanço da industrialização, é um dos principais desafios que a humanidade precisa enfrentar na atualidade. A destinação desses resíduos, principalmente de fontes urbanas, precisa ser realizada com o mínimo de impacto para o meio ambiente. Giustu (2009) e Zuquette et al., (2015), destacam os aterros sanitários como a técnica de descarte ecologicamente adequada, mais utilizada, tanto no âmbito global como nacional, visto à sua conveniência e custo reduzido.

Os aterros sanitários possuem diversos elementos que visam minimizar os riscos de passagem de lixiviado e biogás para o meio ambiente, tais como as barreiras de impermeabilização de base e cobertura. As barreiras de base têm a função de impedir o fluxo do líquido percolado para o meio hidrogeológico subjacente. Por sua vez as camadas de cobertura funcionam como vedação dos resíduos aterrados, além de reduzir a infiltração de água superficiais, reduzindo a geração de lixiviado (Alonso, 2005).

As camadas de base, que são o centro de atenção deste estudo, desempenham um papel crucial em projetos de engenharia civil. No entanto, nem sempre o solo natural no local do aterro oferece uma barreira impermeável eficaz. Os geossintéticos são alternativas de impermeabilização eficazes, porém, apresentam um custo significativo e com o tempo, podem apresentar furos. Soluções de impermeabilização que envolvem a utilização de misturas de solos, como a argila, são amplamente utilizadas e já foram objetos de estudo por autores (Hoeks *et al.*, 1987; Kenney *et al.*, 1992; Mollins *et al.*, 1996; Stewart *et al.*, 2003; Mahler *et al.*, 2015; Silva, 2017; Costa, 2019).

De acordo com Araujo (2014), a utilização de solo como um recurso impermeabilizante para cobrir os resíduos dispostos em aterros sanitários se torna uma opção economicamente sustentável quando há acesso a matérias-primas que atendam aos padrões requeridos, resultando em custos inferiores comparados ao uso de materiais sintéticos. Essa tecnologia pode ser utilizada quando o nível do lençol freático é profundo, com camadas de solos espessas não-saturados e de alta capacidade de retenção de poluentes (Boscov, 2008).

A mistura desses solos forma uma barreira impermeabilizante, na grande maioria dos casos, funciona como complemento, mas também podem representar o único tipo de barreira do aterro sanitário. Apresentando baixa condutividade hidráulica, geralmente menor ou igual a 1×10^{-8} m/s, e com alta porcentagem de argila. A espessura mínima sugerida é de 1,0 m.

Sendo assim, essa pesquisa apresenta para estudo um material argiloso para que a mistura com o solo natural do aterro, atenda a normativa NBR 13896 (ABNT, 1997) que trata da permeabilidade de solos utilizados em base de aterros. Além disso, realizar a caracterização geotécnica completa de fatores que interferem diretamente nesse parâmetro, tais como, quantidade de finos, plasticidade e compactação.

Nesse contexto, o objetivo deste estudo é alcançar uma impermeabilização eficaz por meio da adição de argila vermelha em um solo natural proveniente de uma área futura de aterro sanitário.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Propor uma alternativa de melhoramento de uma camada de base para impermeabilização de um aterro sanitário localizado no vale do Jaguaribe-CE, por meio da adição de argila vermelha.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar como os parâmetros geotécnicos, químicos e mineralógicos dos solos influenciam na permeabilidade de água em camadas de base de aterros sanitários;
- Determinar a mistura solo arenoso-argila de melhor desempenho quanto a comportamento hidráulico para utilização como *liner* de aterro sanitário;
- Fornecer parâmetros geotécnicos que auxiliem no direcionamento da operação da camada de base do aterro sanitário em estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica busca apresentar os principais temas estudados para realizar as análises deste trabalho. São apresentados tópicos sobre os resíduos sólidos urbanos e sua disposição em aterros sanitários, bem como, os tipos de materiais utilizados em camadas de base de aterros.

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos e os Aterros Sanitários

O processo de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em nível mundial passou por várias fases até a atualidade. As agências de proteção ambiental e os governos dos países definiram diretrizes que acompanharam a evolução das tecnologias. Com a evolução das diversas tecnologias de disposição de resíduos, a necessidade da modernização nas legislações para o gerenciamento dos resíduos se tornou iminente (Melare *et al.*, 2017).

Países da comunidade europeia, como Alemanha, França e Espanha editaram leis que priorizaram evitar a geração de resíduos, sobretudo, através do seu reaproveitamento. Inclusive, na comunidade europeia foi introduzida uma estratégia denominada ‘zero waste’, que promove a responsabilidade de produtores no desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento de resíduos (Fudala-Ksiazek *et al.*, 2016).

No Brasil, somente em 1991 começou a ser estabelecida a base legal nacional para lidar com a questão dos resíduos, concentrando-se principalmente na organização do manejo dos resíduos provenientes dos serviços de saúde. Isso foi realizado por meio do Projeto de Lei nº 203. Posteriormente, em 1999, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) promulgou a Proposição nº 259, que estabeleceu Diretrizes Técnicas para a Gestão de Resíduos Sólidos. A partir de 2004, o Ministério do Meio Ambiente iniciou discussões interministeriais para a formulação de propostas visando à regulamentação dos resíduos sólidos.

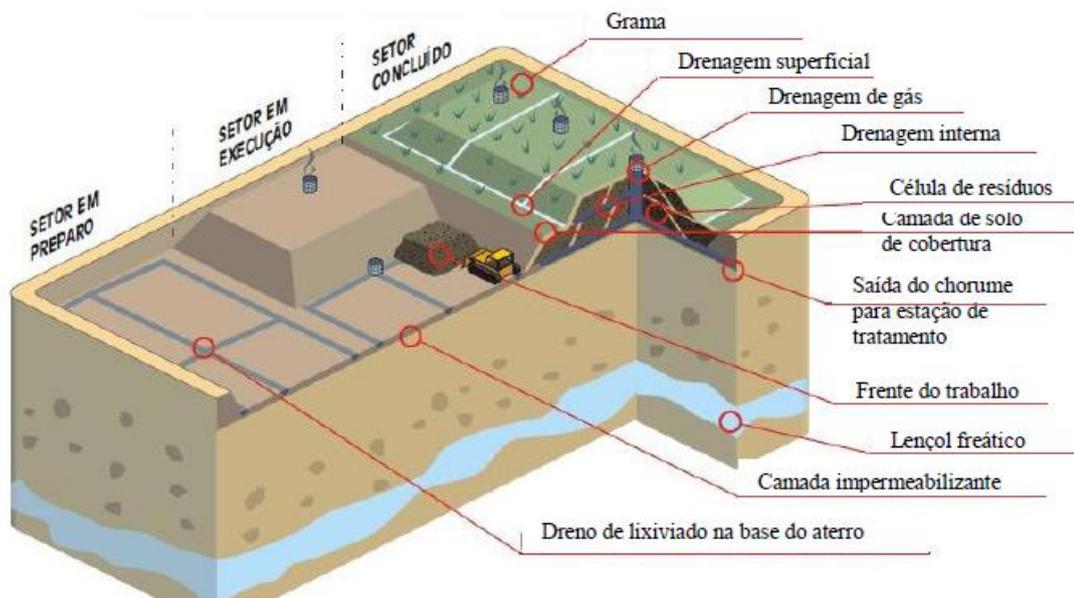
Em 3 de agosto de 2010 foi publicado no Diário Oficial da União a Lei nº 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Essa nova lei inclui estratégias de gestão integrada, além de especificar diversas formas de gerenciamento dos resíduos. Trouxe também a hierarquia de prioridades na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, que são: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Zuquette *et al.*, 2015).

Esta lei busca maximizar a utilização completa dos resíduos, até que não possam mais ser reutilizados. No último estágio da hierarquia, pode-se mencionar o aterro sanitário como a

principal forma de descarte final, garantindo uma disposição ambientalmente adequada, tanto em nível internacional, conforme descrito por (Giusti, 2009) quanto em âmbito nacional.

Segundo o IPT (2000), os aterros sanitários, conforme ilustrado na Figura 1, são considerados projetos de engenharia que seguem critérios e regulamentos específicos. Eles têm a finalidade de confinar resíduos de forma segura, assegurando o controle da poluição ambiental e a preservação da saúde pública, ao mesmo tempo em que minimizem os efeitos negativos sobre o meio ambiente.

Figura 1 – Esquema de aterro sanitário.



Fonte: IPT (2000).

Nos aterros, ocorrem transformações físico-químicas e biológicas decorrentes da decomposição da matéria orgânica, produzindo lixiviado e gases, que necessitam ser coletados e tratados. A Figura 1 detalha alguns elementos típicos dos projetos de aterros sanitários, entre eles estão: divisão em células, compactação dos resíduos, camada de cobertura, sistema de impermeabilização de base (*liner*), sistemas de drenagem e tratamento para líquidos e gases, monitoramento geotécnico e ambiental, entre outros. O propósito de todas essas ações é reduzir ao máximo os efeitos prejudiciais ao meio ambiente e preservar a área onde o aterro será estabelecido.

A respeito das regulamentações estipuladas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2010, a grande parte dos municípios do Brasil ainda não implementou sistemas de descarte de resíduos que atendam aos requisitos ambientais, como é o caso dos aterros sanitários. Em 2022, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública

e Resíduos Especiais (Abrelpe), o Brasil apresentou dados que indicam que nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, a participação de aterros sanitários foi 36,5%, 37,2% e 43,5%, respectivamente, havendo predominância de lixões a céu aberto. Já nas regiões Sul e Sudeste obtém-se, respectivamente, os valores de 71,6% e 74,3%.

A nível local, de acordo com a Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Ceará (Sema), o Ceará tinha no ano de 2020, aproximadamente, apenas 5,98% dos municípios destinando seus resíduos para aterros sanitários. Uma parte desse, percentual se deve aos seguintes municípios: Acopiara, Brejo Santo, Caucaia, Cedro, Fortaleza, Jucás, Madalena, Mombaça, Piquet Carneiro, Senador Pompeu e Sobral, que representa apenas 38% da população cearense dispendo de forma adequada para disposição de resíduos sólidos urbanos.

2.2 Camadas de base em aterros sanitários

A camada de base (também chamada de *liners*) de aterros sanitários tem uma fundamental importância nessas obras de engenharia, porém nem sempre o solo natural da localidade do aterro, onde o empreendimento está localizado, tem impermeabilização suficiente (Costa, 2019).

De acordo com Rowe (1995), as barreiras impermeabilizantes podem ser:

- depósitos naturais de solos argilosos;
- *liners* de argila compactada;
- paredes de *cut-off*;
- camada natural de rocha;
- *liners* argilosos com geossintéticos.

Segundo Torralba (2007), as camadas naturais de solos argilosos são formações que ocorrem naturalmente e têm baixa capacidade de permitir a passagem de água, sendo ricas em minerais de argila. Devido à sua natureza anisotrópica e à variação nos níveis de compactação que ocorrem naturalmente, essas camadas não são adequadas para serem usadas como uma barreira impermeabilizante por si só. Isso se deve ao fato de que podem ocorrer fraturas, rachaduras e pequenos orifícios no solo natural que não são facilmente perceptíveis, e esses defeitos podem permitir a contaminação do lençol freático. O autor também afirma que as paredes de *cut-off* (corte horizontal) têm o objetivo de bloquear possíveis movimentos de fluxo na direção horizontal. Normalmente, são empregadas em antigas instalações de aterramento que carecem de qualquer outra forma de salvaguarda.

Dentre essas tecnologias, destacam-se os *liners* argilosos de argila compactada, os quais são bastante utilizados no Brasil devido à sua alta eficácia na retenção de contaminantes. As argilas têm eficiência comprovada na remoção dos metais pesados de águas poluídas devido ao mecanismo de adsorção, conforme assinalado por Uddin (2016). Quando da adição de geossintéticos nessas camadas, devido à sua altíssima capacidade de impermeabilização, denominam-se *liners* argilosos com geossintéticos. Essas são as duas formas mais utilizadas para contenção de líquidos oriundos dos aterros sanitários (Daniel, 1993).

Boscov (2008) expressa que para a impermeabilização das camadas de base de aterros sanitários podem ser utilizadas:

- camadas de solo compactado (*compacted clay liner* – CCL);
- geossintéticos (geomembrana – GM, ou geocomposto argiloso para barreira impermeável – GCL);
- combinação das anteriores.

O projeto, execução ou operação inadequados da camada de base podem provocar acidentes ambientais graves, como o ocorrido no aterro sanitário da cidade de Montes Claros em Minas Gerais, onde problemas na drenagem e bombeamento fizeram com que o lixiviado deste aterro atingisse o Córrego do Mimoso (Globo, 2016).

Vazamentos de lixiviados representam sérios acidentes ambientais, especialmente quando afetam aquíferos. O processo de contaminação de aquíferos por lixiviado costuma ser lento devido à baixa taxa de infiltração e aos processos naturais de decomposição de contaminantes na zona não saturada. No entanto, uma vez que a poluição ocorre, a recuperação da qualidade da água subterrânea é um processo muito demorado e custoso. Em muitos casos, grandes volumes do aquífero já estão comprometidos quando a poluição se torna visível. Dependendo do tipo de contaminante, a recuperação pode levar anos e envolver desafios técnicos e custos significativos, que às vezes são proibitivos (Foster *et al.*, 2006; MMA, 2007; Betim, 2013). Logo, é essencial conhecer todas as características de fluxo do material utilizado como *liner*, para a elaboração e execução de projetos de aterros sanitários.

Dentre as propriedades geotécnicas mais relevantes para o projeto de uma camada de base, destaca-se a condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade. A condutividade hidráulica indica a facilidade que um fluido Newtoniano percola através de um meio poroso (Camapum *et al.*, 2015), é função da lei de Darcy, que descreve o fluxo em meios porosos, e afirma que a vazão é proporcional à perda de carga entre dois pontos.

Porém, mesmo a adsorção sendo extremamente relevante para a avaliação de desempenho de uma camada de base em aterro sanitário, segundo Costa (2019) no Brasil, a NBR 13.896 (ABNT, 1997) estabelece requerimentos vagos de coeficiente de permeabilidade da água que são estabelecidos sem a necessidade de considerar outras propriedades do solo.

A permeabilidade é a propriedade que um solo apresenta de permitir o escoamento de algum fluido através dele, a qual varia de acordo com os diversos tipos de solo encontrados, tais como areia, silte e argila. Já a condutividade hidráulica depende invariavelmente da viscosidade do fluido permeante no solo, que por sua vez depende da temperatura (Daniel, 1993).

No Quadro 1 estão resumidas algumas normas internacionais e estaduais que recomendam alguns parâmetros mais específicos para as características geotécnicas para solos utilizados em *liners* de aterros sanitários

Quadro 1: Características Geotécnicas de solo para utilização em aterros sanitários.

Norma regulamentadora	Coefficiente de permeabilidade a água (m/s)	Limites de consistência	Porcentagem de finos (%)	Espessura (m)	Classificação (SUCS)
CETESB (1993)	-	IP \geq 15% LL \geq 30%	>30%	-	CL, CH, SC e OH
Norma alemã (1993)	5×10^{-10}	-	-	>0,50m	-
ABNT (1997)	5×10^{-8}	-	-		-
USEPA (2004)	5×10^{-9}	IP: 7 - 15%	30 - 50%	0,30-0,60	-
FEAM (2006)	-	-	-	0,20-0,60	-

Fonte: Araújo (2017).

Considera-se desejável que depósitos naturais de solo do terreno dos aterros sanitários apresentem coeficiente de permeabilidade à água de no mínimo de 10^{-8} m/s, porém, sem nenhuma imposição adicional, sobretudo, no tocante a configuração das camadas de solo compactado, energia de compactação, umidade e outros fatores. Deve-se destacar que na zona não-saturada deve ser de, no mínimo, 3 m de profundidade (Silva, 2017).

De acordo com Silva (2022), é inviável o monitoramento das camadas de impermeabilização na base após o início da disposição de resíduos, e quaisquer falhas na construção dessa camada ou no sistema de drenagem de lixiviados podem resultar em danos ambientais irreversíveis. Portanto, é fundamental que as técnicas de construção dessa camada sejam padronizadas pela comunidade técnica, a fim de assegurar o desempenho satisfatório desse elemento. Um fator crítico para o adequado funcionamento da camada de base é a precisão na compactação e a capacidade de retenção dos contaminantes.

2.3 Fatores que influenciam no comportamento das camadas de base de aterros sanitários

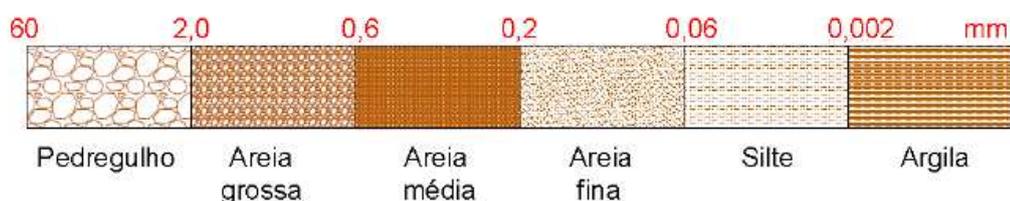
Sabe-se que as camadas de base funcionam para impermeabilizar a base de aterros sanitários, e que sua principal característica é a permeabilidade. Estudar o comportamento da permeabilidade dessa camada envolve diversos fatores, dentre os quais Hermann et al. (1987) mencionam como os mais influentes:

- tipo de solo;
- energia e método de compactação utilizados no processo;
- teor de umidade;
- características do efluente;
- saturação;
- espessura das camadas.

Conforme observado por Torralba (2007), cada tipo de solo responde de forma distinta ao processo de compactação, devido às suas diferentes texturas, consistências e densidades. Pode-se categorizar os solos de forma simplificada em três grupos: orgânicos, granulares e coesivos. O primeiro grupo é composto por solos que contêm uma quantidade significativa de matéria orgânica, resultando em baixa resistência, alta permeabilidade e alta compressibilidade. O segundo grupo consiste em materiais que mantêm uma elevada taxa de permeabilidade mesmo quando compactados adequadamente. Geralmente, suas propriedades não são afetadas pela absorção de água. O terceiro grupo compreende solos compostos por grãos finos que, quando compactados de forma apropriada, apresentam uma baixa taxa de permeabilidade. Devido às suas características de superfície, esses solos tendem a reter água, o que influencia o seu comportamento.

Conforme estabelecido pela norma NBR 6502 (ABNT, 1995), os solos granulares podem ser divididos em pedregulhos e areias (grossas, médias e finas), já os solos coesivos podem ser siltes e argilas. Essa classificação é realizada de acordo com o diâmetro equivalente dos grãos de solo (Figura 2).

Figura 2: Classificação da granulometria do solo segundo a NBR 6502.



Fonte: adaptado da ABNT (1995).

De acordo com as observações de Pinto (2006), é possível afirmar que quanto menor for o diâmetro das partículas de solo, menor será o seu coeficiente de permeabilidade, como indicado na Tabela 1. Essa relação se deve à maior capacidade de arranjo das partículas de grãos finos, o que resulta na redução da espessura dos canais presentes no solo.

Tabela 1: Valores típicos de condutividade hidráulica.

Tipo de material	Condutividade hidráulica (m/s)
Argilas	$< 10^{-9}$
Siltes	10^{-6} a 10^{-9}
Areias argilosas	10^{-7}
Areias finas	10^{-5}
Areias médias	10^{-4}
Areias grossas	10^{-3}

Fonte: Adaptado de Souza Pinto (2006).

A distribuição do tamanho das partículas pode resultar mudanças significativas na condutividade hidráulica. Solos bem graduados, cuja fração argila governa o comportamento hidráulico da matriz do solo, podem apresentar baixa condutividade hidráulica (Daniel, 1995).

Muitas vezes, solos com baixo coeficiente de permeabilidade não são ofertados na região dos aterros sanitários, assim percentuais de argilas são adicionados para melhorar a distribuição granulométrica e conceder propriedades coesivas a este solo (Benson *et al.*, 1994).

Os métodos de compactação e energia aplicada também produzem efeitos na permeabilidade dos solos. Os métodos de impacto, estático e de pisoteamento podem satisfazer as condições desejadas para solos coesivos, a depender do propósito que o material tenha (Torralba, 2007). Em geral, nos aterros sanitários se utiliza o método de pisoteamento com rolo compactador na execução das camadas de base. Por ser o método que provoca maior deformação por cisalhamento no solo, induz uma estrutura mais dispersa e, portanto, uma menor permeabilidade do solo. O aumento na dispersão resulta na redução do número de canais maiores de fluxo e em poros de menor tamanho, fazendo com que o coeficiente de permeabilidade diminua (Mitchell *et al.*, 1965). Essa compactação deve ser feita por camadas com vistas a obter máxima eficiência.

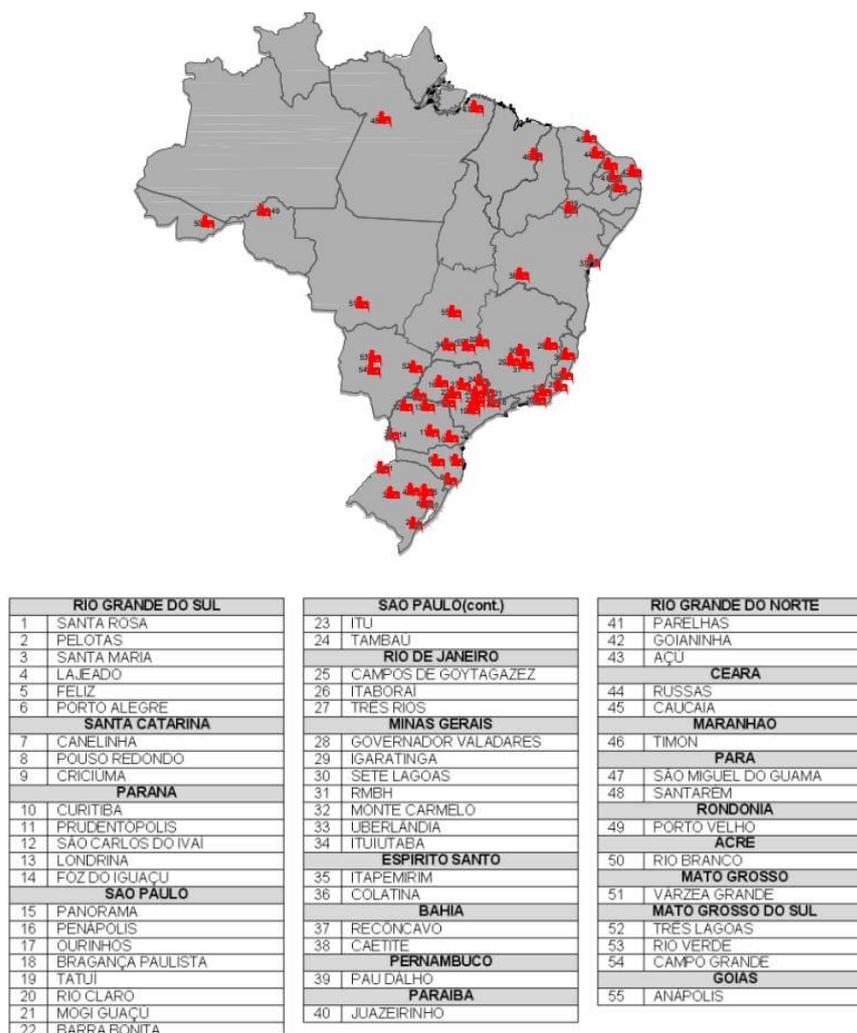
2.4 Indústria da cerâmica vermelha

Na indústria de cerâmica vermelha ou estrutural as argilas são empregadas como matéria-prima na fabricação de blocos de vedação e estruturais, telhas, tijolos maciços, tubos e ladrilhos.

Este setor possui uma ampla variedade de tipos de empresas, abrangendo desde pequenos negócios familiares artesanais, como olarias, até cerâmicas de médio e pequeno porte, que podem apresentar deficiências em termos de mecanização e gestão. Além disso, há empreendimentos de médio a grande porte em termos de escala de produção, que utilizam tecnologia mais avançada, mas estão sujeitos a ameaças de internacionalização de seus investimentos. A maioria das empresas no setor compete principalmente com base em seus custos de produção. No entanto, recentemente, algumas empresas têm tomado medidas para melhorar sua tecnologia e competitividade, como participação em programas de qualidade, estabelecimento de laboratórios para caracterização tecnológica de matérias-primas e produtos, treinamento de funcionários, exploração de novas fontes de combustível, como o gás natural, pesquisa sobre a incorporação de resíduos nas formulações cerâmicas e diversificação da gama de produtos fabricados.

A presença de depósitos minerais, juntamente com outros fatores favoráveis, tem levado à concentração da indústria em regiões específicas, formando aglomerados produtivos. Em algumas dessas áreas, chamadas de Arranjos Produtivos Locais (APLs) de base mineral, as empresas não apenas de mineração, mas também fornecedores e serviços, interagem e colaboram entre si, bem como com entidades externas, impulsionando a competitividade e beneficiando especialmente pequenas e médias empresas. A Figura 3 apresenta os principais APLs mínero-cerâmicos brasileiros, onde o município de Russas se faz presente.

Figura 3: Principais APLs minero-cerâmicos brasileiros.



Autor: Juinor, 2002.

As argilas comuns, para cerâmica vermelha ou estrutural, têm como principal característica a cor de queima avermelhada. Essa propriedade deve-se ao alto conteúdo de óxido de ferro total que encerram, geralmente superior a 4% (Facincani, 1992), valor que foi corroborado pelos estudos efetuados em depósitos brasileiros na região do Recôncavo Baiano (Conceição Filho e Moreira, 2001).

2.5 Características geotécnicas das argilas vermelhas

O termo argila lato sensu é empregado para designar um material inorgânico natural, de granulometria fina, com partículas de poucos micrômetros, que apresenta comportamento plástico quando em contato com a água. Do ponto de vista sedimentológico e granulométrico, a fração argila corresponde ao conjunto de partículas inferiores a 2 μm ou 4 μm , segundo as escalas de Attemberg e Wentworth, respectivamente

As argilas são constituídas predominantemente de argilominerais (filossilicatos), e seus tipos mais comuns são formados de silício e alumínio, e, com menor frequência, de magnésio e/ou ferro. O espaçamento entre as partículas caracteriza os argilominerais dos diversos agrupamentos, destacando-se os grupos da caulinita, illita e esmectita como os mais importantes ao uso cerâmico. Com as partículas de argilominerais ocorrem outros minerais, geralmente nas frações silte ($2 \mu\text{m} = 0,002 \text{ mm} < \Phi < 0,62 \text{ mm}$) e areia ($\Phi > 0,62 \text{ mm}$). Nessas granulometrias maiores, o mineral mais comum e abundante é o quartzo, seguido de micas, feldspatos e minerais opacos.

Uma das principais características da argila é a plasticidade e isso é o que permite os diferentes trabalhos que utilizam da argila como matéria-prima, e dessa forma é possível os mais diferentes formatos de peças cerâmicas que se conhece no mercado (PAULETTI, 2001).

Com coeficiente de permeabilidade apresentando valores menores que 10^{-8} m/cm^2 , a argila é considerada praticamente impermeável de acordo com Santos (2005), como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Coeficiente e grau de permeabilidade de solos.

Coeficiente K (m/s)	Grau de Permeabilidade (TERZAGHI; PECK, 1967)	Tipo de solo (MELLO; TEIXEIRA, 1967)
10^{-8} a 10^{-2}	Alta	Pedregulhos
10^{-2} a 10^{-4}	Média	Areias
10^{-4} a 10^{-6}	Baixa	Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos
10^{-6} a 10^{-8}	Muito Baixa	Argilosos
Valores menos que 10^{-8}	Praticamente impermeável	Argilas

Fonte: Santos (2005b).

Com essas características, a argila configura-se como uma boa opção para correção granulométrica alterando a quantidade de finos, a plasticidade e a permeabilidade do solo.

3 METODOLOGIA

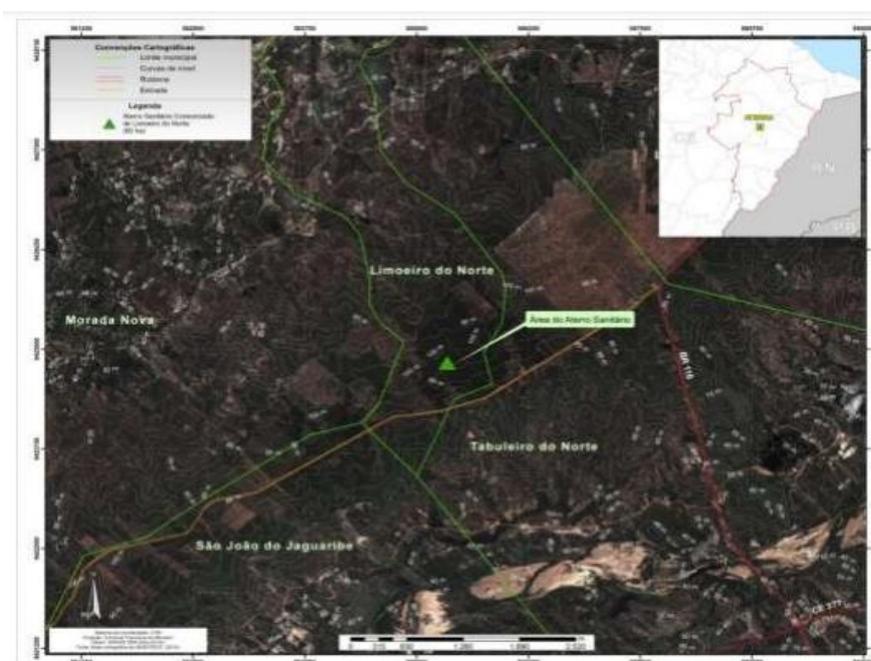
Neste tópico serão abordados os métodos utilizados na caracterização geotécnica e físico-química dos solos utilizados e das misturas, a metodologia de pesquisa experimental, e a determinação da melhor mistura para as camadas de base de aterros sanitários.

Os ensaios foram realizados nos laboratórios de Materiais de Construção Civil e de Mecânica dos Solos (LAMSP) do curso de Engenharia Civil da UFC Russas, assim como, nos Laboratórios de Mecânica dos Solos e Engenharia Química da UFC – Campus do Pici. O trabalho contou com a parceria do Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - Vale do Jaguaribe (CGIRS VJ) e da Cerâmica Liro, fornecendo o material conforme será detalhado nos próximos itens.

3.1 Descrição Da Área Experimental

O Aterro Sanitário do Vale do Jaguaribe está localizado na localidade de Café Queimado II, no município de Limoeiro do Norte, situado a 15 Km do centro da cidade, Estado do Ceará, Brasil, no ponto de coordenadas planas aproximadas UTM 9.424.510 S e 585.615 E. (Figura 4).

Figura 4: Localização da área do aterro consorciado regionalizado de Limoeiro do Norte - CE (CGIRS VJ).



Fonte: DigitalGlobe (2013).

Atualmente, o aterro consorciado por 11 municípios do Vale do Jaguaribe: Alto Santo, Aracati, Ererê, Fortim, Ibicuitinga, Iracema, Itaiçaba, Jaguaretama, Jaguaribara, Jaguaribe e

Limoeiro do Norte, está projetado para sua operação com uma vida útil de 30 anos, podendo ser introduzidas novas tecnologias ao longo do tempo. O referido aterro possui uma área de 60 hectares, sendo no mínimo de 36,4 destinados à disposição de resíduos, com capacidade para receber até 200 toneladas de resíduos sólidos por dia, com previsão de expansão para até 500 toneladas por dia.

O sistema de impermeabilização das células, a parte inferior das trincheiras do aterro, será feita por uma barreira impermeável composta, com solo compactado e geomembrana. Após ser nivelada conforme necessário, a parte inferior da trincheira escavada será revestida com uma camada de solo compactado de 40 cm de espessura, compactado a 99% do Proctor Normal. Essa camada atuará como base para a instalação da geomembrana PEAD de 2,0 mm de espessura, que será aplicada sobre toda a área da base e dos taludes da trincheira. Isso garantirá a prevenção de possíveis vazamentos, funcionando adicionalmente como uma camada impermeabilizante suplementar.

Neste momento, o processo de construção do aterro sanitário está em andamento, com a execução da camada de base (Figura 5), a instalação do sistema de drenagem de gases e a construção da estação de tratamento de lixiviados, escritórios, área de compostagem e um galpão para armazenar os resíduos da construção civil.

Figura 5: Execução da camada de base do Aterro.



Fonte: Autor (2023).

3.2 Solos Estudados

Os solos estudados neste trabalho foram os solo natural, argila e suas misturas em teores de 40% e 50% de argila, a intenção de utilizar mais de uma mistura é avaliar qual fornecerá o melhor resultado para a aplicação em campo, valendo destacar o custo benefício, visto que a

argila diminui o uso de materiais sintéticos, porém ainda é onerado o valor da coleta e transporte da matéria até o aterro.

Os solos e misturas utilizados, assim como suas proporções estão apresentados no Quadro 2, bem como suas siglas, respectivamente:

Quadro 2: Composição das misturas estudadas e suas respectivas siglas.

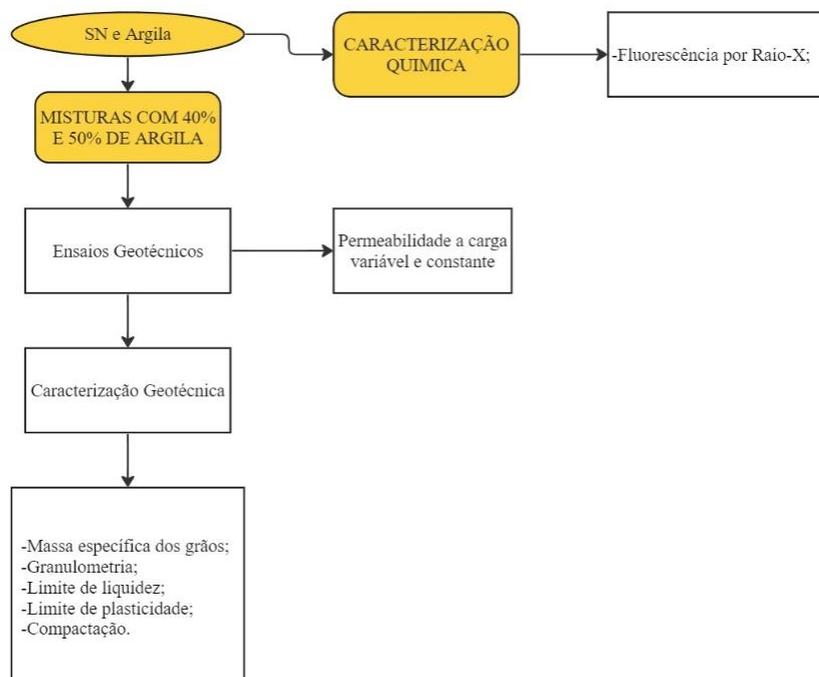
Composição do material (dado em massa seca)	Sigla
Solo natural da localidade do aterro	SN
Argila vermelha	Argila
40% de argila e 60% de SN	M40%
50% de argila e 50% de SN	M50%

Fonte: Autor (2023).

3.3 Procedimentos Experimentais

Os ensaios realizados a fim de determinar o desempenho dos solos como *liner* em aterros sanitários consistiram na caracterização química, geotécnica e determinação da condutividade hidráulica do solo. Na Figura 6 estão sintetizados os procedimentos experimentais realizados nesta pesquisa.

Figura 6: Fluxograma contendo os ensaios de caracterização dos solos e das misturas.



Fonte: Autor (2023)

3.3.1 Ensaios de caracterização geotécnica

Os ensaios realizados seguiram as recomendações das normas técnicas descritas na Tabela 3:

Tabela 3: Ensaios e métodos utilizados na caracterização geotécnica.

Ensaio	Método
Preparação das amostras	NBR 6457/16
Massa específica dos grãos	NBR 6508/16
Granulometria	NBR 7181/16
Limite de Liquidez	NBR 6459/16
Limite de Plasticidade	NBR 7180/16
Ensaio de Compactação	NBR 7182/16
Permeabilidade à água	NBR 14545 e 13292/21

Fonte: Autor (2023).

A Figura 7 ilustra as principais fases dos ensaios de caracterização geotécnica supracitados, realizados a partir da coleta e preparação das amostras: (a) Obtenção da massa específica por meio do método do picnômetro (b) Peneira utilizadas na determinação da granulometria, (c) Ensaio de granulometria por sedimentação, (d) Limites de consistência (e) Pesagem durante a determinação da umidade (f) Ensaio de compactação sob energia Proctor Normal.

Figura 7: Fases dos ensaios de caracterização geotécnica.



Fonte: Autor (2023).

3.3.2 Permeabilidade à água

A determinação da condutividade hidráulica dos solos e das misturas M40 e M50 foram realizados no Laboratório de Mecânica dos solos e Pavimentação da UFC - Campus do Pici. Durante essa etapa, utilizou-se a NBR 13292:2021 a partir do permeâmetro de carga constante para o SN, enquanto que para as misturas M40% e M50%, utilizou-se a NBR 14545:2021, a qual preconiza o ensaio de permeabilidade a água a partir de uma carga variável (Figura 8).

Figura 8: Permeâmetros utilizados para obtenção da permeabilidade no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimento na UFC – Campus Pici.



Fonte: Autor (2023).

As amostras utilizadas no ensaio de permeabilidade à água foram preparadas no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC – Campus de Russas. Em seguida, foram acondicionadas em sacos plásticos, vedados por meio de fita adesiva, de modo a impedir a perda de material durante o transporte para o Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC – Campus do Pici.

As amostras foram moldadas no ponto ótimo da curva de compactação, sob energia de Proctor Normal. Para preparação dos corpos-de-prova, utilizou-se o cilindro pequeno, compactação estática (Figura 9-A) e camadas de material permeável (Figura 9-B), com a finalidade de que o fluxo de água ocorresse em regime laminar, conforme estabelecido pela Lei de Darcy.

Figura 9: Preparação dos corpos-de-prova.



Fonte: Autor (2023).

Dessa forma, uma vez que o permeâmetro foi vedado, cada corpo-de-prova foi submetida à saturação por um período mínimo de 24 horas. Para monitorar o processo da saturação, observou-se, inicialmente, a saída de água pela mangueira localizada na parte inferior do cilindro.

Para as misturas, utilizou-se o método da carga variável, no qual o solo completamente saturado, iniciaram-se as leituras, por meio das quais foram medidas as variações do nível da água na bureta em um dado intervalo de tempo, mostrado na Figura 10. Com isso, foram realizadas diversas leituras, até observar-se uma certa constância nos últimos 3 resultados para cada amostra.

Figura 10: Leitura do desnível da água na bureta em função do tempo, no ensaio de permeabilidade à água utilizando carga variável



Fonte: Autor (2023).

Na determinação do coeficiente de condutividade hidráulica no SN, realizou-se o experimento por meio de carga constante. Inicialmente, foi realizada a moldagem do corpo de prova, assim como feito para o ensaio de permeabilidade a carga variável. No entanto, após a etapa de saturação do solo, mediu-se o volume de água que saía do cilindro para determinado intervalo de tempo, conforme ilustrado na Figura 11. Por fim, foram realizadas leituras, até, até observar-se uma certa constância nos últimos 3 resultados para cada amostra.

Figura 11: Permeâmetro à carga constante da UFC – Campus Pici.



Fonte: Autor (2023).

Com os dados obtidos, calculou-se o coeficiente de permeabilidade (k), por meio da Equação 1 para as misturas M40% e M50% e de acordo com a Equação 2 para o SN:

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = 2,3 \times \frac{aL}{At} \times \log \frac{h_0}{h_f} \times F_c \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

K_{20} = Coeficiente de Permeabilidade (m/s)

a – Área da seção transversal da bureta (cm²)

L – Espessura do corpo de prova (cm)

A – Área da seção transversal do corpo de prova (cm)

t – Tempo decorrido do ensaio (s)

h_0 – Altura inicial do nível de água (cm)

h_f – Altura final do nível de água (cm)

$$k = \frac{Q \cdot L}{h \cdot A \cdot t} \text{ (cm/s)}$$

(Equação 2)

Onde:

k - Coeficiente de permeabilidade (cm/s)

t - Tempo decorrido (s)

Q - Volume de água medido na proveta (cm³)

L - Altura do corpo de prova (cm)

A - Área da seção do corpo de prova (cm²)

h - Carga hidráulica (cm)

3.3.3 Ensaios de caracterização química do solo

Para determinação dos principais constituintes da composição química dos materiais analisados, utilizou-se a técnica da Fluorescência de Raios-X (FRX). Na preparação da amostra, utilizou-se, aproximadamente, 200 gramas de material passante na peneira nº200 (0,0074mm). Os solos foram encaminhados ao Laboratório de Química da UFC Campus do Pici, onde, inicialmente, as amostras que foram fundidas com tetraborato de lítio. Para realizar a análise quantitativa dos principais componentes, empregou-se o espectrômetro de fluorescência de raios-X por dispersão de energia do tipo WDXRF Modelo ZSX mini II marca Rigaku (conforme mostrado na Figura 12).

Figura 12: Equipamento para realização de ensaio de fluorescência de Raio-x (FRX)



Fonte: Autor (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos a partir da caracterização geotécnica, química e do ensaio de permeabilidade à água para os solos analisados. Ademais, estes resultados serão relacionados com as preconizações de normas técnicas, bem como, com sugestões presentes da literatura científica acerca dos requisitos necessários para um bom desempenho de solos utilizados em *liners* de aterros sanitários.

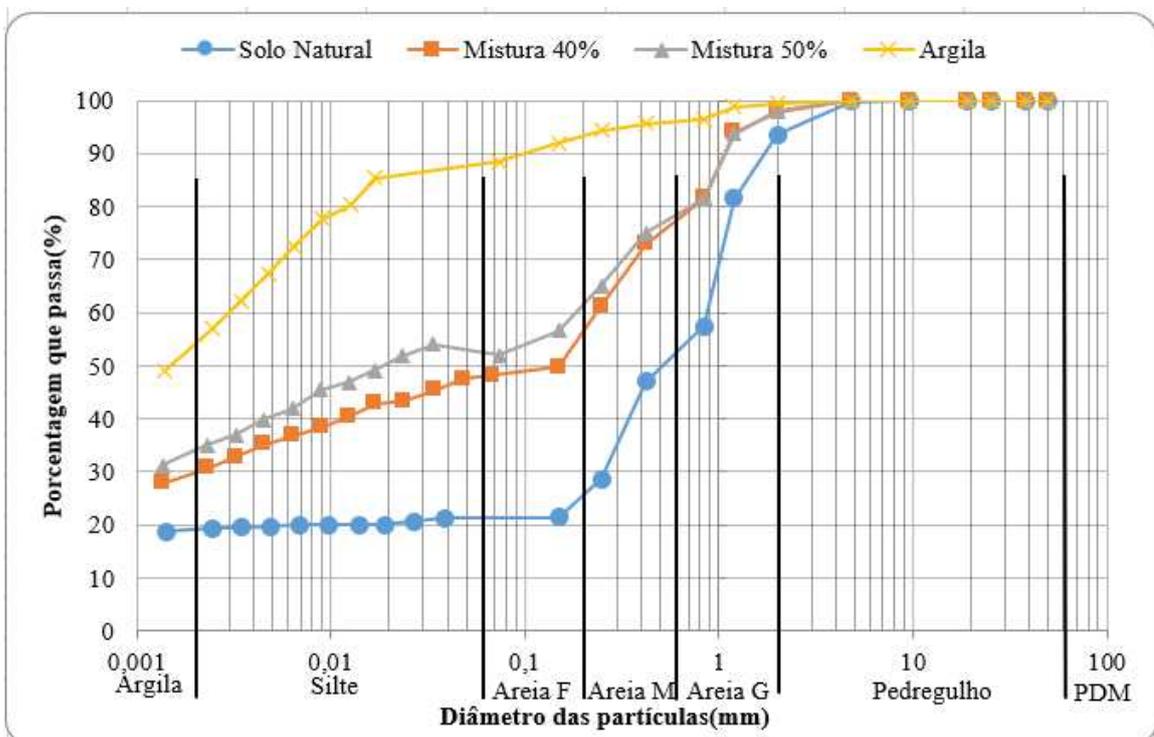
4.1 ENSAIOS GEOTÉCNICOS

4.1.1 Caracterização Geotécnica

Conforme se observa na figura 13 e Tabela 4, o solo natural é formado por 74% de areia, sendo 42% de areia grossa, 29% de areia média e 3% de areia fina. A argila apresenta aproximadamente 12% de areia, 33% de silte e 55% de argila, como representado na Figura 13. além disso, o solo Natural não apresentou plasticidade e liquidez, sendo considerado Não Plástico (NP) e Não Líquido (NL), de acordo com a Tabela 4.

Conforme o Sistema Unificado de Classificação de solos (ASTM, 2017), SN se classifica como uma areia siltosa mal graduada (SM) e a argila se classifica como argila de baixa compressibilidade (CL), assim como as misturas M40% e M50%.

Figura 13: Curvas granulométricas dos solos (SN e argila) e misturas.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 4 : Resumo da caracterização geotécnica dos solos SN e argila e misturas M40% e M550%.

RESULTADOS				
PROPRIEDADES	SN	ARGILA	M40%	M50%
Argila	19	55	30	35
Silte	2	33	18	20
Areia Fina	3	5	7	6
Areia Média	29	3	22	17
Areia Grossa	42	4	21	20
Pedregulho	5	1	2	2
Umidade higroscópica (%)	0,39	4,52	1,9	2,39
Peso específico dos grãos (kN/m ³)	24,0	23,3	24,5	24,1
Limite de liquidez (%)	NL	45	24,9	33
Limite de plasticidade (%)	NP	24,35	15,24	16,58
Índice de plasticidade (%)	NP	20,65	9,66	16,42
Índice de atividade	-	0,23	0,22	0,32
Classificação SUCS	SM	CL	CL	CL
Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)	20,09	17,01	19,14	24,15
Umidade ótima (%)	9,36%	17,85%	11,70%	14,38%
C. de condutividade hidráulica (m/s)	7,13*10 ⁻⁷	-	1,4*10 ⁻⁸	6,7*10 ⁻⁹

Fonte: Autor (2023).

NP: Não-Plástico; SM: Areia-siltosa; CL: Argila de Baixa Compressibilidade.

Daniel (1993), juntamente com as contribuições de Benson e Trast (1995), propuseram os seguintes critérios para granulometria de solos para camada de base em aterros sanitários: a proporção de pedregulho deve ser igual ou inferior a 30%, a faixa ideal para a proporção de finos situa-se entre 20% e 30%, e a proporção de argila deve ser igual ou superior a 15%. Em contrapartida, Frempong e Yanful (2004) e GRM (2007) recomendam um teor de argila de 20%. Dessa maneira, de acordo com essas diretrizes, apenas o SN não atende aos critérios para utilização como camada de base em aterros sanitários.

A capacidade dos solos de serem moldados quando expostos à água varia de acordo com os minerais presentes e está relacionada com as dimensões das partículas, a composição e a estrutura dos minerais argilosos, além da presença de matéria orgânica, conforme destacado por HMEID *et al.* (2019).

A grande quantidade de areia encontrada está em consonância com as baixas taxas de umidade higroscópica e ótima registradas para o SNL, que foram de 0,39% e 9,36%, respectivamente. Vale destacar que, conforme apontado por Osinubi e Amadi (2009), esses valores de umidade não têm impacto direto no desempenho do SN como camada de base, mas, em vez disso, servem para determinar a quantidade apropriada de água a ser acrescentada ou retirada durante o processo de compactação.

Dessa maneira, a inserção da argila pura nas misturas resultou em alterações significativas na distribuição de tamanhos de partículas, como o aumento das proporções de argila e a diminuição das proporções de areia grossa (conforme mostrado na Tabela 4). Paralelamente a essa transformação, houve um aumento nas umidades higroscópica e ótima devido à presença mais substancial de argila na composição granulométrica, resultando em uma maior capacidade de retenção de água. Essa tendência foi corroborada pelos estudos realizados por Silva (2017), Costa (2019) e Costa (2021).

Conforme afirmado por Rocca *et al.* (1993) e Qasim e Chiang (1994), os solos indicados para serem utilizados como camada de base em aterros sanitários devem ter uma proporção de partículas finas que exceda 30%. Por outro lado, Daniel (1993) sugere que a proporção de partículas finas seja superior a 20%. Tabela 5, Rocca *et al.* (1993) também oferecem diretrizes para classificar os solos adequados para utilização em camadas de base de aterros sanitários, que devem se enquadrar em uma das seguintes categorias: CL (argila de baixa compressibilidade), CH (argila de alta compressibilidade), SC (areia argilosa) ou OH (argila orgânica de alta compressibilidade).

Tabela 5: Proporção de partículas finas.

Referência	Especificação	SN	Argila	M40%	M50%
Rocca <i>et al.</i> (1993) e Qasim e Chiang (1994)	>30%	N.A	Atende	Atende	Atende
Daniel (1993)	>20%	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: Autor (2023).

Portanto, com base nessas recomendações sobre a composição granulométrica e a classificação de acordo com o SUCS, de acordo com esse critério, as misturas M40% e M50% podem ser usadas como camada de base em aterros sanitários.

4.1.2 Limites de Atterberg e Índice de Plasticidade (IP)

Os limites de Atterberg e o índice de plasticidade (IP) dos solos analisados encontram-se descritos na Tabela 6.

Tabela 6: Limites de consistência do SN e misturas.

Limites de consistência	SN	Argila	M40%	M50%
LP(%)	NP	24,35	15,24	16,58
LL(%)	NL	45,00	24,90	33,00
IP(%)	NP	20,65	9,66	16,42

Fonte: Autor (2023).

De acordo com Silva (2022), esses parâmetros são parâmetros de extrema importância quando se avalia o desempenho de um solo empregado como *liner* em aterros sanitários, pois eles indicam a capacidade deste solo de sofrer deformações quando submetido a cargas na presença de água. Contudo, um excesso de plasticidade pode levar à formação de fissuras durante ciclos de umedecimento e secagem. Essas rachaduras têm o potencial de aumentar a permeabilidade do solo e, em situações mais críticas, podem criar caminhos preferenciais para o fluxo de líquidos, resultando em processos erosivos.

Com os resultados obtidos, é possível apontar o SN como um solo Não-Plástico (NP), como mostrado na Tabela 6. Isso pode ser justificado pela presença significativa de grãos de areia, pois estes tendem a reduzir a capacidade do solo se moldar na presença de água. Todavia, nota-se um aumento proporcional e progressivo dos limites de consistências obtidos através dos ensaios, a partir da adição de argila nas misturas, isso ocorre, pois, a argila tende a aumentar a plasticidade do solo de acordo com sua concentração.

Como a legislação não apresenta parâmetro para esse limite, a literatura apresenta valores recomendados para o IP de solos que serão utilizados como camadas de base em aterros sanitários, conforme mostrado na Tabela 7. Segundo o sistema unificado SUCS, as amostras apresentaram classificações semelhantes, sendo elas Argilas de Baixa Compressibilidade (CL),

com apenas o SN diferindo, sendo classificado como Areia Siltosa (SM) devido a ausência de IP e LL.

Tabela 7: Valores limites para o IP de solos utilizados como camada de base em aterros sanitários.

Referência	Especificação	SN	M40%	M50%
Rocca et al. (1993)	IP>15%	N.A	N.A	Atende
Daniel (1993)	IP>7%	N.A	Atende	Atende
Qasim e Chiang (1994)	7%<IP<15%	N.A	Atende	N.A

Fonte: Autor (2023).

N.A.: Não atende à referência.

A única recomendação que estabelece um limite máximo para o índice de plasticidade (IP) é a de Qasim e Chiang (1994). Isso ocorre porque eles reconhecem o impacto adverso do excesso de plasticidade na durabilidade da camada de base. Portanto, com base no IP, a mistura M40% demonstra um desempenho satisfatório na impermeabilização de Células de RSU, conforme as diretrizes estabelecidas por Daniel (1993) e Qasim e Chiang (1994).

4.1.3 Curvas de compactação

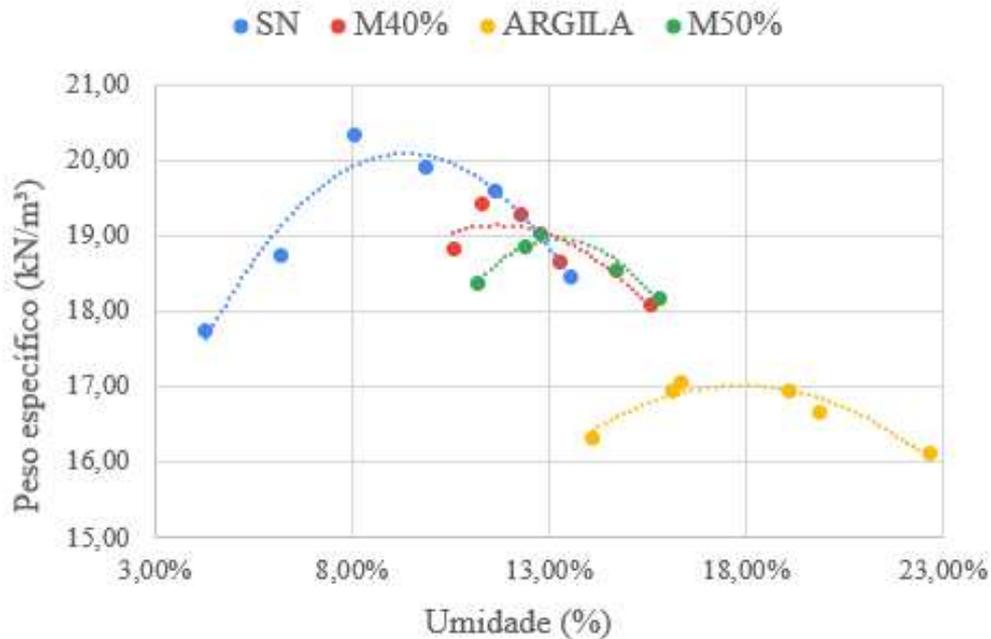
A partir das curvas de compactação sob energia Proctor Normal das misturas estudadas (Figura 15), observa-se na Figura 14 e Tabela 8 que peso específico aparente seco máximo variou de 20,09 kN/m³ a 24,15 kN/m³ enquanto a umidade ótima apresentou valores entre 9,36% a 14,38%. Nota-se que o peso específico aparente seco máximo das misturas, assim como a umidade ótima aumentou com o acréscimo do teor de argila. Isso implica dizer que, quanto maior a porcentagem argila for acrescentada na mistura, menor será o volume necessário de água durante o processo de compactação.

Tabela 08: Resumo dos resultados obtidos no ensaio de compactação.

Amostras	Peso aparente seco (kN/cm ³)	Umidade ótima (%)
SN	20,09	9,36
Argila	17,01	17,85
M40%	19,14	11,7
M50%	24,15	14,38

Fonte: Autor (2023).

Figura 14: Curvas de compactação dos solos (SN e Argila) e misturas.



Fonte: Autor (2023).

A permeabilidade do solo refere-se à sua capacidade de deixar a água passar pelos seus vazios. O aumento do peso específico aparente seco máximo tende a compactar os poros do solo, diminuindo o espaço disponível para a água se mover. Isso pode resultar em uma redução na permeabilidade do solo, tornando-o menos capaz de permitir a passagem da água.

O acréscimo de argila ao solo pode ter um efeito significativo na resistência da camada. Por ser um componente do solo composto por partículas muito pequenas. Quando adicionada ao solo, ela pode ajudar a preencher os vazios entre outras partículas, resultando em um aumento da coesão e resistência do solo. Isso geralmente leva a uma melhoria na capacidade de suporte da camada de solo, tornando-a mais resistente a deformações e cargas aplicadas.

4.1.4 Permeabilidade à água.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade à água com carga permanente do SN e carga variável das misturas estudadas, estão representados nas Tabelas 9, 10 e 11, respectivamente. Nelas são apresentadas as leituras de temperatura, alturas do nível de água e tempo e seus coeficientes de permeabilidade, os valores foram obtidos através da equação de Darcy.

Tabela 9: Leituras durante o ensaio de permeabilidade para SN.

LEITURA	TEMPERATURA (°C)	FATOR DE CORREÇÃO	Q (cm ³)	t (s)	K20 (cm/s)
5	28	0,814	70	180	7,13E-05
6	28	0,814	70	180	7,13E-05
7	28	0,814	70	180	7,13E-05

Fonte: Autor (2023).

Tabela 10: Leituras durante o ensaio de permeabilidade para M40%.

LEITURA	TEMPERATURA (°C)	FATOR DE CORREÇÃO	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)
20	25	0,871	145	143	1200	1,40E-06
21	25	0,871	145	143	1200	1,40E-06
22	25	0,871	145	143	1200	1,40E-06

Fonte: Autor (2023).

Tabela 11: Leituras durante o ensaio de permeabilidade para M50%.

LEITURA	TEMPERATURA (°C)	FATOR DE CORREÇÃO	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)
1	28	0,811	145	143,2	1620	6,80E-07
2	28	0,811	145	143,2	1680	5,50E-07
3	28	0,811	145	143,2	1660	6,60E-07
4	28	0,811	145	143,2	1784	6,80E-07

Fonte: Autor (2023).

Ao final dos ensaios, foi calculada a média aritmética dos valores obtidos do Coeficiente K₂₀ e transcritos para a Tabela 12 para que seja de mais fácil entendimento.

Tabela 12: Coeficientes de permeabilidade à água obtidos para os solos estudados.

Coeficiente de condutividade hidráulica (k)			
Material	SN	M40%	M50%
k (m.s-1)	$7,13 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-9}$

Fonte: Autor (2023).

Verifica-se que a permeabilidade do SN foi de $7,13 \cdot 10^{-7}$ m/s e, com adição da argila, houve uma redução bastante significativa, chegando a $6,7 \cdot 10^{-9}$ m/s para a mistura M50%. Na Tabela 13 estão resumidas as recomendações para condutividade hidráulica para solos utilizados como camada de base em aterros sanitários.

De acordo com Miguel (2020), a condutividade hidráulica está relacionada com a expansão da argila e quando submetidas a tensões mais elevadas durante sua hidratação,

apresentam uma menor permeabilidade, crendo que esteja relacionado com a diminuição do índice de vazios.

Tabela 13: Limites de permeabilidade à água para solos usados em camadas de base em aterros sanitários.

Referência	Especificação	SN	M40%	M50%
Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB)	$k > 1 \times 10^{-9}$	N.A	N.A	Atende
NBR 13896 (ABNT, 1997)	$k > 1 \times 10^{-8}$	N.A	Atende	Atende
Environmental Protection Agency (USEPA, 1991)	$k > 1 \times 10^{-9}$	N.A	N.A	Atende
Qasim e Chiang (1994)	$k > 1 \times 10^{-9}$	N.A	N.A	Atende

Fonte: Autor (2023).

N.A.: Não atende.

Destaca-se a mistura M50% que foi a única a atender à especificação de acordo com todas as referências citadas. No entanto, de acordo com o que preconiza a NBR 13896/1997, apenas o SN não atendeu ao valor mínimo para a permeabilidade, o que era esperado, pois o referido solo se trata de uma areia-siltosa (SM).

Shackelford *et al.* (2000) discutiram os fatores que afetam a condutividade hidráulica de geocompostos argilosos para barreira impermeabilizante permeados com líquidos diferentes do padrão (água). Os resultados do ensaio mostraram que líquidos não convencionais que contêm altas concentrações de cátions monovalentes e baixas concentrações de cátions bivalentes podem causar aumentos significativos na condutividade hidráulica desde que o ensaio seja realizado suficientemente longo para permitir a troca de cátions adsorvidos.

Di Emidio *et al.* (2011), explica que a exposição a soluções orgânicas ou inorgânicas altamente concentradas, pode alterar quimicamente a argila aumentando a condutividade hidráulica.

Soares (2012) mostra que o coeficiente de permeabilidade da mistura do solo com a argila, quando percolado por um lixiviado é menor que em relação a permeabilidade à água na mesma mistura.

4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

4.2.1 Análise de Espectrometria de Fluorescência de Raio X

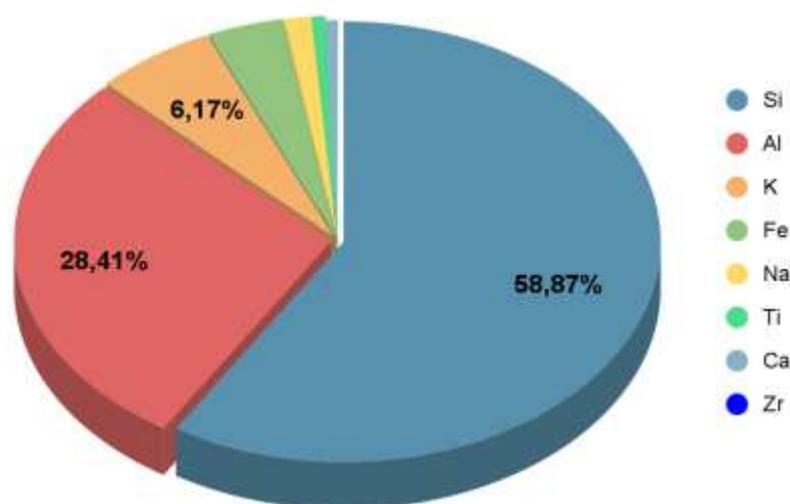
Os compostos químicos presentes podem ser vistos na Tabela 14. Há predominância de Si e Al na composição química tanto do SN, quanto da argila, em mais de 75%, provenientes de argilominerais.

Tabela 14: Análise química dos solos.

Mineral	Solo Natural	
	mass%	
	SN	Argila
Si	58,8650	54,3370
Al	28,4120	23,3440
K	6,1669	5,8800
Fe	3,8885	9,7552
Na	1,3824	0,0000
Ti	0,7032	1,5690
Ca	0,5612	1,7614
Zr	0,0207	0,0249
Mg	0,0000	3,0497
Mn	0,0000	0,1592
Cl	0,0000	0,1198

Fonte: Autor (2023).

Figura 15 – Composição mineralógica do solo natural do aterro



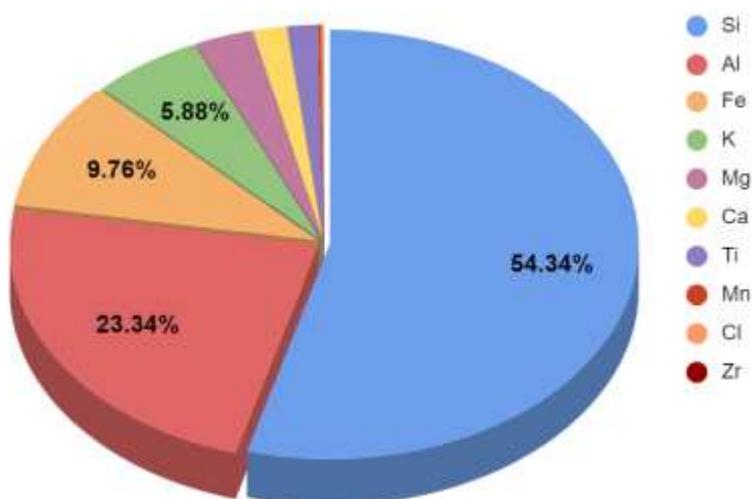
Fonte: Autor (2023).

O solo natural encontrado no aterro sanitário contém altas concentrações de óxidos, com destaque para o óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de potássio (K_2O). Em menor escala, há presença de óxidos de ferro (3,9%), sódio (1,4%), titânio (0,7%), cálcio

(0,56%) e zircônio (0,02%). A baixa quantidade de cálcio e a ausência de elementos como magnésio indicam um solo com baixa fertilidade, uma característica comum em latossolos (Marques et al., 2014).

A elevada presença de sílica confirma os resultados da análise granulométrica, indicando a presença de uma grande quantidade de areia. Conforme Araújo (2017), isso contribui para a diminuição da retenção de água e da plasticidade do material, o que foi confirmado pelo fato de o solo não apresentar plasticidade nos testes de limites.

Figura 16 – Composição química da argila.



Fonte: Autor (2023).

A argila segue a composição do solo natural, com maiores concentrações de óxidos de silício, alumínio, ferro e potássio. Em menores proporções, encontram-se óxidos de magnésio (3,05%), cálcio (1,76%), titânio (1,57%), manganês (0,16%), cloro (0,12%) e zircônio (0,02%). Os elevados valores de índices físicos e a presença de elementos como magnésio e cálcio indicam que se trata de um vertissolo, favorecendo a fixação de vegetação.

Concordando com Santos (1975), essa variação na composição química influencia o comportamento do solo e suas misturas, afetando propriedades mecânicas desfavoráveis, como plasticidade e permeabilidade, do solo natural.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Ao longo deste trabalho, fica claro que é fundamental estudar a permeabilidade na camada de base dos aterros sanitários, considerando os impactos que a infiltração de lixiviados pode causar ao meio ambiente e à sociedade.

Através dessa pesquisa, foi possível sugerir parâmetros para uma camada de base para um aterro sanitário que atende aos requisitos estabelecidos tanto pelas normas nacionais quanto internacionais em relação à permeabilidade da água.

As características geotécnicas LL, LP, IP e permeabilidade apresentaram uma relação direta com a adição da argila. A partir disso, é possível propor correlações que se adaptam melhor a misturas de solos que apresentem características geotécnicas semelhantes aos solos dessa pesquisa.

Ao adicionar argila a um solo predominantemente arenoso, foi possível reduzir a porosidade da mistura, tornando-a adequada para cumprir os padrões necessários de permeabilidade da água para uma camada de base em um aterro sanitário.

A partir dos valores obtidos nesse trabalho, é possível inferir a mistura de 40% como ideal para o aterro, pois atende ao critério de permeabilidade proposto pela NBR 13896 e com base no IP, a mistura demonstra um desempenho satisfatório conforme as diretrizes estabelecidas por Daniel (1993) e Qasim e Chiang (1994).

5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Este estudo envolveu a avaliação do desempenho do solo natural e das misturas resultantes do uso de argila vermelha. No entanto, os resultados apresentados são apenas preliminares e demandam estudos mais aprofundados sobre as características encontradas, bem como a investigação de outras áreas de pesquisa relacionadas. Assim, algumas sugestões para futuras pesquisas incluem:

- Aplicação da mistura solo-argila em uma área experimental em campo;
- Realizar os estudos com concentrações menores de argila na mistura Solo-Argila;
- Verificação da resistência mecânica com os ensaios de resistência ao cisalhamento direto ou de compressão triaxial.

REFERÊNCIAS

ALONSO, T. P., **Condutividade Hidráulica de Solos Compactados em Ensaio com Permeâmetro de Parede Flexível**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005, 113 p.

ARAUJO, P. S.; SILVA, D. L. M.; CARIBE, R. M.; BATISTA, P. I. B.; MONTEIRO, V. E. D. Estudo geotécnico para impermeabilização de aterro sanitário em escala experimental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., 2014, Goiânia. **Anais Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Goiânia: ABMS, 2014.

ARAUJO, P. S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário. 2017. 139 fls.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **ABNT NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **ABNT NBR 14545**: Solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **ABNT NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.004**: Resíduos Sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **ABNT NBR 6.459**: Solo determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **ABNT NBR 7185**: Determinação da massa específica aparente, in situ, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **ABNT NBR 7.181**: Solo Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **ABNT NBR 7.182**: Solo Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **ABNT NBR 6.502**: Representação de área de trabalho para desenhos técnicos. Rio de Janeiro, 1995.

BENSON, C. H.; DANIEL, D. E. Minimum thickness of compacted soil *linersliners*: I. stochastic models. **Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. ASCE, 120 (1), p. 129-152, 1994.

BENSON, Craig H.; TRAST, John M. Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays. **Clays and clay minerals**, v. 43, n. 6, p. 669-681, 1995.

BETIM, L. S. **Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do Córrego Palmital - Viçosa/MG**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa - MG, 2013.

BOSCOV, M. E.G.. **Geotecnia ambiental**. Oficina 3749 de textos, 2008.

CONCEIÇÃO FILHO, V. M. e MOREIRA, M. D. **Depósitos de argila do Recôncavo Baiano – geologia e potencialidade econômica**. Salvador. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. CBPM, Série Arquivos Abertos, 2001. 15, 46p

CONSÓRCIO DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **CGIRS** , 2023. Disponível em: <<https://cgirsvj.ce.gov.br/>>. Acesso em 13 de outubro de 2023.

CAMAPUM, J.C.; [et al] orgs. Solos não saturados no contexto geotécnico. **Associação Brasileira de Mecânica dos Solos**. São Paulo, 2015. 759 p.

COSTA, W. W. M. L. **Estudo da permeabilidade em solos utilizados em camada de base de aterro sanitário no semiárido Paraibano**. 2019. 85 fls. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2019.

DANIEL, D. E. Geotechnical practice for waste disposal. **Ed. Chapman & Hall**. London, 1993.

DI EMIDIO, G.; VAN IMPE, W. F.; VERÁSTEGUI FLORES, R. D. F. **Advances in Geosynthetic Clay Liners: Polymer Enhanced Clays**. In: Geo- Frontiers Congress, Dallas, Texas, USA. [Proceedings...] . ASCE, 2011. p. 1931-1940

FACINCANI, E. Tecnologia ceramica – I laterizi. Itália, Gruppo Editoriale Faenza Editrice. **Faenza**. Seconda edizione. 1992. 267p.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. **SERVMAR**. São Paulo, 2006. 114 p.

FREMPONG, E. M. AND YABFUK, E. K. “**Compatibility of three tropical clayey soils with MSW landfill leachate.**” Submitted to 57th Canadian Geotechnical Conference. Quebec City, Canada. Oct, 24-27. 2004.

FUDALA-KSIAZEK, S.; PIERPAOLI, M.; KULBAT, E.; LUCZKIEWICZ, A. A modern solid waste management strategy – The generation of new by-products. **Waste Management**, v49, p.516-529, 2016.

GIUSTI, L. A review of waste management practices and their impact on human health. **Waste Management**, v29, p.2227-2239, 2009.

GLOBO. **Inea vai multar empresa por chorume que vazou na Baixada Fluminense.** 2016a. Disponível em: <http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2016/02/inea-vai-multar-empresa-por-chorume-que-vazou-na-baixada-fluminense.html?utm_source=twitterfeed&utm_medium=twitter>. Acesso em 13 de outubro de 2023.

GLOBO. **Chorume de aterro sanitário vaza e atinge córrego em Montes Claros.** 2016b. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mg/grande-minas/noticia/2016/01/chorume-de-aterro-sanitario-vaza-e-atinge-corrego-em-montes-claros.html>>. Acesso em 13 de outubro de 2023.

HMEID, H. Ait et al. Clay mineralogy, chemical and geotechnical characterization of bentonite from Beni Bou Ifrouf Massif (the Eastern Rif, Morocco). **Geological Society**, London, Special Publications, v. 502, n. 1, p. 31-44, 2021.

HOEKS, J.; GLAS, H.; HOFKAMP, J.; RYHINER, A. H. Bentonite *LinersLiners* for Isolation of Waste Disposal Sites. **Waste Management & Research**, 1987, n. 5, p. 93-105.

KENNEY, T.C.; VAN VEEN, W. A.; SWALLOW, M. A.; SUNGAILA, M. A. Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures. **Canadian Geotechnical Journal**, v.29, p.364-374, 1992.

MAHLER, C. F.; HUSE, K. **Estudos da adição de bentonita ao solo de cobertura de aterros sanitários.** In: VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADO, 2015, Fortaleza. Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. CT/UFC, 2015. p. 339-344.

MELARE, A. V. S.; GONZALEZ, S. M.; FACELI, K.; CASADEI, V. Technologies and decision support systems to aid solid-waste management: a systematic review. **Waste Management**, 2017, vol. 59, p. 567-584.

MIGUEL, G. D; BENETTI, M.; HEINECK, K. S. Uma abordagem geral dos principais fatores influenciadores no desempenho de geocompostos argilosos. **Holos Environment**. Rio Claro, SP. Vol. 20, n. 2 (2020), p. 251-271, 2020.

Ministério do Meio Ambiente – Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. MMA – SRHU. **Águas Subterrâneas, um recurso conhecido a ser protegido.** Brasília, 2007. 38p.

MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R.; CAMPANELLA, R. G. Permeability of compacted clay. **Journal Soil mechanics and foundation division**. ASCE, 91 (4), p. 41-65, 1965.

MOLLINS, L.H.; STEWART, D.I.; COUSENS, T.W. **Predicting the properties of bentonite-sand mixtures**. Mineralogical Society, 31, p.243-252, 1996.

OSINUBI, Kolawole J.; EBEREMU, Adrian O.; AMADI, Ahamefule A. Compacted lateritic soil treated with blast furnace slag as hydraulic barriers in waste containment systems. **International Journal of Risk Assessment and Management**, 4200 v. 13, n. 2, p. 171-189, 2009.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3a ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos**, 2006. v. 1. 356p.

QASIM, S. R.; CHIANG, Walter. **Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment**. Routledge, 2017.

ROCCA, A.C.C. et al. **Resíduos sólidos industriais**. 2.ed. São Paulo. CETESB, 234p. 1993.

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

SALES, A. Com 11 dos 184 municípios servidos por aterros sanitários, CE ainda tem muito a avançar. **Agência Eco Nordeste**, 2020. Disponível em: <<https://agenciaeconordeste.com.br/com-11-dos-184-municipios-servidos-por-aterros-sanitarios-ce-ainda-tem-muito-a-avancar/>>. Acesso em: 13 out. 2023.

SHACKELFORD, C.D.; BENSON, C.H.; KATSUMI, T.; EDIL, T. B.; LIN, L. **Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids**. Geotextiles and Geomembranes, v.18, n. 2-4, p. 133-161, 2000.

SILVA, D. L. M. **Mecanismos de transporte de metais pesados em misturas de solos utilizados como camada de base em aterro sanitário**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2022.

SILVA, T. F. **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-PB, 2017.

SILVA, J. **Impermeabilização de aterros com solos argilosos: estudo da permeabilidade segundo a lei de Darcy**. IPEN, 2004. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/ictr/2004/ARQUIVOS%20PDF/12/12-025.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2023.

STEWART, D.I.; STUDDS, P.G.; COUSENS, T.W. The factors controlling the engineering properties of bentonite-enhanced sand. **Applied Clay Science**, 23, p.97-110, 2003.

TIONGSON, Jonathan M.; ADAJAR, Mary Ann Q. Compaction characteristics of a fine grained soil potential for landfill liner application. **GEOMATE Journal**, v. 19, n. 71, p. 211-218, 2020.

TORRALBA, V. **Influência do método de compactação na permeabilidade de uma mistura colúvio-composto orgânico. Dissertação de mestrado.** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

SOARES, V. **Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros sanitários.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

ZUQUETTE, L. V. Geotecnia Ambiental. 1ª ed. **Elsevier.** Rio de Janeiro, RJ. 2015. 399 p.