



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GILMAR DA SILVEIRA SILVA

COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE MISTURAS DE SOLOS VISANDO O USO EM
CAMADA DE COBERTURA EM UM ATERRO SANITÁRIO

RUSSAS/CE

2023

GILMAR DA SILVEIRA SILVA

COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE MISTURAS DE SOLOS VISANDO O USO EM
CAMADA DE COBERTURA EM UM ATERRO SANITÁRIO

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

Orientadora: Profa. Dra. Daniela Lima
Machado da Silva

RUSSAS/CE

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)

- S58c Silva, Gilmar da Silveira.
Comportamento hidráulico de misturas de solos visando o uso em camada de cobertura em um aterro sanitário / Gilmar da Silveira Silva. – 2023.
53 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Daniela Lima Machado da Silva.
1. aterros sanitários. 2. camada de cobertura. 3. caracterização geotécnica. 4. permeabilidade. I. Título.
CDD 620
-

GILMAR DA SILVEIRA SILVA

COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE MISTURAS DE SOLOS VISANDO O USO EM
CAMADA DE COBERTURA EM UM ATERRO SANITÁRIO

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

Aprovado em: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Daniela Lima Machado da Silva (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Ms. Andriele Nascimento de Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Paulo Henrique Roberto Moura
Universidade de Brasília (UnB)

A Deus.

Aos meus pais, aos meus irmãos, aos meus avós, aos que partiram e aos que chegaram, por todos os dias bons e por sua presença nos momentos difíceis, suas palavras de fé e motivação. Se um dia eu sonhei com isso, foi pelo desejo de dar o melhor de mim para vocês.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por minha vida, pelas conquistas que ele proporcionou, pelos desafios superados e pelo futuro que está por vir.

Aos meus avós Luiz (in memoriam), Carmélia (in memoriam), Antônio (in memoriam) e Leuda, à tia Leda (in memoriam) e meu primo Mizael (in memoriam), os quais independente de onde estiverem, acredito olharem por mim.

À meus pais, meus maiores exemplos e apoiadores, que nunca mediram esforços para proporcionar a melhor educação possível, seguir seus passos foi e sempre será minha maior inspiração.

Aos meus irmãos, cunhada e sobrinhos, que me alegraram com suas brincadeiras nos momentos que tivemos em família, que durante o período de realização deste trabalho foram reduzidos.

À minha orientadora, Dr^a. Daniela Machado, por todo apoio dedicado durante a elaboração deste trabalho, pelas correções, incentivos, conselhos e paciência. Sou eternamente grato por todos esses anos de aprendizado e amizade.

Aos professores, Andriele Souza e Paulo Henrique, que além de professores durante meu período de graduação na UFC Campus Russas, me darem a honra de tê-los presentes em minha banca examinadora.

Aos técnicos de laboratório da UFC Campus Russas, Allisson Moreira, Myckelle Ferreira, Patrícia Viana, Thiago Sena, Bruno de Oliveira, João Pedro, Marcos Ridiley, Orismildes Neto, Wesley Saraiva pelo auxílio na realização dos ensaios realizados e pela companhia durante os anos de graduação.

Ao professor Dr. Markos Freitas, que durante a graduação foi meu orientador nos projetos de Iniciação à Docência e Iniciação Acadêmica, seus conselhos e amizade foram fundamentais em um dos momentos mais difíceis da graduação. Lhe serei eternamente grato pelas palavras de ajuda que me fizeram estar aqui hoje.

Aos amigos e colegas de graduação Aurilene Rocha, Eric Lima, Vivian Chaves, Heitor Lima, Wanessa Magalhães, Ernande Nunes, Eugênio Santos, Daisy Siqueira, Luiza Gondim, Sabrina Oliveira e, mais especialmente, à Rafaella Cavalcante, Camila Barboza, Laís Alves, Caio Siqueira e Antônio Carlos os quais participaram da parte experimental deste trabalho e compartilharam o tempo de laboratório, fazendo-o mais alegre.

Ao Centro Acadêmico Ada Lovelace (CAAL), pelas amizades ali formadas durante nossos cafés e descansos depois do almoço. Sempre me senti muito bem acolhido, ainda que

sendo aluno de outro curso.

Ao Centro Acadêmico de Engenharia Civil (CAECIR), local onde pude conhecer as vivências e a história dos alunos que passaram e passam pelo curso, onde organizamos a torcida durante os intercursos e confraternizações.

Aos funcionários dos setores de limpeza e manutenção, que durante a graduação se tornaram companheiros de café e boa conversa, além de sempre tomar bons conselhos de suas experiências de vida.

RESUMO

A camada de cobertura de aterro sanitário é uma estrutura que tem como objetivo isolar os resíduos sólidos da superfície e evitar a contaminação do solo, da água e do ar. A análise do desempenho desta camada é necessária para garantir a eficiência e segurança dos aterros, tanto do ponto de vista geotécnico como ambiental, alguns dos aspectos que precisam ser avaliados são: resistência e deformabilidade da camada, capacidade de drenagem e retenção de gases, permeabilidade e estabilidade contra processos erosivos. Esses fatores dependem das propriedades dos materiais utilizados na camada de revestimento, das condições climáticas e do funcionamento do aterro. Este estudo apresenta uma análise do desempenho de misturas aplicáveis para a camada de cobertura do aterro sanitário, com o objetivo de avaliar o efeito da granulometria e da permeabilidade das misturas e comparar os resultados com os critérios estabelecidos nas normativas e na literatura. Esses ensaios foram realizados em laboratório com amostras em diferentes proporções. Os resultados mostraram que a permeabilidade das misturas diminuiu com o aumento da fração argila presente, atendendo também as características geotécnicas necessárias. Concluiu-se que é possível utilizar a mistura de solo para sua aplicação, visto que a granulometria melhor ajustada eleva o desempenho do material.

Palavras-chaves: aterros sanitários; camada de cobertura; caracterização geotécnica; permeabilidade.

ABSTRACT

The landfill cover layer is a structure whose purpose is to isolate solid waste from the surface and prevent contamination of the soil, water and air. Analysis of the performance of this layer is necessary to ensure the efficiency and safety of landfills, both from a geotechnical and environmental point of view. Some of the aspects that need to be assessed are: the strength and deformability of the layer, drainage and gas retention capacity, permeability and stability against erosive processes. These factors depend on the properties of the materials used in the lining layer, climatic conditions and the operation of the landfill. This study presents an analysis of the performance of applicable mixtures for the landfill cover layer, with the aim of evaluating the effect of the granulometry and permeability of the mixtures and comparing the results with the criteria established in the regulations and in the literature. These tests were carried out in the laboratory with samples in different proportions. The results showed that the permeability of the mixtures decreased as the clay fraction increased, while also meeting the necessary geotechnical characteristics. It was concluded that it is possible to use the soil mixture for its application, since the best adjusted granulometry increases the material's performance.

Keywords: landfills; cover layer; geotechnical characterization; permeability.

"Pensar é o trabalho mais difícil que existe, e é
essa a razão pela qual tão poucos se dedicam a
ele."

Henry Ford

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de aterro sanitário e seus componentes.....	3
Figura 2 – Esquema do sistema de cobertura convencional.....	7
Figura 3 – Esquema do sistema de cobertura evapotranspirativa.....	7
Figura 4 – Esquema do sistema de cobertura por barreira capilar.....	8
Figura 5 – Esquema do sistema de cobertura oxidativa.....	9
Figura 6 – Classificação granulométrica em algumas normativas.....	13
Figura 7 – Localização do aterro consorciado.....	16
Figura 8 – Localização da Cerâmica Liro.....	16
Figura 9 – Dia de coleta das amostras de solo no aterro sanitário.....	17
Figura 10 – Processo de preparação do solo para ensaios.....	18
Figura 11 – Fluxograma dos processos de ensaios.....	20
Figura 12 – Etapas da caracterização geotécnica dos solos.....	21
Figura 13 – Etapas do ensaio de permeabilidade.....	22
Figura 14 – Granulometrias dos solos e suas misturas.....	25
Figura 15 – Compactação dos solos e suas misturas.....	27
Figura 16 – Composição mineralógica do solo natural do aterro.....	27
Figura 17 – Composição química da argila.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características geotécnicas do solo para aplicação em aterros sanitários.....	6
Tabela 2 – Resumo da caracterização geotécnica dos solos e suas misturas.....	24
Tabela 3 – Limites de permeabilidade à água para solos de camadas de cobertura.....	29

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Ensaio de caracterização geotécnica e mineralógica.....	18
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Sociedade Americana para Teste e Materiais (American Society for Testing and Materials)
CCL	Composto de Solo Argiloso (Compacted Clay Liner)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CGRIS-VJ	Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Vale do Jaguaribe
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
ET	Camada Evapotranspirativa
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais
fPP	Geomembrana Flexíveis de Polipropileno
Fpp-r	Geomembrana Flexíveis de Polipropileno Reforçada
FRX	Fluorescência de Raios-X
GCL	Geocomposto Argiloso (Geosynthetic Clay Liner)
GM	Geomembrana (Geomembrane)
IP	Índice de Plasticidade
k	Coefficiente de permeabilidade à água
LAMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação - UFC Campus Russas
LCC	Laboratório de Construção Civil - UFC Campus Russas
LMSP	Laboratórios de Mecânica dos Solos e Pavimentação - UFC Campus Pici
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LRX	Laboratório de Raio X - UFC Campus Pici
NBR	Norma Brasileira
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PVC	Policloreto de Vinila

Rima	Relatório de Impacto Ambiental
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos (Unified Soil Classification System)
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency)
VFPE	Polietileno de Baixíssima Densidade

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Permeabilidade do solo à carga variável.....	21
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo geral.....	2
1.2	Objetivos específicos.....	2
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1	Aterros sanitários.....	3
2.2	Sistema de camada de cobertura de aterros sanitários.....	5
2.2.1	<i>Camada convencional de solo compactado.....</i>	<i>9</i>
2.2.1.1	<i>Composto de solo argiloso (CCL).....</i>	<i>10</i>
2.2.1.2	<i>Geocompostos argiloso (GCL).....</i>	<i>11</i>
2.2.1.3	<i>Geomembranas (GM).....</i>	<i>11</i>
2.3	Correção granulométrica do solo.....	12
3	METODOLOGIA.....	15
3.1	Área experimental.....	15
3.2	Coleta das amostras.....	17
3.3	Procedimentos experimentais.....	18
3.3.1	<i>Ensaio de caracterização.....</i>	<i>19</i>
3.3.2	<i>Ensaio de permeabilidade da água.....</i>	<i>21</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
4.1	Ensaio geotécnicos.....	24
4.1.1	<i>Ensaio de caracterização geotécnica.....</i>	<i>24</i>
4.2	Espectrometria de fluorescência de raio-x (FRX).....	27
4.3	Ensaio de permeabilidade à água.....	29
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
5.1	CONCLUSÕES.....	31
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	31
	REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

O marco do saneamento, instituído pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010, estabelece que os municípios devem elaborar planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos, onde é contemplado o encerramento dos lixões e a implantação dos aterros sanitários com as respectivas camadas de base e cobertura adequadas.

Os aterros sanitários são obras de engenharia bastante complexas, pois são projetados para acondicionar e permitir o tratamento dos resíduos sólidos. Desse modo, essas obras utilizam conceitos de geotecnia, saneamento, microbiologia e química ambiental, já que existem diversos elementos construtivos nos aterros que visam garantir que os subprodutos da biodegradação não alcancem o solo, o lençol freático e o ar. Alcântara (2007) interpreta o aterro de resíduos sólidos como um ecossistema complexo, onde um material confinado passa por processos físicos, químicos e biológicos em que é favorecida a degradação deste, resultando em subprodutos em forma líquida (lixiviado) e gasosa (biogás). Dentre estes, destaca-se o biogás, embora seja conceituado como uma mistura de diversos gases (metano, gás carbônico, sulfeto de hidrogênio, monóxido de carbono) que apresenta, aproximadamente 80% de gases de efeito estufa (gás carbônico e metano) na sua composição.

Segundo Catapreta (2008), a camada de cobertura tem por objetivo segregar os resíduos sólidos do ambiente externo, limitando a entrada de água e ar e restringindo a saída de gases oriundos da decomposição de matéria orgânica ali presente, evitando a propagação de odores e vetores de doenças.

USEPA (2004) define que a camada de cobertura dos aterros sanitários pode ser executada de três maneiras: com o uso de solo compactado, geocompostos argilosos e geomembranas, sejam separados ou atuando em conjunto. Contudo, o uso de camadas de solo compactado como método de impermeabilização é visto como mais economicamente viável, quando este se apresenta de forma adequada para implementação em áreas próximas ao aterro (Araújo *et. al*, 2014).

A normativa brasileira vigente no que tange a projetos de aterros sanitário, (NBR 13896:1997 e NBR 15849:2010) não define um tipo ou classes de solos, muito menos uma padronização para a execução da camada de cobertura de aterros sanitários, onde a exigência é que o índice k de permeabilidade seja inferior a 10^{-8} m/s. Como complemento para a realização de tais projetos, são levados em consideração manuais como os concebidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA).

Com a implantação do aterro sanitário gerido pelo Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento Resíduos Sólidos (CGRIS) – Vale do Jaguaribe na cidade de Limoeiro do Norte surge a necessidade de avaliar a qualidade do solo ali presente, buscando definir as características do material para determinar sua empregabilidade para as camadas sob as quais os resíduos ali destinados serão passarão pelos processos de degradação.

1.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento hidromecânico de misturas de solos visando o uso em camada de cobertura em um aterro sanitário localizado na mesorregião do Vale do Jaguaribe–CE.

1.2 Objetivos específicos

Espera-se ao final deste estudo, alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Determinar a caracterização geotécnica, mineralógica e hidromecânica dos solos e misturas alvos do estudo;
- Analisar as propriedades provenientes dos resultados dos ensaios realizados;
- Determinar a mistura que melhor atende aos requisitos necessários para aplicação como camada de cobertura do aterro sanitário em estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são apresentadas as normativas e literaturas nas quais o trabalho se baseia.

2.1 Aterros sanitários

De acordo com a definição dada pela ABNT NBR 8419 (1992), o aterro sanitário é um método aplicado para a destinação final de resíduos sólidos oriundos das regiões urbanas. Este resíduo é confinado em camadas de materiais inertes, em sua maioria solo, de modo a armazená-los em volumes reduzidos denominados de células que são encerradas a cada dia de trabalho ou em intervalos específicos de tempo a depender da necessidade do projeto.

Monteiro (2001) complementa afirmando que os aterros sanitários evitam que os resíduos sejam despejados de forma irregular em locais inadequados como lixões, terrenos baldios, rios, lagos ou oceanos. Esses locais geram diversos problemas ambientais como a poluição do solo, da água e do ar, a propagação de vetores de doenças, a geração de odores desagradáveis e a degradação da paisagem.

A Figura 1 ilustra os principais elementos de um aterro sanitário e suas diversas fases de execução.

Figura 1 – Representação de aterro sanitário e seus componentes.



Fonte: Senado Notícias (2023) (adaptado).

De acordo com Langer (1995), para a camada de cobertura é necessário cumprir alguns requisitos para a construção um aterro sanitário, de modo a evitar a liberação e a disseminação de substâncias nocivas na biosfera, tais como: a escolha de um local adequado, a aplicação de técnicas de impermeabilização e de coleta de lixiviados, o uso de técnicas de pré-tratamento e de eliminação dos resíduos e limitação da concentração de substâncias nocivas.

Langer (1995) também apresenta como o subsolo geológico tem diversas funções na eliminação superficial dos resíduos, como: formar uma base estável, impermeabilizar o solo, reter os compostos lixiviados e suas substâncias nocivas em caso de falha das barreiras técnicas. A qualidade da barreira geológica depende de fatores como:

- baixo fluxo de águas subterrâneas;
- baixa permeabilidade do solo;
- grande espessura e homogeneidade;
- grande extensão da barreira geológica;
- alta capacidade de retenção (adsorção);
- baixa solubilidade química;
- alta estabilidade erosiva do substrato.

A barreira geológica deve garantir a proteção das águas subterrâneas contra a poluição por compostos lixiviados a longo prazo, complementa Brollo (2001). Por isso, a qualidade do subsolo geológico é essencial no processo e na avaliação das alternativas de localização.

Entrando no contexto legal e normativo, Boscov (2008) inicia citando o artigo 225 do Capítulo VI da Constituição Federal, que atribui ao indivíduo o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, tendo seu uso comum como parte da qualidade de vida e cabendo ao Estado e aos seus indivíduos o dever de defender e preservar.

Dentro do Ministério do Meio Ambiente funciona o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), órgão responsável pelas resoluções que determinam a legislação sobre os aterros sanitários. Boscov (2008) define as resoluções e normas que regem a política aplicada aos aterros sanitários na seguinte forma:

- Resolução Conama nº 1 (1986): Dispõe dos critérios mínimos e diretrizes para o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do Relatório de Impacto Ambiental (Rima).
- Resolução Conama nº 237 (1997): Dispõe das conformidades da Política Nacional de Meio Ambiente;

- Resolução Conama nº 307 (2002): Discorre sobre a gestão de resíduos provenientes da construção civil;
- Resolução Conama nº 308 (2002): Discorre sobre o licenciamento ambiental de sistemas de disposição final de resíduos sólidos urbanos gerados em municípios de pequeno porte;
- Portaria nº 518 do Ministério da Saúde (2004): Estabelece os padrões de potabilidade de água destinada ao consumo humano por meio de indicadores microbiológicos, físicos, sensoriais e concentrações de substâncias orgânicas e inorgânicas;
- NBR 8418 (1984): Apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos;
- NBR 8419 (1992): Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos;
- NBR 8849 (1985): Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos;
- NBR 10157 (1987): Aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, construção e operação;
- NBR 13896 (1997): Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, construção e operação – Procedimento;
- NBR 15112 (2004): Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15113 (2004): Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15114 (2004): Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.

2.2 Sistema de camada de cobertura de aterros sanitários

Em consenso com Ferreira *et al.* (2022) a camada de cobertura nos aterros sanitários desempenha um papel fundamental na gestão adequada de resíduos sólidos urbanos, uma vez que tem como objetivo principal minimizar os impactos ambientais e reduzir os riscos para a saúde pública que podem surgir da exposição dos resíduos ao ambiente circundante. Essa camada desempenha diversas funções essenciais, incluindo a prevenção da infiltração de água pluvial nos resíduos, impedindo a formação de lixiviado em excesso e a

emissão de gases poluentes, além de evitar a disseminação dos resíduos devido à ação do vento. Além disso, a camada de cobertura contribui para a minimização de odores, limita o contato de aves e vetores de doenças com os resíduos, facilita a operação de veículos e ajuda na prevenção de incêndios, além de reduzir o impacto visual.

Segundo Pimentel (2012) a camada de cobertura pode ser classificada em três tipos, dependendo do momento de aplicação e da espessura desejada. A camada diária é aplicada ao final de cada dia de trabalho. A camada intermediária, com uma espessura de aproximadamente 30 cm, é utilizada em áreas que permanecerão inativas por um período prolongado. Por fim, a camada final, cuja espessura varia de acordo com o projeto, é aplicada na conclusão do aterramento.

As literaturas e normativas definem alguns parâmetros como critérios mínimos para que a camada de cobertura de solo seja aplicável. A Tabela 1 apresenta as normativas mais comumente utilizadas para a caracterização como solo próprio para camadas de cobertura.

Tabela 1 – Características geotécnicas do solo para aplicação em aterros sanitários.

Normativa	Permeabilidade (m/s)	Limites de consistência	Porcentagem de finos (%)	Espessura (m)	Classificação (SUCS)
CETESB (1993)	–	IP ≥ 15%	> 30%	–	CL, CH, SC e OH
Norma alemã (1993)	5x10 ⁻¹⁰	LL ≥ 30%	–	> 0,50	–
ABNT (1997)	10 ⁻⁸	–	–	–	–
USEPA (2004)	10 ⁻⁹	–	30 – 50%	0,30 – 0,60	–
FEAM (2006)	–	–	–	0,20 – 0,60	–

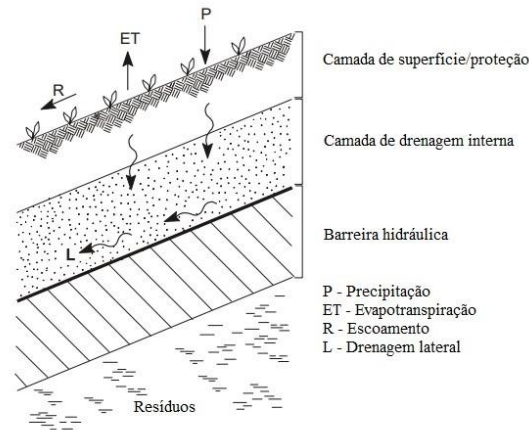
Fonte: Araújo (2017) (Adaptado).

Os sistemas de camadas de cobertura de aterros sanitários podem ser divididos em convencional, evapotranspirativa, barreira capilar e oxidativa, conforme apresentado por USEPA(1993).

A camada de cobertura convencional ou resistiva, ainda conhecida como barreira hidráulica, tem seu princípio baseado em uma barreira física aplicada diretamente sobre a massa de resíduos visando combater a infiltração excessiva de precipitação. Esse sistema pode ser composto de solos argilosos (CCL), geocompostos argilosos (GCL) e geomembranas

(GM) ou ainda da mescla entre eles (USEPA, 1993; Mariano e Jucá, 2008). A Figura 2 retrata de forma esquemática uma camada de cobertura convencional.

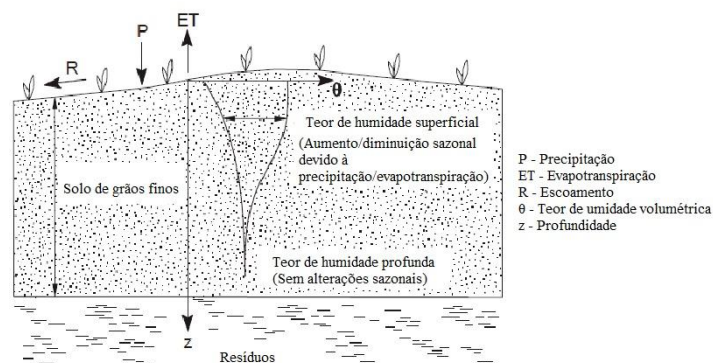
Figura 2 – Esquema do sistema de cobertura convencional.



Fonte: USEPA (2004) (adaptado).

A camada evapotranspirativa ou monolítica, denominadas pela sigla ET consistem em uma camada espessa de solo com alto teor de fino, capaz de permitir a existência de vegetação, sendo comum a aplicação de areias siltosas, siltes e siltes argilosos. Tais solos possuem propriedades como elevada capacidade de armazenamento de água e baixa condutividade hidráulica mesmo em situações de alto grau de saturação, impedindo assim que a frente de umidade avance para as camadas subjacentes em período chuvoso, a fazendo muito aplicável em regiões áridas e semiáridas (USEPA, 2004; Zornberg & LaFountain, 2003). A Figura 3 demonstra o funcionamento deste modelo de camada.

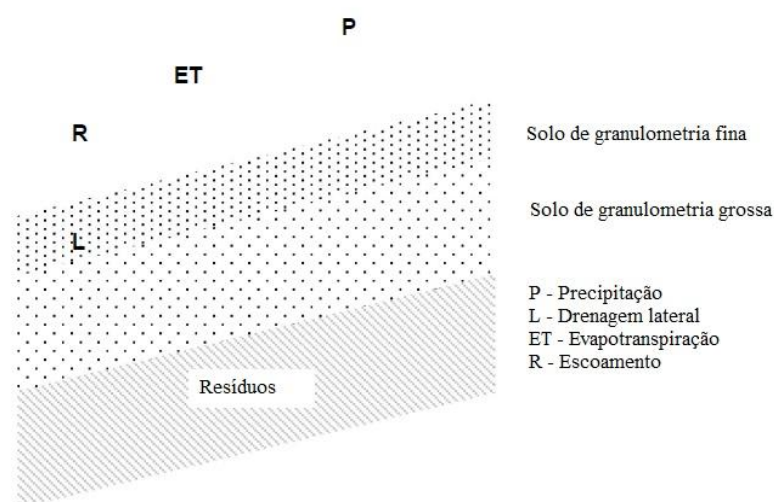
Figura 3 – Esquema do sistema de cobertura evapotranspirativa.



Fonte: USEPA (2004) (adaptado).

As barreiras capilares são compostas por camadas de solo, com grãos mais finos sobrepondo-se a camadas de solo com grãos mais grossos. A camada de solo de grãos mais finos têm maior capacidade de armazenamento de água do que uma camada de solo com maior granulometria. Em condições de baixa saturação do solo, a condutividade hidráulica do solo com grãos mais grossos é menor do que a do solo com grãos mais finos, enquanto em condições de alta saturação, ocorre o contrário. As barreiras capilares armazenam a água infiltrada no solo mais fino até que seja removida pela evapotranspiração. Elas também podem desviar a água infiltrada por meio de um fluxo lateral não saturado no solo fino (USEPA, 2004; Costa, 2015). A Figura 4 apresenta esquematicamente como a camada é realizada.

Figura 4 – Esquema do sistema de cobertura por barreira capilar.



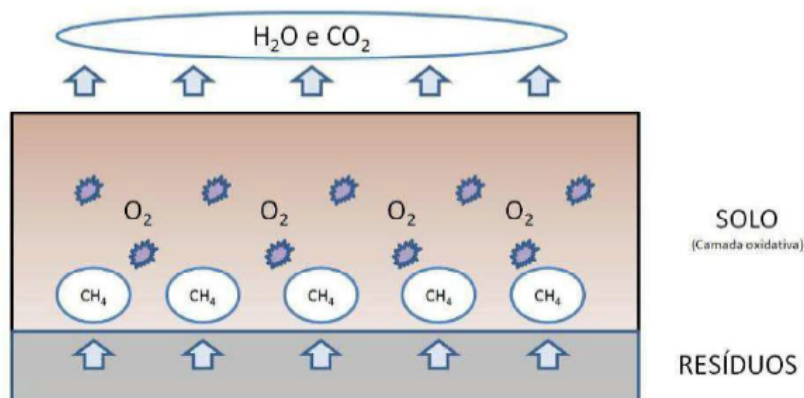
Fonte: USEPA (2004) (adaptado).

A camada oxidativa ou metanotrófica é um sistema de cobertura no qual a presença de matéria orgânica otimiza as condições necessárias para o desenvolvimento de bactérias metanotróficas e melhoria da vida biótica ali presente. A manipulação das coberturas dos aterros sanitários é uma estratégia promissora para controlar as emissões de metano que escapam à recolha de gás. Essa abordagem é especialmente útil em locais com baixa produção de metano, onde a recuperação de energia ou a queima são ineficientes (Huber-Humer *et al.* 2009).

As coberturas biológicas artificiais podem ser utilizadas para controlar as emissões de gases em aterros com resíduos pré-tratados ou em países em desenvolvimento. No entanto, a implementação dessas coberturas requer a utilização de abordagens de avaliação

durante o planejamento e operação do sistema, a fim de verificar sua eficácia na redução do metano (Huber-Humer *et al.* 2009). A Figura 5 traz a representação de como a camada oxidativa realiza o processo de conversão do metano em outros elementos.

Figura 5 – Esquema do sistema de cobertura oxidativa.



Fonte: Araújo (2017)

2.2.1 Camada convencional de solo compactado

A barreira hidráulica é essencial para limitar a infiltração de água através do sistema de cobertura, evitando assim a sua percolação em quantidades indesejáveis. Além disso, essa barreira é responsável também por armazenar ou drenar lateralmente a água nas camadas superiores. Em casos de resíduos que geram gases ou possuem componentes voláteis, a barreira hidráulica impede a migração desses poluentes através do sistema de cobertura e para a atmosfera (CETESB, 1993; USEPA, 2004).

É importante que a barreira hidráulica ofereça uma alta resistência à percolação da água, normalmente devida a uma baixa condutividade hidráulica saturada. No entanto, é fundamental considerar a capacidade dessa barreira funcionar conforme o esperado ao longo do tempo. Dependendo do material escolhido, a barreira pode ter sua capacidade de impedir o fluxo de água substancialmente reduzida devido a deformações, ciclos de umidade, ciclos de congelamento–descongelamento e intrusão biológica. Mesmo sem estar sujeita a essas tensões, a barreira pode se degradar com o tempo, como no caso dos GMs que perdem seus oxidantes por volatilização USEPA (2004).

Os materiais utilizados para as barreiras hidráulicas incluem CCLs, GCLs e GMs. A grande maioria das coberturas é composta por um ou por um misto dos três materiais acima referidos, sendo as opções na categoria dos materiais compostos normalmente GM/GCL, GM/CCL ou GM/GCL/CCL. A aplicação mista dos materiais é tida como superior em desempenho para o resultado final em comparação a aplicação simples.

2.2.1.1 *Composto de solo argiloso (CCL)*

O CCL é feito de materiais mineralogicamente estáveis, tido como o material mais aplicado em sistemas de cobertura com uma vantagem sobre os GM e GCL porque são muito mais espessos, tornando-os menos suscetíveis a perfurações acidentais. Contudo, quando utilizado isoladamente, o CCL em sistemas de cobertura pode não manter baixa permeabilidade durante longos períodos de tempo, isto é especialmente verdadeiro quando a aplicação ocorre em locais áridos ou semiáridos, se estiver localizada acima da profundidade de penetração do gelo ou se a cobertura do solo acima for insuficiente para evitar fissuras devido ao ressecamento (USEPA, 2004).

O aumento na permeabilidade é devido aos efeitos de ciclo seco-úmido e gelo-degelo, penetração de raízes e recalque diferencial. Outra limitação dos CCLs é a sua incapacidade de acomodar todos os recalques diferenciais dos rejeitos de base, exceto o menor, sem fissuras por tensão ascendente pode torná-lo praticamente inútil como barreira à entrada de água ou escape de gás. Os CCLs são construídos principalmente a partir de materiais terrosos naturais ricos em argila, embora as barreiras também possam conter materiais tratados, como a bentonita (USEPA, 2004). CETESB (1993) apresenta que as especificações para os CCLs que devem ter:

- permeabilidade não superior a 1×10^{-9} m/s;
- percentagem mínima de finos (partículas que passam na peneira nº 200 (aberturas de 0,074 mm)) $\geq 30-50\%$;
- índice de plasticidade mínimo $\geq 7-15\%$;
- percentagem máxima de cascalho (partículas retidas na peneira n.º 4 (aberturas de 4,76 mm)) $\leq 20-50\%$; e
- tamanho máximo de partícula $\leq 25-50$ mm.

2.2.1.2 *Geocompostos argiloso (GCL)*

Os GCLs são produtos finos produzidos em fábrica que contêm uma camada de bentonita sódica envolta por uma ou duas camadas de geossintéticos que detêm propriedades interessantes para aplicações em sistemas de cobertura, como condutividade hidráulica saturada muito baixa, manutenção de baixa condutividade hidráulica quando expostos a diferentes fatores de estresse e facilidade de instalação (USEPA, 2004).

As desvantagens do GCL incluem baixa resistência ao cisalhamento interno da bentonita hidratada, resistência ao cisalhamento interfacial potencialmente baixa em suas superfícies superior e inferior, potencial para aumento da condutividade hidráulica devido a reações de troca catiônica sob certas condições, potencial para hidratação prematura durante a instalação, dessecação, fissuração da camada de bentonita e penetração das raízes no GCL desprotegido. Embora sejam relativamente novos, a sua utilização aumentou rapidamente nas últimas décadas, porém ainda são menos frequentemente usados sozinhos como camada de cobertura (USEPA, 2004).

2.2.1.3 *Geomembranas (GM)*

As geomembranas (GMs) são materiais finos de polímeros utilizados como barreiras hidráulicas em sistemas de cobertura devido à sua estrutura não porosa, flexibilidade e facilidade de instalação. Elas possuem vantagens como baixas taxas de permeabilidade de água e gás, capacidade de alongamento sem rasgar e proteção contra ressecamento e penetração de raízes. Por outro lado, algumas desvantagens incluem vazamentos ocasionais, potencial de deslizamento nas áreas de iteração e incerteza sobre sua vida útil (USEPA, 2004).

Os materiais mais comumente utilizados para GMs são polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixíssima densidade (VFPE), polipropileno não reforçado (fPP), polipropileno reforçado (fPP-R) e policloreto de vinila (PVC), há também o desenvolvimento de novos materiais e diferentes superfícies lisas e texturizadas para aumentar a fricção e resistência ao cisalhamento em encostas íngremes. Apesar das várias vantagens e desvantagens, é importante distinguir os requisitos de uma GM para um sistema de revestimento e um sistema de cobertura. Enquanto o PEAD é comumente usado para sistemas de revestimento, as GMs flexíveis feitas de PVC, VFPE e fPP têm ganhado mais utilização em sistemas de cobertura. A compatibilidade química também deve ser considerada para a

superfície inferior das GMs em condições específicas do local. As especificações para as GMs incluem requisitos de resina e aditivos, limitações na quantidade de cargas e material reciclado, espessura mínima e requisitos de resistência e alongamento (USEPA, 2004).

Num contexto geral o uso de solo compactado como camada de cobertura de aterros sanitários é o mais adotado devido o seu baixo custo com material e execução, porém deve ser analisado para cada execução a viabilidade de cada material.

2.3 Correção granulométrica do solo

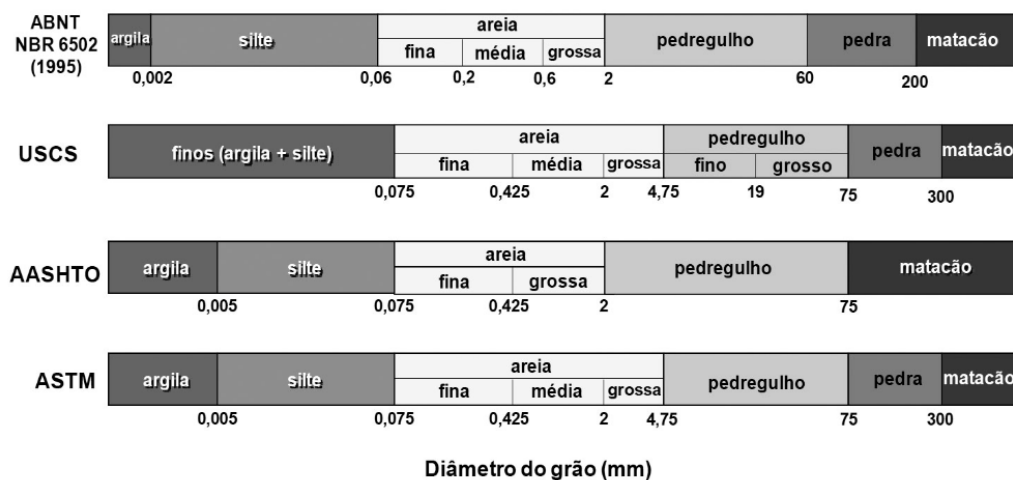
De acordo com Lima *et al.* (2003), o processo de estabilização ou correção do solo se trata da modificação artificial do comportamento de um solo, com o objetivo de torná-lo adequado para uso em projetos de engenharia. Este processo adquire um caráter quantitativo através de parâmetros associados a critérios específicos de projeto. Estes incluem resistência ao cisalhamento, deformação sob ação de cargas e absorção de umidade, entre outros aspectos.

Segundo Winterkorn (1955), a estabilização do solo envolve:

- Diagnóstico das propriedades de resistência de um determinado solo e suplementação necessária dessas propriedades para o uso pretendido em termos físicos, físico-químicos ou químicos;
- Compreensão dos requisitos suplementares para os materiais e processos disponíveis e decisão sobre a utilização de um método específico (ou escolha do método) com base em considerações económicas, de viabilidade prática ou especiais (militares ou outras emergências);
- Construção, que consiste normalmente em trituração, mistura com material estabilizador e densificação; e
- Considerações económicas relacionadas com o custo total composto pelo custo dos materiais, da construção e da manutenção durante a vida útil da estrutura.

A Figura 6 apresenta algumas das classificações de granulometria em normas comumente utilizadas nos estudos de classificação do solo.

Figura 6 – Classificação granulométrica em algumas normativas.



Fonte: Suporte Solos (2018).

Silva (1968) identifica quatro métodos de estabilização do solo: mecânica, química, elétrica e térmica. A estabilização mecânica envolve a alteração do sistema trifásico do solo para melhorar seu comportamento, utilizando técnicas como compactação e drenos verticais de areia. Essa estabilização geralmente envolve o rearranjo das partículas através da compactação e a adição ou remoção de partículas através da correção granulométrica.

A estabilização química ocorre quando um aditivo é introduzido no solo, alterando suas propriedades. Isso pode ocorrer através de vários mecanismos, incluindo a substituição de moléculas de água e cátions adsorvidos por cátions repelentes de água, o estabelecimento de ligações reforçadas entre agregados de partículas pela adição de ligantes, floculação e dispersão (Silva, 1968).

A estabilização elétrica é um processo que ocorre quando uma corrente elétrica é passada pelo solo. Em solos arenosos saturados ou quase saturados, a estabilização ocorre através de descargas sucessivas de alta tensão. Em solos argilosos, utiliza-se a estabilização contínua de baixa tensão. No entanto, a literatura sobre a estabilização por descargas de alta tensão é limitada, e a que utiliza correntes de baixa tensão baseia-se nos fenômenos de eletromose, eletroforese e consolidação eletroquímica (Silva, 1968).

A estabilização térmica do solo pode ser alcançada de três maneiras diferentes. Primeiro, através do congelamento, que altera a textura do solo para melhorar temporariamente seu comportamento. Segundo, através do aquecimento, que visa o rearranjo da rede cristalina dos minerais constituintes do solo e, finalmente, através da termosose,

uma técnica de drenagem que promove a difusão de um fluido em meio poroso pela ação de gradientes de temperatura (Silva, 1968).

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa teve sua viabilidade técnica garantida através da parceria com o Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Vale do Jaguaribe (CGIRS-VJ) e com a Cerâmica Liro, sendo os experimentos realizados no Laboratório de Construção Civil e Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação na Universidade Federal do Ceará, campus Russas, e no Laboratórios de Mecânica dos Solos e Pavimentação e Laboratório de Raio X, campus Pici.

A pesquisa é pautada na caracterização geotécnica de solos e suas misturas para a utilização como sistema de camada de cobertura de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, por meio de investigação laboratorial.

3.1 Área experimental

O material que serviu de base para esse estudo é proveniente do aterro gerido pela CGIRS-VJ localizado no município de Limoeiro do Norte nas proximidades da CE-266 e das comunidades rurais Sítio Barroco, em Tabuleiro do Norte – CE, e Café Queimado, no município de Limoeiro do Norte – CE. A área escolhida se encontra distante aproximadamente 13,5 km da zona urbana mais próxima (Limoeiro do Norte) no ponto de coordenadas planas aproximadas UTM (9.424.510 S; 585.615 E), o projeto prevê uma área total mínima de 36,4 hectares com duração de vida útil de 30 anos.

O consórcio atende as cidades de Alto Santo, Ererê, Iracema, Limoeiro do Norte, Morada Nova, Palhano, Potiretama, Quixeré, Russas, São João do Jaguaribe e Tabuleiro do Norte, todas localizadas na mesorregião do Vale do Jaguaribe no estado do Ceará. O aterro é ilustrado na figura 7.

Figura 7 – Localização do aterro consorciado.



Fonte: Google Earth (2023).

Para o estudo também foram coletadas amostras de solo cedidas pela Cerâmica Liro, empresa de cerâmica vermelha localizada na comunidade Ingá, no município de Russas-CE. A empresa cerâmica é mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Localização da Cerâmica Liro.



Fonte: Google Earth (2023).

3.2 Coleta das amostras

Os materiais foram coletados e acondicionados em sacos de fibra de nylon e em baldes plásticos, visando manter condições das amostras o mais próximo do retirado em campo.

O primeiro material a ser coletado foi o solo presente no aterro sanitário, a coleta se deu em 29 de março de 2023, durante o período chuvoso na região. Com o intuito de ter uma melhor representatividade, a amostra coletada foi retirada após a remoção de uma camada de solo superficial, uma vez que devido às chuvas teve parte dos finos levada. Assim comprometeria a coerência do material em campo em relação ao utilizado em laboratório, tal processo foi realizado em dois pontos distintos com a finalidade de comparação. A Figura 9 apresenta as condições na qual o solo natural do aterro foi coletado.

Figura 9 – Dia de coleta das amostras de solo no aterro sanitário.



Fonte: Autor (2023).

A segunda coleta ocorreu em 22 de junho de 2023, as amostras de solos cedidas foram retiradas do estoque de material para fabricação de cerâmica presente na empresa. As amostras foram coletadas e divididas em dois sacos que posteriormente tiveram seus

conteúdos misturados para utilização nos ensaios.

Com as amostras de solos coletadas foram realizadas a composição de duas misturas nas proporções em relação a massa de 6:4 e 5:5 do solo do aterro e do solo argiloso, respectivamente. Tal proporção foi baseada no teor de finos necessários definidos pelas normativas.

3.3 Procedimentos experimentais

Após a etapa de coleta dos solos, o material foi transportado até o Laboratório de Construção Civil (LCC) da UFC. Após o período de secagem de 24 horas ao ar livre o material foi destorroado manualmente e em seguida quarteado e separado o solo a ser utilizado nas caracterizações e misturas. A Figura 10 apresenta a aplicação do processo de preparação do solo de aterro para os ensaios de caracterização e misturas, o procedimento foi realizado da mesma forma para o solo argiloso proveniente da cerâmica.

Figura 10 – Processo de preparação do solo para ensaios.

I - Solo in natura pós destorroamento



II - Quarteamento do material



III - Material pronto para os experimentos



Fonte: Autor (2023).

3.3.1 Ensaios de caracterização

Buscando a obtenção dos dados iniciais requeridos, a caracterização geotécnica dos solos coletados foi, segundo a normativa padrão, realizada conforme apresentado no Quadro 1. Dentre os dados apresentados no quadro também estão relacionados os devidos locais em que cada ensaio foi promovido.

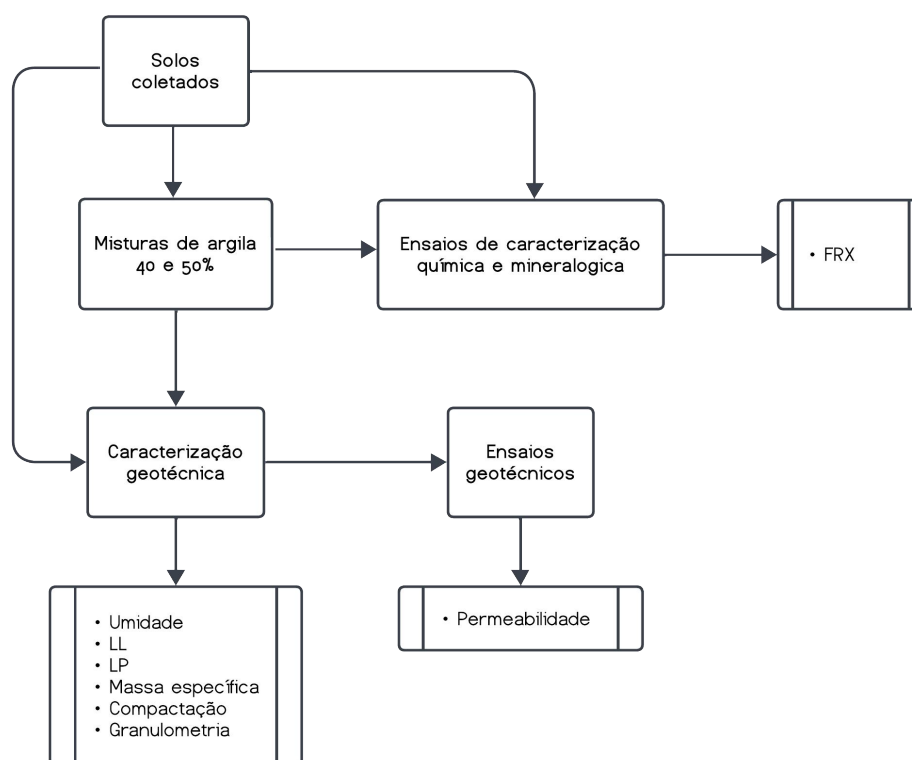
Quadro 1 – Ensaios de caracterização geotécnica e mineralógica.

Ensaio	Método	Executado em
Umidade	NBR 6457 (ABNT, 2016a)	LCC – UFC Campus Russas
Limite de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016b)	
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016c)	
Massa específica dos grãos	NBR 6508 (ABNT, 2016d)	
Compactação	NBR 7182 (ABNT, 2016e)	
Granulometria – Peneiramento e Sedimentação	NBR 7181 (ABNT, 2016f)	LCC/LAMSP – UFC Campus Russas
Permeabilidade – Carga Constante e Variável	NBR 14545 (ABNT, 2000)	LMSP – UFC Campus Pici
Principais Óxidos	Fluorescência de Raios-X	LRX – UFC Campus Pici

Fonte: Autor (2023).

Os processos em questão são descritos de maneira mais linear através do fluxograma apresentado na Figura 11. Este fluxograma fornece uma representação visual detalhada de cada etapa do processo experimental, permitindo uma compreensão clara e direta do fluxo de trabalho, onde cada etapa do processo foi representada por um bloco próprio interligados por linhas e setas, indicando a sequência das etapas realizadas, ilustrando brevemente cada uma.

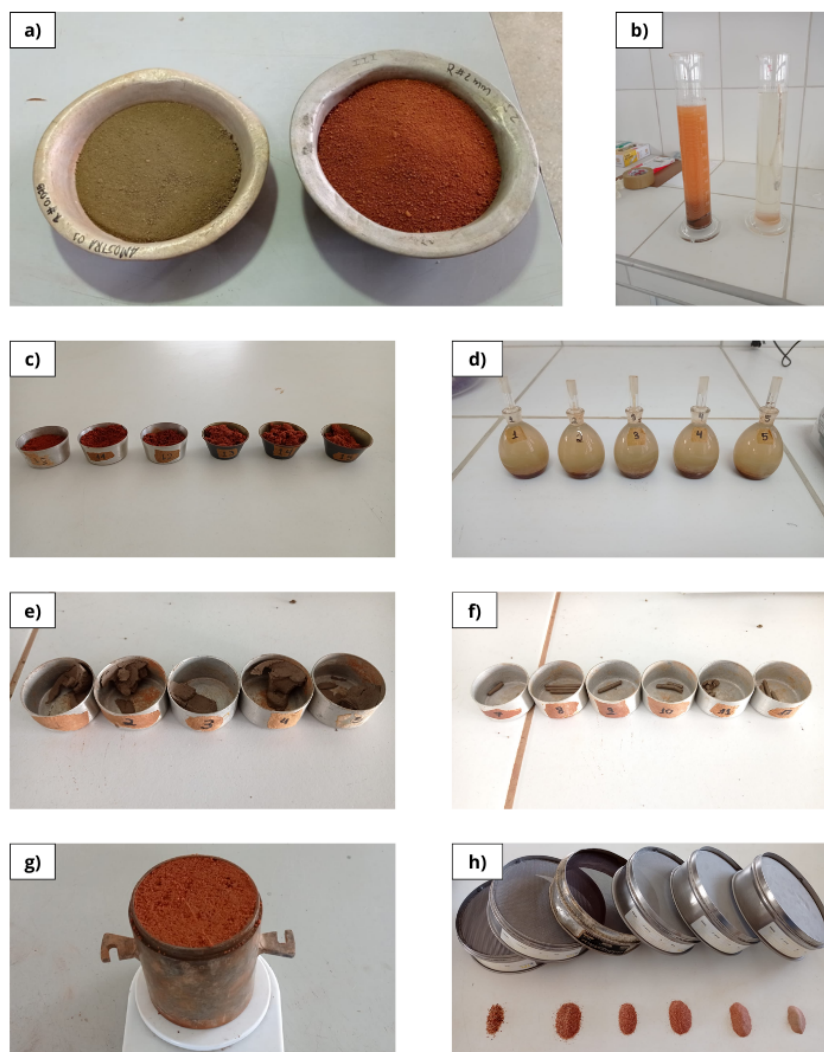
Figura 11 – Fluxograma dos processos de ensaios.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 12 ilustra os processos efetuados na fase de caracterização dos solos seguinte a preparação das amostras, sendo apresentadas (a) Amostras após pesagem, (b) Ensaio de granulometria por sedimentação, (c) Ensaio de umidade do solo, (d) Ensaio de densidade real, (e) Ensaio de limite de liquidez, (f) Ensaio de limite de plasticidade, (g) Ensaio de compactação do solo e (h) Ensaio de granulometria por peneiramento.

Figura 12 – Etapas da caracterização geotécnica dos solos.



Fonte: Autor (2023).

3.3.2 Ensaio de permeabilidade da água

O ensaio de permeabilidade do solo baseou-se na NBR 14545:2021, da qual aplicou-se o método B nela descrito, em que não há aplicação de contrapressão de modo a garantir saturação do material, sendo sua realização feita no LMSP da UFC Campus Pici, e o permeâmetro adotado era de carga constante para o solo natural do aterro e carga variável para as misturas. O solo argiloso não foi considerado para a mistura uma vez que o intuito deste estudo é a aplicação no aterro sanitário, atestando a viabilidade do solo ali presente e das misturas que podem ou não ser implementadas.

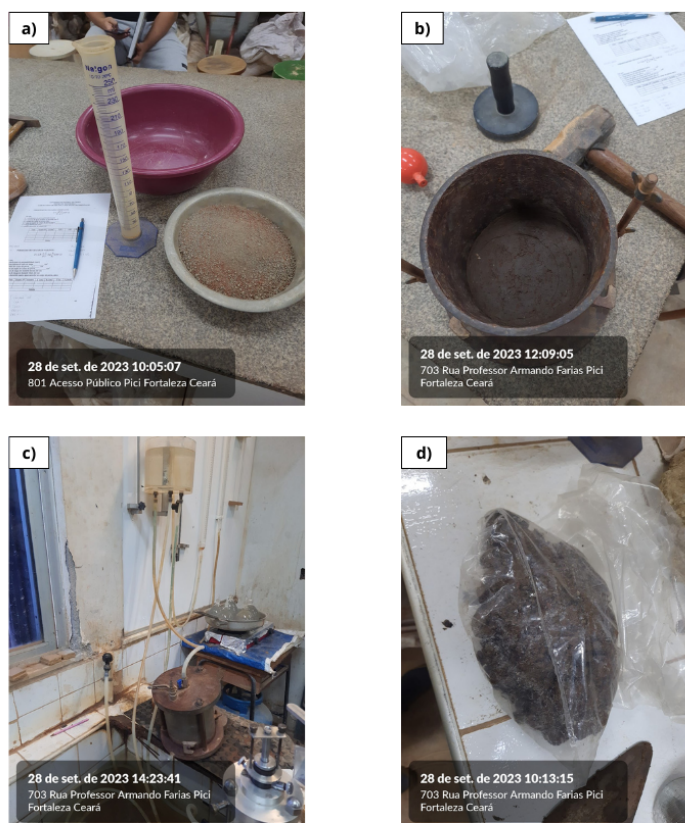
Com as amostras preparadas se deu início ao ensaio pela etapa de umidificação,

conforme a umidade ótima determinada pelo ensaio de compactação do solo. Passando para a etapa de compactação da amostra, em que o solo úmido foi moldado dentro um cilindro metálico para, em seguida, ser fixado a base do permeâmetro e envolto de pasta argilosa, impedindo que a água vazasse para fora do cilindro com solo presente como é apresentado na Figura 13(b).

Sobre o corpo de prova ocorreu a adição de brita como material permeável, de modo que este garantisse o regime laminar do escoamento, conforme definido na Lei de Darcy. Com o fechamento do permeâmetro, a amostra se manteve em regime de saturação pelo período de 24 horas, sendo possível visualizar durante o período o acúmulo de água na saída da parte inferior do aparelho, conforme a Figura 13(c).

Após o período de saturação, as primeiras leituras foram registradas aferindo-se os níveis de água presentes na bureta e calculando a diferença entre as medições, sucedendo-se desta forma até a observação de constância do material. A Figura 13(d) apresenta o material após o final do experimento.

Figura 13 – Etapas do ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autor (2023).

Após a coleta dos dados, os cálculos para o coeficiente de permeabilidade tiveram uma conversão para um coeficiente a temperatura de 20°C, definido por meio de um fator de correção aplicado de acordo com a temperatura. O F_c , como é definido o fator de correção, é obtido por meio da tabela 1c presente na norma NBR 14545:2021. Para as misturas de 40% e 50% foram utilizados, respectivamente, os valores de F_c 0,871 e 0,811. A Equação 1 é descrita a seguir.

$$k_{20^{\circ}c} = 2,3 * \frac{aL}{A\Delta t} * \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right) * F_c \quad (1)$$

Onde:

- $k_{20^{\circ}c}$: 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);
- Δt : Variação de tempo do ensaio (s);
- h_0 : Altura inicial do nível d'água (cm);
- h_f : Altura final do nível d'água (cm);
- F_c : Fator de correção (T = 20°C).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados todos os resultados desde os ensaios geotécnicos, de composição química e permeabilidade.

4.1 Ensaio geotécnicos

Dentro deste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização e seus desdobramentos em relação aos objetivos de estudo.

4.1.1 Ensaio de caracterização geotécnica

Realizada a caracterização granulométrica dos solos e misturas, os dados resultantes dos ensaios são apresentados em detalhes na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo da caracterização geotécnica dos solos e suas misturas.

Propriedades	Resultados			
	Solo natural	Argila	Mistura 40%	Mistura 50%
Argila (%)	19	55	30	35
Silte (%)	2	33	18	20
Areia F (%)	3	5	7	6
Areia M (%)	29	3	22	17
Areia G (%)	42	4	21	20
Pedregulho (%)	5	1	2	2
PDM	–	–	–	–
Umidade higroscópica (%)	0,39	4,52	1,90	2,39
Peso específico dos grãos (kN/m ³)	24,0	23,3	24,5	24,1
Limite de liquidez (%)	NP	45,0	24,9	33,0
Limite de plasticidade (%)	NP	24,35	15,24	1658

Índice de plasticidade (%)	NP	20,65	9,66	16,42
Classificação (SUCS)	SM	CL	CL	CL
Umidade ótima (%)	9,36	17,85	11,70	13,34
Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)	20,1	17,0	19,1	18,9

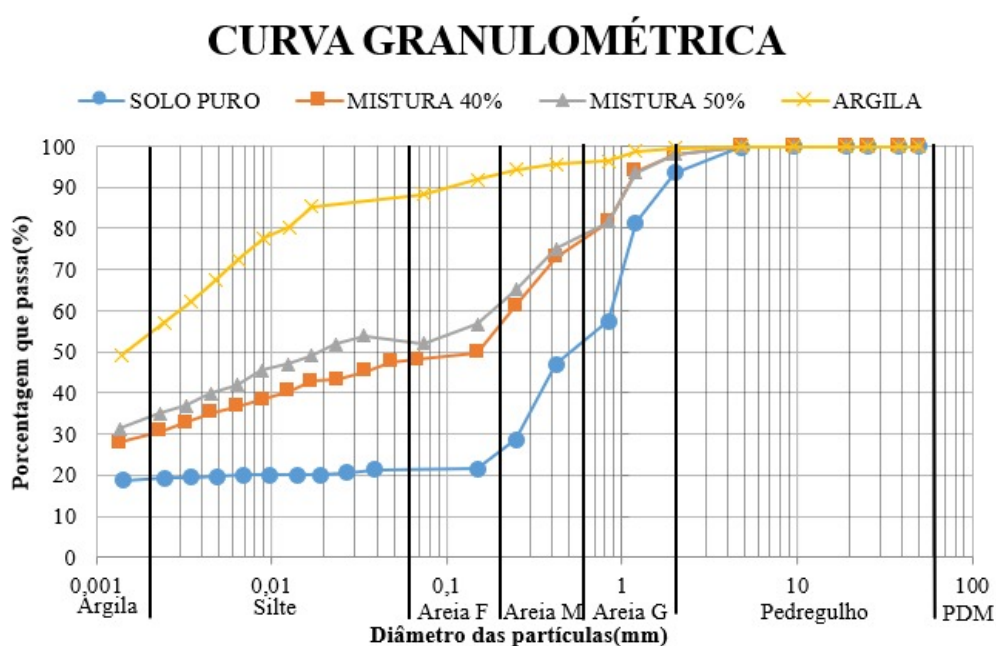
Fonte: Autor (2023).

NP – Não Possui, SM – Areia mal Graduada, CL – Argila de Baixa Compressibilidade.

O solo proveniente do aterro sanitário (Solo Puro) é composto por 74% de areia, sendo essa composição de 42% de areia grossa, 29% de areia média e 3% de areia fina. O solo proveniente da cerâmica (Argila) tem em sua composição 55% de argila e 33% de silte, conforme apresentado na Figura 14, seguindo os preceitos definidos pela NBR 7181/2016(f).

Para considerar a aplicação baseando-se na granulometria das amostras, USEPA (2004) infere que o solo aplicado deve possuir uma porcentagem de finos entre 30 e 50%, confirmando o valor mínimo de 30% imposto pela CETESB (1993). Diante disso, é possível afirmar que tanto a mistura de 40% quanto a mistura de 50% estão aptas para aplicação, algo que não se repete para o solo natural da região do aterro sanitário.

Figura 14 – Granulometrias dos solos e suas misturas.



Fonte: Autor (2023).

Para aplicação em camadas de cobertura o solo utilizado deve apresentar umidade com valores de 3,0% a 6,0%, caracterizando-o como um solo seco Araújo (2017). Tal afirmação entra em concordância com o Menezes *et. al* (2013), onde descreve a predominância de solos rasos, que possuem a tendência de permanecerem saturados em períodos de chuva e ressecar durante períodos de estiagem seguidos de altos índices de evapotranspiração e alta variação de pluviométrica durante o ano.

Conforme traz a Tabela 2, o solo natural do aterro não possui índice de plasticidade determinado, devido a inexistência de limites e de liquidez e plasticidade. Por outro lado a argila coletada possui um elevado índice de plasticidade, assim como seus limites. Tal comparativo corrobora com a ideia de mistura de solos para melhoria do solo natural, como nota-se pela existência de um índice de plasticidade definido em suas misturas.

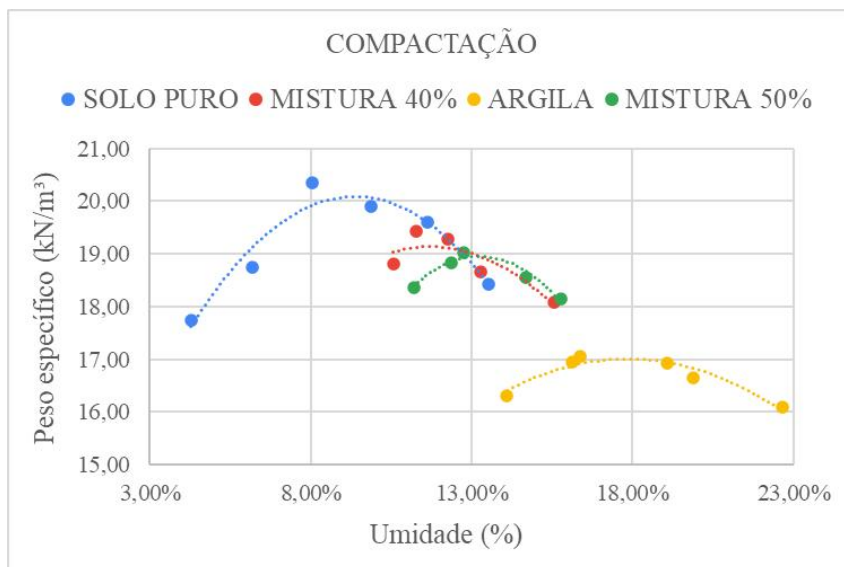
Os solos foram classificados em concordância com o padrão do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) (ASTM, 2017), no qual o solo do aterro se classifica como uma areia siltosa mal-graduada (SM) enquanto o solo argiloso ficou classificado como uma argila de baixa compressibilidade (CL).

Seu elevado peso específico, segundo Chiossi (2013), indica a presença de taxas de feldspato nos solos, e conseqüente suas misturas. Este mineral frequentemente se encontra em solos aplicados na indústria cerâmica e vítrea.

Ilustradas na Figura 15, as curvas de compactação de sob energia de Proctor Normal, obtidas através os valores coletados no ensaio, é observado que o intervalo de peso específico aparente seco é delimitado pelo solo natural do aterro ($20,1 \text{ kN/m}^3$) e pela argila ($17,0 \text{ kN/m}^3$), obtendo uma umidade ótima máxima de 17,85% para a argila. As misturas demonstraram uma relação inversamente proporcional em que a umidade ótima aumenta à medida em que o peso específico aparente seco diminui.

Embora não existam normativas, nacional ou internacional, que atribuam parâmetros de compactação para aplicação de solos em camada de cobertura aterro sanitário é possível fazer a comparação com os valores apresentados em (Kabir e Taha, 2004), pelo qual as amostras têm peso específico superior a $14,50 \text{ kN/m}^3$ são indicadas para aplicação em camadas de cobertura.

Figura 15 – Compactação dos solos e suas misturas.

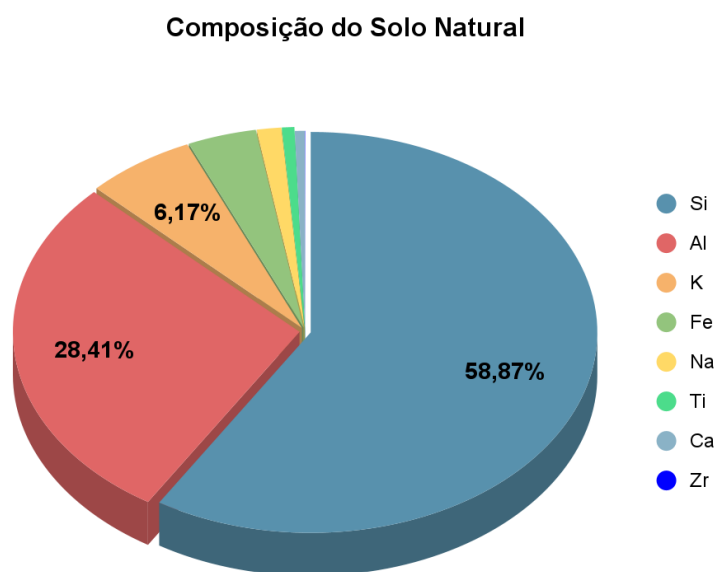


Fonte: Autor (2023).

4.2 Espectrometria de fluorescência de raio-x (FRX)

Por meio da fluorescência de raio-x (FRX), foi possível determinar a composição dos solos utilizados para estudo de forma quantitativa, as figuras 16 e 17 trazem os resultados da configuração mineral do solo natural e da argila, respectivamente.

Figura 16 – Composição mineralógica do solo natural do aterro.

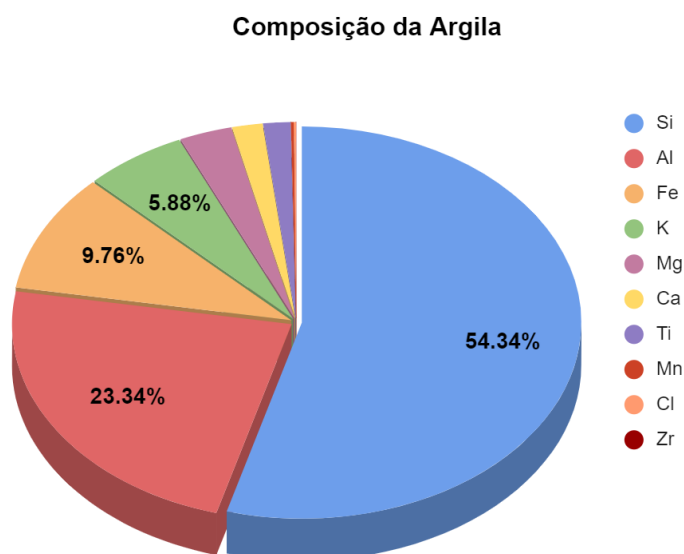


Fonte: Autor (2023).

O solo natural do aterro sanitário possui grandes concentrações de óxidos, sendo os mais predominantes o óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de potássio (K_2O), e em menores concentrações para óxidos de ferro (3,9%), sódio (1,4%), titânio (0,7%), cálcio (0,56%), zircônio (0,02%). A baixa presença de cálcio e a falta de elementos como magnésio, indicam um solo com baixa fertilidade, característica comum em latossolos Marques *et al.* (2014).

A alta presença de sílica confirma o resultado da granulometria, indicando a presença de grande quantidade de areia, o que de acordo com Araújo (2017) é responsável pela diminuição da retenção de água e diminuição da plasticidade do material, o que pôde ser corroborado com o fato do solo não apresentar plasticidade nos ensaios de limites.

Figura 17 – Composição química da argila.



Fonte: Autor (2023).

A argila segue a composição do solo natural, apresentando em maiores índices os óxidos de silício, alumínio, ferro e potássio. Em menores concentrações estão presentes óxidos de magnésio (3,05%), cálcio (1,76%), titânio (1,57%), manganês (0,16%), cloro (0,12%) e zircônio (0,02%). Considerando as características geotécnicas presentes na Tabela 2, como elevados valores de índices físicos, e a presença de elementos como magnésio e cálcio, que são indicativos de solos favoráveis à fixação de vegetação, é possível determinar que se trata de um vertissolo.

Desta forma, tem-se concordância com Santos (1975), em que essa variação de

composição química determina diferentes comportamentos do solo e, conseqüentemente em suas misturas, alterando propriedades mecânicas desfavoráveis do solo natural como plasticidade e permeabilidade.

4.3 Ensaio de permeabilidade à água

Os ensaios de permeabilidade utilizaram o permeâmetro de carga constante, para o solo natural do aterro, devido maior teor de solos granulares como areia. Para as misturas o permeâmetro de carga variável foi aplicado devido o maior teor de finos presentes.

Com a realização do ensaio permeabilidade para o solo natural e as misturas de 40 e 50%, os comparativos com as referências normativas estão representados na Tabela 3. Os valores obtidos de k para o solo natural, a mistura de 40% e 50% foram, respectivamente, $7,15 \times 10^{-7}$, $1,4 \times 10^{-8}$ e $6,7 \times 10^{-9}$ m/s.

Tabela 3 – Limites de permeabilidade à água para solos de camadas de cobertura.

Referência	Especificação (m/s)	Solo Natural	Mistura 40%	Mistura 50%
Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB)	$k < 1 \times 10^{-9}$	NA	NA	Atende
NBR 13896 (ABNT, 1997)	$k < 1 \times 10^{-8}$	NA	Atende	Atende
Environmental Protection Agency (USEPA, 1991)	$k < 1 \times 10^{-9}$	NA	NA	Atende
Norma alemã	$k < 5 \times 10^{-10}$	NA	NA	NA
Qasim e Chiang (1994)	$k < 1 \times 10^{-9}$	NA	NA	Atende

Fonte: Autor (2023).

NA – Não Atende.

Baseado nos resultados e na normativa é determinado que o solo natural é ineficaz para a implantação na camada de cobertura do aterro, uma vez que a permeabilidade elevada aumentaria o volume de lixiviado coletado devido a percolação de água para dentro das células de resíduos.

Para a mistura com 40% de argila é visto que a mesma atende o valor referente a NBR 13896:1997, mas não é suficiente para as demais normativas sendo maior que o

estabelecido por CETESB, USEPA e Qasim e Chiang (1994). Desse modo a implantação dessa mistura para camada de cobertura deve ser melhor observada para sua utilização, visto o respaldo que as normas internacionais possuem, assim como a falta de atualização da normativa brasileira (Costa, 2021).

Já a mistura com 50% de argila não somente atende a norma brasileira como também satisfaz a maior parte das normas internacionais, com exceção à norma alemã que é considerada muito rigorosa pelas literaturas aplicadas neste estudo, em especial (Araújo, 2017), correspondendo a um valor aproximadamente 14 vezes superior. Levando em conta a eficiência obtida nessa mistura, ela se mostra muito favorável a implementação como solo de camada de cobertura para o aterro sanitário que serve de material de estudo para este trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste tópico são apresentadas as conclusões a respeito do estudo desenvolvido.

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu na análise de desempenho que a utilização dos solos coletados e misturas desenvolvidas mediante estudo. A motivação pela necessidade de determinar uma aplicação viável de camada de cobertura ao aterro sanitário alvo deste estudo. Por meio dos ensaios realizados, destacam-se as seguintes conclusões:

O solo natural do aterro não é recomendado para utilização como camada de cobertura se aplicado isoladamente a baixa permeabilidade e a inexistência de índices de plasticidade e liquidez apontam para uma penetração de água e ar, bem como a liberação de gases determinando risco ao ambiente.

As misturas apresentaram melhores propriedades em relação aos solos isolados, indicando maior aplicabilidade, resultado de curvas granulométricas com menos discontinuidades e valores intermediários de umidade e índices físicos.

Dentre as misturas, a amostra com 40% de argila se mostrou menos efetiva quando analisada sua permeabilidade que apesar de ter relevante vantagem se comparada ao solo natural do aterro, não atendeu aos critérios das normas e manuais internacionais cabendo à sua aplicação uma análise mais aprofundada ou ainda a implementação em conjunto com outra técnica da camada de cobertura de aterro.

A mistura de 50% de argila por sua vez se apresenta como a mais recomendada para utilização *in situ*, pois além de possuir bom índice de plasticidade tem elevada capacidade de reter o fluxo de água e gases através da camada de cobertura, além disso a presença de elementos favoráveis ao desenvolvimento de vegetação permite que a mesma auxilie na recuperação da área e evite a erosão do solo.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho consistiu na análise de desempenho do solo natural e das misturas obtidas a partir do uso de argila usada em cerâmica vermelha. Contudo, tais resultados aqui apresentados são apenas preliminares, requerendo prosseguimento nos estudos das

características encontradas de forma mais aprofundada e investigação de outras linhas de pesquisa neste mesmo nicho. Dessa forma, algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Aplicação da mistura solo–argila em uma área experimental em campo;
- Determinação da curva de retenção de água para analisar o comportamento hidromecânico das misturas;
- Verificação da resistência mecânica com os ensaios de resistência ao cisalhamento direto ou de compressão triaxial.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 2016a.
- _____. **NBR 6.459: Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2016b. 5p.
- _____. **NBR 6502: Rochas e Solos – Terminologia.** Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm. Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2016d.
- _____. **NBR 7.180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016c. 3p.
- _____. **NBR 7.181: Solo Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016f. 12p.
- _____. **NBR 7.182: Solo Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2016e. 9p.
- _____. **NBR 8.419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 10.004: Resíduos Sólidos: classificação.** Rio de Janeiro, 2004
- _____. **NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, 1997. 12p.
- _____. **NBR 14.545: Solo Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** Rio de Janeiro, 2000. 12p.
- _____. **NBR 15849: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.** Rio de Janeiro, 2010. 24p.
- ALCÂNTARA, P.B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados.** 2007. 364f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife–PE, 2007.
- Almeida, Mario & Lima, Dario & Carvalho, Carlos & Cardoso, Machado & Sérgio, Paulo & Barbosa, Almeida & Claudio, E & De, Henrique & Silva, Claudio. (2010). **Correção granulométrica de solos para aplicações em estradas florestais: estudo de caso com solos da CENIBRA.** Revista Árvore. 34. 10.1590/S0100–67622010000600014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Designation D2487: Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).** Philadelphia, 2017.
- ARAÚJO, P.S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de**

cobertura de um aterro sanitário. (2017) 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

ARAÚJO, P.S.; SILVA, D.L.M.; CARIBÉ, 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–GO. Anais... Goiânia: ABMS, 2014.

BOSCOV, M.E.G. (2008). **Geotecnia Ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos. 248p.

BROLLO, M. **Metodologia automatizada para seleção de áreas para disposição de resíduos sólidos.** Aplicação na Região Metropolitana de Campinas (SP). (2001). 10.13140/RG.2.2.18401.71527.

CATAPRETA, C.A.C. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação.** 2008. 316f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

CHIOSSI, N.J. **Geologia de engenharia.** 3. ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 2013. 424p.

COSTA, D.B. da. **Transporte de metais pesados em liner de solo compactado de aterro sanitário.** 2021. 107 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, Brasil, 2021.

COSTA, C. M. C. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos.** 2015. xviii, 163 f., il. Tese (Doutorado em Geotecnia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

COSTA, M. D. **Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos.** 144f. 2015. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)–Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos sólidos industriais.** 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233p.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS. **Orientações básicas para a operação de aterro sanitário.** Belo Horizonte: FEAM, 2006. 36p.

FERREIRA, R. P. de S.; JUCÁ, J. F. T.; MARIANO, M. O. H. .; OLIVEIRA JÚNIOR, A. I. **Solid Waste Group: Covering layers of sanitary landfills.** Research, Society and Development, [S. l.], v. 11, n. 11, p. e379111133742, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i11.33742.

HUBER–HUMER, M., RÖDER, S., & LECHNER, P. (2009). Approaches to assess biocover performance on landfills. *Waste Management*, 29(7), 2092–2104. doi:10.1016/j.wasman.2009.02.001

KABIR, M.H.; TAHA, M.R. **Assessment of physical properties of a granite residual soil as na isolation barrier**. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v.92c, 13p, 2004.

LANGER, M. Engineering geology and waste disposal. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology** 51, 5–29 (1995). <https://doi.org/10.1007/BF02594920>

Lima, D.C.; Machado, C.C.; Carvalho, C.A.B.; Silva, C.H.C.; Pereira, R.S.; Trindade, T.P.; Barbosa, P.S.A. (2003). **A experiência da UFV no emprego de estabilizantes químicos em estradas florestais**. 6º Simpósio Brasileiro sobre colheita e transporte florestal, Belo Horizonte, Minas Gerais. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais (SIF), pp. 69–117.

MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. 2008. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

MARQUES, F.A.; NASCIMENTO, A.F.; FILHO, J.C.A.; SILVA, A.B. 2014. **Solos do Nordeste**. EMBRAPA [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária], Brasília.

MENEZES, J. A. L.; SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, J. R. L. **Comportamento temporal da umidade do solo sob Caatinga e solo descoberto da Bacia Experimental do Jatobá, Pernambuco**. *Water Resources and Irrigation Management*. v.2, n.1, p.45–51, 2013.

MONTEIRO, J. H. Manual de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (IBAM). **Cadernos REDE ITEGO**, v. 1, n. 1, p. 202–496, 17 ago. 2018.

NORMA ALEMÃ – **TA Siedlungsabfall**: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz): BAnz. Nr. 99a vom 29.05.1993. 65 seiten.

PIMENTEL, F.J.G. **Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de esgoto em camada de cobertura de aterro sanitário**. Florianópolis, 2012. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental) – Programa de pós-Graduação de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SEMACE. **RIMA – Aterro consorciado de Limoeiro do Norte**. Sanebrás Projetos Construções e Consultoria LTDA. Fortaleza, Maio de 2014 156p.

Senado Notícias. **Projeto sugere a incineração do lixo como alternativa aos aterros sanitários**. Brasília, (2022). Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2022/01/18/projeto-sugere-a-incineracao-do-lixo-como-alternativa-aos-aterros-sanitarios>>. Acesso em: 06 out. 2023.

SILVA, B. A. da. Sistemas de proteção ambiental em aterros sanitários. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano. 07, Ed. 12, Vol. 08, pp. 26–43. Dezembro de 2022. ISSN: 2448–0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/aterros-sanitarios>,

DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/aterros-sanitarios

SILVA, D.P. **Estudo do comportamento reológico de solos estabilizados com cimento: processos gerais de estabilização.** Lisboa, Portugal, Relatório Final, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Processo 52/08/3048, 343 p., 1968.

SILVA, J. N. B. da. **Permeabilidade à água de solos utilizados no fundo de reservatórios na carcinicultura: um estudo de caso em Jaguaruana-CE.** 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Russas, 2022.

SILVA, R.A.F. da. **Avaliação do transporte difusivo de níquel em solos utilizados em camada de base de aterro sanitário no semiárido paraibano.** 2020. 97f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental – PPGCTA) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2021.

SOARES, A.F. **Cobertura final de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos avaliada sob o enfoque da oxidação microbiológica de metano.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

Suporte Solos. **Análise Granulométrica do Solo – Ensaios Geotécnicos – O Objetivo e as Frações de Solo.** São Pedro – SP, 2018. Disponível em: <<https://www.suportesolos.com.br/blog/analise-granulometrica-do-solo-ensaios-geotecnicos-o-objetivo-e-as-fracoes-de-solo/71/>>. Acesso em: 06 out. 2023.

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.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers. Office of solid waste and emergency response.** EPA-540-R-04-007. Washington DC.: USEPA, 2004. 421p.

WINTERKORN, H.F. **The science of soil stabilization.** Highway Research Board, no. 108, p.29-57, 1955.

ZORNBERG, J. G.; LaFOUNTAIN, L.; CALDWELL, J. A. Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.129, n.6, p.427-438, 2003.