



Estabilização granulométrica de solo com argila vermelha para camadas impermeáveis em aterros sanitários: estudo de caso

Camila Barboza de Oliveira¹

Thiago de Sá Sena²

Gilmar da Silveira Silva³

Daniela Lima Machado da Silva⁴

Resumo

Atualmente, o método mais comum de disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é o aterro sanitário, cujos elementos de projeto incluem camadas de base e cobertura, construídas frequentemente com solo argiloso. Essas camadas visam mitigar os impactos ambientais relacionados aos produtos da biodegradação dos RSU. Este estudo visa realizar ensaios geotécnicos com misturas de solos, a fim de determinar a melhor composição para a aplicação na camada de base e cobertura de um aterro sanitário. O campo experimental foi o Aterro Sanitário do Vale do Jaguaribe, em construção em Limoeiro do Norte - CE, com amostras de solo natural e solo argiloso coletadas em Russas - CE. Foram preparadas misturas contendo 40% e 50% de solo argiloso para caracterização geotécnica, determinação do coeficiente de permeabilidade saturada e análise química. Os resultados indicaram condutividades hidráulicas de $7,13 \times 10^{-7}$ m/s para o solo natural e de $1,40 \times 10^{-8}$ e $6,70 \times 10^{-9}$ m/s para as misturas com 40% e 50% de argila, respectivamente, em amostras moldadas sob energia de compactação Proctor normal, no ponto de peso específico seco máximo e umidade ótima. Conclui-se que o solo natural do local do aterro, quando misturado ao solo argiloso, pode ser aplicado tanto na camada de base quanto na camada de cobertura de aterros sanitários dependendo do tipo de RSU.

Palavras-chave: Camada de impermeabilização de base; Camada de cobertura final; Permeabilidade saturada; Recursos naturais.

¹ Graduada em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará (UFC); Brasil, Dom Engenharia LTDA, Auxiliar de engenharia; E-mail: camilabarboza.eng@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-7709-4695>; <http://lattes.cnpq.br/9249317065519522>

² Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG); Brasil, Universidade Federal do Ceará, técnico de laboratório; E-mail: thiagosena@ufc.br; <https://orcid.org/0000-0003-1593-3439>; <http://lattes.cnpq.br/7172038975336416>

³ Graduado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará (UFC); Brasil, AlimenTech Soluções, Analista de Projetos; E-mail: gilmarsilveira17@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-4608-9736>; <http://lattes.cnpq.br/8341063556939910>

⁴ Doutora em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG); Brasil, Universidade Federal do Ceará, professora; E-mail: danielalms@ufc.br; <https://orcid.org/0000-0001-8994-9631>; <http://lattes.cnpq.br/5802255460003015>

Grain size stabilization of soil with red clay for impermeable layers in sanitary landfills: a case study

Abstract

Currently, the most common method for the final disposal of Municipal Solid Waste (MSW) is sanitary landfill, which typically includes base and cover liners constructed with clayey soil. These liners aim to mitigate environmental impacts associated with the biodegradation of MSW. This study conducts geotechnical analyses using soil mixtures to determine the optimal composition for application in the base and cover liners of a sanitary landfill. The study was conducted at the Vale do Jaguaribe Sanitary Landfill under construction in Limoeiro do Norte - CE, using samples of natural soil and clayey soil collected from Russas - CE. Mixtures containing 40% and 50% clayey soil were prepared for geotechnical characterization, saturated permeability coefficient determination, and chemical and mineralogical analyses. The results indicated hydraulic conductivities of 7.13×10^{-7} m/s for the natural soil and 1.40×10^{-8} and 6.70×10^{-9} m/s for the mixtures with 40% and 50% clay, respectively, in samples compacted using Standard Proctor energy at the maximum dry density and optimum moisture content. It is concluded that the natural soil from the landfill site, when mixed with clayey soil, can be used both in the base liner system and in the cover layer of sanitary landfills, depending on the type of MSW.

Keywords: Base liner system, Final cover layer, Permeability; Natural resources.

1 Introdução

O rápido crescimento populacional e o avanço da industrialização têm contribuído para o aumento na geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Esse cenário representa um dos principais desafios enfrentados pela humanidade na atualidade. No Brasil, apenas em 2023, foram geradas aproximadamente 81 milhões de toneladas de RSU, o que equivale a mais de 221 mil toneladas de resíduos gerados diariamente (ABREMA, 2024). A destinação desses RSU exige soluções que minimizem os impactos negativos ao meio ambiente.

Nesse contexto, os aterros sanitários se destacam como a técnica de disposição final de resíduos sólidos mais utilizada, tanto em âmbito nacional quanto internacional. Isso se deve, principalmente, à conveniência operacional e ao baixo custo associado (Giusti, 2009; Hannan *et al.*, 2015; Melare *et al.*, 2016; Zuquette *et al.*, 2015).

Segundo Silva (2018), o aterro sanitário é uma obra de engenharia cujo objetivo principal é dispor os diferentes tipos de resíduos de forma controlada, prevenindo a contaminação do subsolo e dos lençóis freáticos, bem como mitigando os impactos negativos que possam afetar a qualidade do ar e o bem-estar físico e social da população.

Alcântara (2007), por sua vez, caracteriza 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 sua degradação, resultando em subprodutos em forma líquida (lixiviado) e gasosa (biogás).

O lixiviado de aterro sanitário, conhecido como percolado ou chorume, é um líquido escuro caracterizado por elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal, cloretos, matéria orgânica, compostos orgânicos recalcitrantes (como substâncias húmicas) e, ocasionalmente, metais (Kawahigashi *et al.*, 2014). O biogás de aterro sanitário é 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 (Silva; Freitas, 2019; Guerra *et al.*, 2024).

Os aterros sanitários são compostos por diversos elementos que visam minimizar os riscos de liberação de lixiviado e biogás para o meio ambiente, incluindo barreiras de impermeabilização na base e na cobertura. As barreiras de base têm a função de impedir o fluxo do líquido percolado para o meio hidrogeológico subjacente (Alonso, 2005). Já as camadas de cobertura visam isolar os resíduos do ambiente externo, limitando a entrada de água e ar, e restringindo a saída de gases gerados pela decomposição da matéria orgânica, o que evita a propagação de odores e a disseminação de doenças (Catapreta, 2008).

Camadas de argila compactada (CCLs) são amplamente utilizadas em aterros sanitários por sua baixa permeabilidade e capacidade de atenuação de contaminantes, mas seu desempenho pode ser comprometido por fatores como interação com o chorume, fissuração e variações ambientais (Norouzi *et al.*, 2022). Além disso, as CCLs são destacadas como soluções eficazes e de baixo custo, especialmente em países em desenvolvimento (Al-Soudany *et al.*, 2024).

No entanto, nem sempre há jazidas de argila em abundância nas proximidades dos aterros sanitários. Nesse contexto, a adição de frações mais finas ao solo natural se apresenta como uma estratégia eficaz para melhorar suas propriedades geotécnicas e atender aos critérios exigidos para barreiras impermeabilizantes. Estudos, como Gupt *et al.* (2021) e Nath *et al.* (2023), demonstram que a incorporação de materiais como bentonita ou solos finos aumenta a plasticidade, reduz a permeabilidade e melhora a resistência, tornando as misturas mais adequadas para sua aplicação como camadas impermeabilizantes.

Para camadas de cobertura, especialmente em sistemas de biocobertura, a combinação de solo com composto orgânico tem se destacado por favorecer a oxidação biológica do metano, como os estudos de Gomes (2020) e Sena *et al.* (2025). Além disso, o uso de biochar como aditivo tem sido investigado por sua capacidade de melhorar a estrutura do solo, a retenção hídrica e a atividade microbiológica, como visto em Sadasivam (2019).

Quando se trata de uso de solo em camadas de aterro sanitário como material impermeabilizante, a normativa brasileira vigente, como a NBR 13896 (ABNT, 1997) e NBR 15849 (ABNT, 2010), não define um tipo ou classes de solos, muito menos estabelece uma padronização para a execução da camada de base e cobertura de aterros sanitários. No entanto, a NBR 13896 (ABNT, 1997) exige que o coeficiente de permeabilidade (k) seja inferior a $10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Devido à falta de parâmetros adicionais sobre projetos e construção de aterros sanitários, utiliza-se como complemento os manuais concebidos pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e outras agências ambientais pelo mundo, como a Portaria Simplificando a Lei de Aterros Sanitários, *Deponieverordnung* – DepV (Alemanha, 2009).

A USEPA (2004) e a CETESB (1993) estabelecem valores de referência para o percentual de finos, limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) em camadas de argila compactada. Esses parâmetros estão relacionados à permeabilidade, à coesão e ao comportamento do solo em diferentes teores de umidade, influenciando diretamente sua moldabilidade e estabilidade.

O aterro sanitário do Consórcio Intermunicipal de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (CGRIS) – Vale do Jaguaribe foi implantado no município de Limoeiro do Norte. Diante disso, surgiu a necessidade de avaliar a qualidade do solo local e verificar possíveis soluções para corrigir aspectos em desacordo com as normativas, buscando identificar características químicas e geotécnicas, como a distribuição granulométrica, os limites de consistência e a permeabilidade à água.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é investigar a viabilidade do uso de misturas de solo natural e argila vermelha como material para camadas impermeabilizantes em aterros sanitários, avaliando suas proporções e propriedades geotécnicas. Além disso, verificou-se o atendimento destas características às normativas nacionais e internacionais para aplicação

destes materiais em sistemas de impermeabilização de base e de cobertura de aterros sanitários.

2 Metodologia

2.1 Área de coleta das amostras de solo

O solo utilizado neste estudo foi coletado em uma área pertencente ao aterro sanitário gerido pelo CGIRS-VJ, localizado no município de Limoeiro do Norte, a cerca de 13,5 km da zona urbana de Limoeiro do Norte. O ponto de coleta está localizado nas coordenadas UTM aproximadas (9.424.510 S; 585.615 E). O projeto do aterro prevê uma área mínima de 36,4 hectares e vida útil estimada em 30 anos.

2.2 Materiais utilizados

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 natural do aterro sanitário. Com o intuito de ter uma melhor representatividade, a amostra coletada foi retirada após a remoção de uma camada superficial de solo de aproximadamente 15 cm, a fim de evitar amostragem com o solo após carreamento de finos pelas chuvas (Santos, 2019). Essa etapa foi primordial para garantir a coerência entre o material coletado em campo e aquele posteriormente analisado em laboratório. Para fins comparativos, foram coletadas amostras de solos em dois pontos distintos dentro da área de estudo.

As amostras de argila utilizadas neste estudo são oriundas de jazidas exploradas para a produção de cerâmica vermelha, localizadas a 4,5 km dentro da propriedade da empresa Cerâmica Liro, situada na comunidade Ingá, no município de Russas – CE. As amostras foram divididas em dois sacos que posteriormente tiveram seus conteúdos misturados para utilização nos ensaios. A Figura 1 apresenta as amostras do solo natural do aterro sanitário e da argila vermelha.

Figura 1: Amostras do solo e da argila vermelha, respectivamente

Fonte: Os autores.

Após a etapa de coleta dos solos, os materiais foram submetidos a secagem ao ar livre por um período de 24 horas. Após isso, o material foi destorrado manualmente, em seguida quarteado e retiradas as quantidades necessárias para a realização das misturas e execução de cada ensaio de caracterização geotécnica, conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 6457 (ABNT, 2024), que trata da preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade.

2.2.1 Preparação das misturas de solo e argila

A partir das amostras de solo e argila, foram preparadas duas misturas nas proporções gravimétricas de 6:4 e 5:5 (solo:argila), correspondendo a 40% e 50% de argila, respectivamente. As proporções foram definidas com base nos critérios estabelecidos por órgãos ambientais, de modo a atender à recomendação da CETESB (1993), que exige um teor de finos igual ou superior a 30%, e da USEPA (2004), que indica valores entre 30% e 50% para aplicação em camadas impermeabilizantes em aterros sanitários.

Os solos e as misturas utilizados, assim como suas proporções estão apresentados no Quadro 1, bem como as respectivas siglas adotadas para este estudo.

Quadro 1: Composição das misturas estudadas e suas respectivas siglas

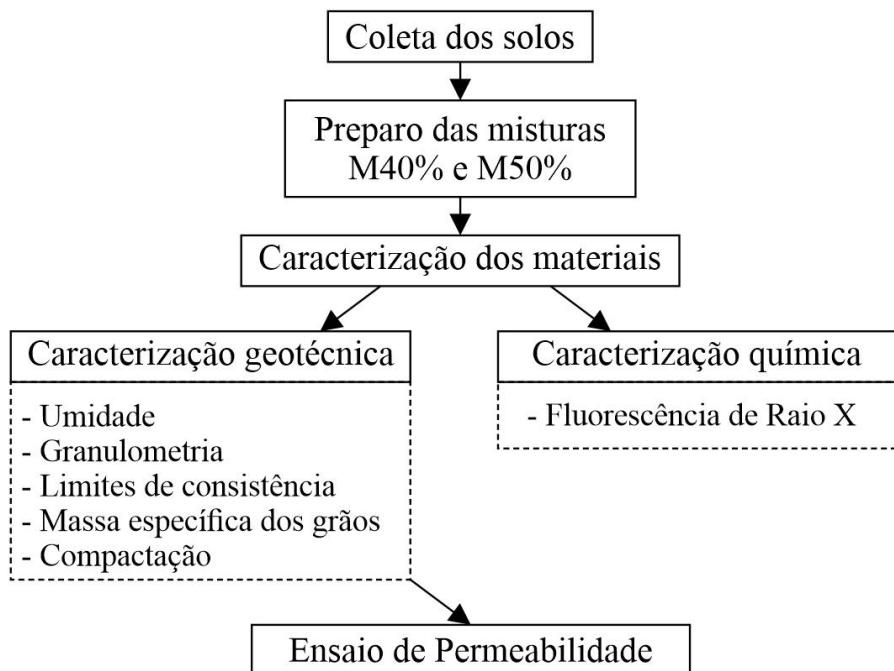
Composição do material (dado em massa seca)	Dados
Solo natural da localidade do aterro	SN
Argila vermelha	AV
40% de AV e 60% de SN	M40%
50% de AV e 50% de SN	M50%

Fonte: Os autores.

2.3 Procedimentos Experimentais

Os ensaios para determinar o desempenho dos solos como material impermeabilizante em aterros sanitários consistiram na caracterização química, geotécnica e determinação da condutividade hidráulica do solo. Na Figura 2 estão sintetizados os procedimentos experimentais realizados nesta pesquisa.

Figura 2: Fluxograma das etapas do estudo



Fonte: Os autores.

2.3.1 Ensaios de caracterização geotécnica

Para a obtenção dos dados iniciais requeridos, a caracterização química e geotécnica dos solos coletados foi, segundo as normas da Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT), conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Composição das misturas estudadas e suas respectivas siglas

Ensaio	Método
Umidade	NBR 6457 (ABNT, 2016a)
Limite de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016b)
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016c)
Massa específica dos grãos	NBR 6508 (ABNT, 2016d)
Compactação (energia Proctor normal)	NBR 7182 (ABNT, 2016e)
Granulometria	NBR 7181 (ABNT, 2016f)
Permeabilidade	NBR 13292 (ABNT, 2021a) e NBR 14545 (ABNT, 2021b)
Principais Óxidos	Fluorescência de Raios-X

Fonte: Os autores.

2.3.2 Ensaios de caracterização química do solo

Para determinação da composição química dos materiais analisados, utilizou-se a técnica da Fluorescência de Raios-X (FRX). Na preparação da amostra, utilizou-se, aproximadamente, 10 gramas de material passante na peneira nº 200 (0,074 mm).

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 SX mini II, marca Rigaku. Este ensaio foi conduzido para fornecer subsídios à interpretação do comportamento geotécnico dos materiais, especialmente quanto a possíveis interações químicas que possam influenciar o comportamento geotécnico dos materiais como limites de consistência e permeabilidade à água.

2.4 Permeabilidade à água

Os ensaios de permeabilidade foram conduzidos conforme a NBR 13292 (ABNT, 2021a), utilizando o método de carga constante para o SN, em razão de sua maior condutividade hidráulica. Para as misturas M40% e M50%, foi adotado o método de carga variável, conforme a NBR 14545 (ABNT, 2021b), por ser mais adequado a materiais com menor permeabilidade, como os que apresentam maior teor de argila. De acordo com essas normas, a repetição dos ensaios não é necessária quando há estabilização do regime de fluxo e boa linearidade nos dados (coeficiente de determinação, $R^2 \geq 0,99$).

As amostras foram moldadas em sua umidade ótima obtida no ensaio de compactação, sob energia Proctor Normal. Essa energia foi utilizada por ser a mais comumente adotada em

aterros sanitários e em estudos sobre suas camadas de impermeabilização (USEPA, 2004), permitindo comparações com pesquisas nacionais e internacionais e contribuindo para a padronização dos resultados. Para moldagem dos corpos-de-prova, utilizou-se o cilindro grande, método de compactação estática e camadas de material permeável, com a finalidade de que o fluxo de água ocorresse em regime laminar, conforme estabelecido pela Lei de Darcy.

Dessa forma, uma vez que o permeâmetro foi vedado, cada corpo-de-prova foi submetido 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 permeâmetro.

Para as misturas de solo, utilizou-se o método de carga variável, no qual o solo é completamente saturado, e inicia-se as leituras, por meio das medidas de variações do nível da água na bureta graduada em um dado intervalo de tempo. A saturação das amostras foi avaliada pela constância do fluxo ao longo das leituras, indicando que o regime permanente foi atingido. Com isso, foram realizadas diversas leituras, até observar-se constância nos últimos 3 resultados para cada amostra.

Com os dados obtidos, calculou-se o coeficiente de permeabilidade (k), conforme a NBR 14545 (ABNT, 2021), por meio da Equação 1, para as misturas M40% e M50%.

$$k_{20} = \frac{aL}{At} \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right) F_c \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

k_{20} = Coeficiente de Permeabilidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

a – Área da seção transversal da bureta (cm^2);

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);

F_c – Fator de correção.

Na determinação do coeficiente de permeabilidade do SN, realizou-se o experimento pelo método 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 permeâmetro em um

determinado intervalo de tempo. Por fim, foram realizadas leituras, até observar constância nas últimas três leituras para cada amostra.

2.5 Requisitos mínimos normativos

O Quadro 3 resume os valores permissíveis para cada parâmetro de um material para ser utilizado em camada de impermeabilização de base e de cobertura em aterros sanitários conforme a literatura e normas nacionais e internacionais.

Quadro 3: Parâmetros e seus valores permissíveis para camada de base e cobertura

Parâmetro	Aplicação na camada de base	Aplicação na camada de cobertura
Teor de finos (Passa na peneira Nº 200)	>30% (CETESB, 1993); ≥20-30% (Daniel, 1993)	>30% (CETESB, 1993); ≥20-30% (Daniel, 1993); ≥ 30-50% (USEPA, 2004)
Limite de Liquidez (LL)	≥ 30% (CETESB, 1993)	≥ 30% (CETESB, 1993)
Limite de Plasticidade (IP)	≥15% (CETESB, 1993); ≥ 7-10% (Daniel, 1993)	≥15% (CETESB, 1993); ≥ 7-15% (USEPA, 2004); ≥ 7-10% (Daniel, 1993)
Classificação	CL, CH, SC ou OH (CETESB, 1993)	CL, CH, SC ou OH (CETESB, 1993)
Coeficiente de permeabilidade à água (k)	$\leq 1 \times 10^{-9}$ m/s (Daniel, 1993); $< 10^{-9}$ m/s (CETESB, 1993); $< 5 \times 10^{-7}$ m/s (ABNT, 1997); $\leq 1 \times 10^{-7}$ m/s (Aterro Sanitário Classe 0) e $\leq 5 \times 10^{-10}$ m/s (Aterros Sanitários Classe I a III) (Alemanha, 2009)	$\leq 1 \times 10^{-9}$ m/s (Daniel, 1993); $< 10^{-9}$ m/s (USEPA, 2004); $< 10^{-9}$ m/s (CETESB, 1993); $< 5 \times 10^{-7}$ m/s (ABNT, 1997); sem especificação (Aterro Sanitário Classe 0), $\leq 5 \times 10^{-9}$ m/s (Aterros Sanitários Classe I e II) e $\leq 5 \times 10^{-10}$ m/s (Aterros Sanitários Classe III) (Alemanha, 2009)

Fonte: Os autores.

Vale salientar que algumas das literaturas ou normas não fazem distinção para uso em base e em cobertura, a exemplos de CETESB (1993), Daniel (1993) e ABNT (1997), mas as tratam como barreira selante e dita os valores permissíveis dos parâmetros, seja para base ou para cobertura. Já outras literaturas, como a norma alemã, DepV (2009), além de separar os parâmetros por base e cobertura, ainda estabelece valores diferentes (mais ou menos restritivos) de acordo com a finalidade e o tipo de classe do aterro sanitário.

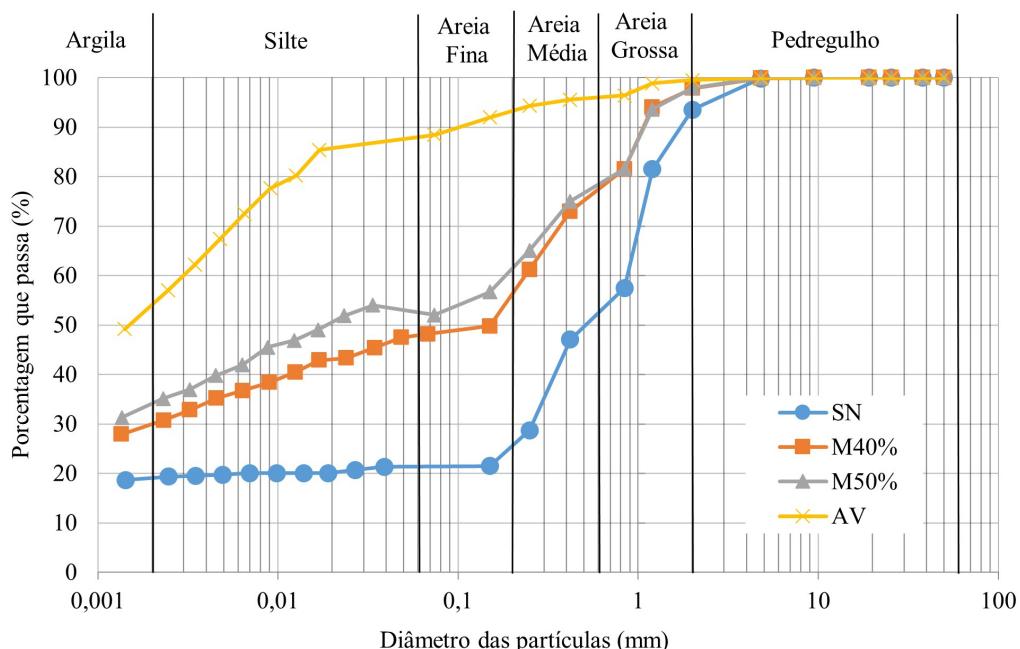
3 Resultados e discussão

3.1 Ensaios Geotécnicos

3.1.1 Caracterização geotécnica

A Figura 3 mostra as curvas granulométricas dos solos (SN e AV) e das misturas M40% e M50%.

Figura 3: Curvas granulométricas dos solos (SN e AV) e misturas M40% e M50%



Fonte: Os autores.

A Tabela 1 apresenta, para todos os materiais estudados, as frações granulométricas, massa específica dos grãos, os dados do ensaio de compactação, junto com o índice de vazios e a porosidade total para condições de moldagem na energia de compactação Proctor normal, de máxima densidade seca e umidade ótima.

Tabela 1: Resumo da caracterização geotécnica dos solos SN e argila e misturas

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	3,5	21	20
Pedregulho (%)	5	0,5	2	2
Umidade higroscópica (%)	0,39	4,52	1,90	2,39
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,40	2,33	2,45	2,41
Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	2,01	1,70	1,91	1,90
Umidade ótima (%)	9,36	17,85	11,70	13,24
Índice de vazios, <i>e</i> (v/v)	0,19	0,37	0,28	0,27
Porosidade total, <i>n</i> (%)	16,30	26,99	21,90	21,35

Fonte: Os autores.

É possível perceber que 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.

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%.

Embora o SN atenda aos valores recomendados quanto ao percentual de finos (argila + silte), Frempong e Yanful (2004) indicam a necessidade de, no mínimo, 20% de argila. Assim, considerando esse critério, o SN isoladamente não é adequado para uso em aterros sanitários. Essa observação evidencia que o percentual de finos, por si só, não é um parâmetro confiável, sendo necessário considerar, em conjunto, os limites de consistência e a permeabilidade do material.

Já para aplicação em camadas de cobertura, a USEPA (2004) define que o solo aplicado deve possuir uma porcentagem de finos entre 30 e 50%, confirmando o valor mínimo de 30% imposto pela CETESB (1993). De acordo com este critério, é possível afirmar que tanto a mistura M40% quanto a M50% estão aptas para aplicação em sistemas de impermeabilização e cobertura de aterros sanitários, algo que não é constatado para o solo natural da região do aterro sanitário.

Nas condições de máxima densidade e moldagem na umidade ótima sob energia de compactação Proctor normal, o índice de vazios e a porosidade total aumentam progressivamente do SN para as misturas (M40% e M50%) até a AV (Tabela 1). Observa-se que o SN apresenta o menor índice de vazios (0,19) e porosidade (16,30%), enquanto a argila vermelha alcança os maiores valores, com e igual a 0,37 e porosidade de 26,99%.

Esse comportamento é coerente com a natureza textural dos materiais, visto que solos granulares, como a areia, tendem a apresentar um arranjo mais denso, com partículas maiores e esféricas, resultando em menor volume de vazios. Já solos finos, como a argila, apresentam partículas de formato lamelar e maior área superficial, o que dificulta o empacotamento eficiente e favorece a formação de microporos, elevando os índices de vazios e a porosidade total (Das, 2013; Chrusciak *et al.*, 2023).

3.1.2 Limites de consistência e classificação dos solos

Os limites de consistência de Atterberg, o índice de plasticidade (IP), o índice de atividade e a classificação de acordo com a norma D2487 (ASTM, 2017) pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) dos materiais analisados encontram-se descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Limites de consistência, índice de atividade e classificação dos materiais

Limites de consistência	SN	AV	M40%	M50%
Limite de Plasticidade - LP (%)	NP	24,35	15,24	16,58
Limite de Liquidez - LL (%)	NL	45,00	24,90	33,00
IP (%)	-	20,65	9,66	16,42
Índice de atividade	-	0,23	0,22	0,32
Classificação SUCS	SM	CL	CL	CL

Nota: NP = Não plástico; NL = Não líquido; SM = Areia-siltosa; e CL = Argila de Baixa Compressibilidade.

Fonte: Os autores.

Analizando os valores pertinentes a SUCS da Tabela 1 e 2, o 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%.

É possível apontar o SN como um solo Não-Plástico (NP). 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.

Nota-se um aumento proporcional e progressivo dos limites de consistências a partir da adição de argila nas misturas, isso ocorre, pois, a argila tende aumentar a plasticidade do solo de acordo com sua concentração. O mesmo fenômeno foi observado por Silva (2023) e por Nath *et al.* (2023), que constataram um aumento de 5,17% no IP com a elevação do teor de bentonita de 5% para 20%.

Daniel (1993) diz que materiais utilizados em aterros sanitários devem ter baixa reatividade, com índice de atividade inferior a 0,75, a fim de garantir estabilidade volumétrica e minimizar a ocorrência de trincas por variação de umidade. Observa-se que a AV, M40% e M50% apresentam índices de atividade classificados como argilas inativas, variando entre 0,22 e 0,32. De acordo com este parâmetro, os materiais possuem baixa tendência à expansão e retração, sendo adequados para uso em aterros sanitários.

Como a legislação não apresenta requisitos para o índice de atividade, a literatura apresenta valores recomendados para o IP de solos que serão utilizados como camadas de impermeabilização de base em aterros sanitários, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Valores limites para solos utilizados como camada de base

Referência	Especificação	SN	M40%	M50%
CETESB. (1993)	IP > 15%	N.A.	N.A.	Atende
Daniel (1993)	IP \geq 7-10%	N.A.	Atende	Atende

Nota: N.A.: Não atende à referência.

Fonte: Os autores.

CETESB (1993) recomendam $IP > 15\%$, priorizando materiais mais argilosos e plasticamente ativos, com maior retenção de água e menor permeabilidade, características desejáveis em sistemas de vedação mais exigentes. Por outro lado, Daniel (1993) preconiza uma faixa mais abrangente, com $IP \geq 7\%$, reconhecendo que solos com plasticidade moderada também podem ser utilizados em camada de impermeabilização de base.

A mistura M40% demonstra um desempenho satisfatório segundo alguns critérios geotécnicos, atendendo, por exemplo, aos valores recomendados por Daniel (1993), embora não atenda ao limite de plasticidade mínimo estabelecido por CETESB (1993) e pela USEPA (1991), que exigem $IP > 15\%$. Essa divergência reforça a importância de considerar o contexto de aplicação e múltiplas referências técnicas na avaliação de materiais.

Já para aplicação em camada de cobertura final, a Tabela 4 mostra as especificações da USEPA (2004), CETESB (1993) e Daniel (1993), comparando se o solo e as misturas de solos estudados atendem a estas recomendações.

Tabela 4: Valores limites para solos utilizados como camada de cobertura

Referência	Especificação	SN	M40%	M50%
USEPA (2004)	IP \geq 7-15%	N.A.	Atende	Atende
CETESB (1993)	LL $>$ 30% e IP \geq 15%	N.A.	N.A.	Atende
Daniel (1993)	IP \geq 7-10%	N.A.	Atende	Atende

Nota: N.A.: Não atende à referência.

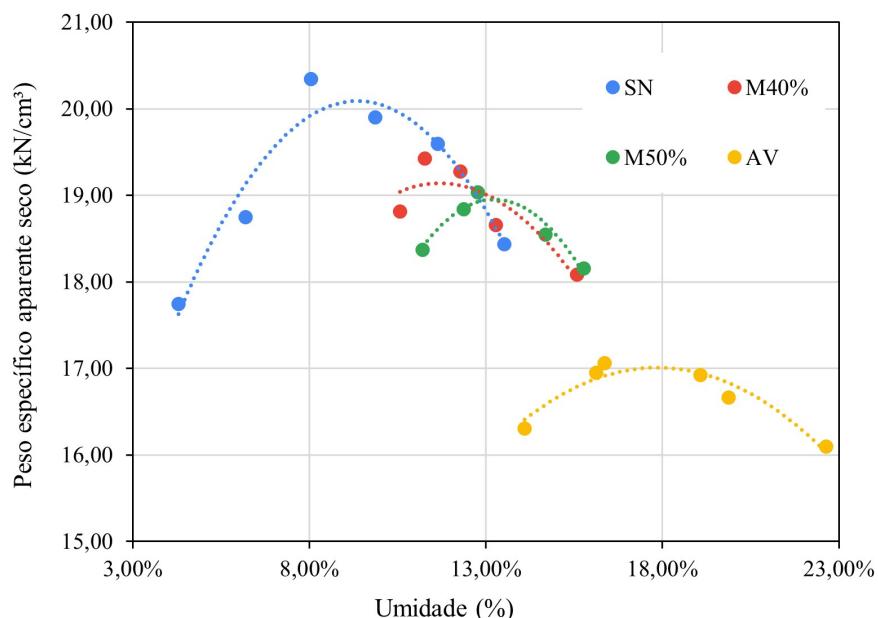
Fonte: Os autores.

Para a aplicação na camada de cobertura, a Mistura M50% mostrou-se mais viável, atendendo aos requisitos estabelecidos por Daniel (1993), pela USEPA (2004) e CETESB (1993), que determina um LL maior ou igual a 30% e IP maior ou igual a 15%.

3.1.3 Curvas de compactação

As curvas de compactação sob energia Proctor normal dos materiais estudadas são mostradas na Figura 4.

Figura 4: Curvas de compactação dos solos (SN e AV) e misturas M40% e M50%



Fonte: Os autores.

Os valores de peso específico aparente seco máximo encontrados foram de 20,1, 17,0, 19,1 e 19,0 $\text{kN}\cdot\text{cm}^{-3}$ para o SN, M40%, M50% e AV, respectivamente. As umidades ótimas correspondentes foram de 9,36%, 11,70%, 13,24% e 17,85%. Observa-se que tanto o peso específico aparente seco máximo quanto a umidade ótima tendem a aumentar com o acréscimo da AV, o que já é esperado. No entanto, o peso específico aparente seco máximo se manteve quase o mesmo para as M40% e M50%, embora a umidade ótima tenha se elevado em 4,61% com o acréscimo de 10% de AV entre essas duas misturas.

Embora não existam normativas nacionais ou internacionais que estabeleçam parâmetros de compactação para a aplicação de solos em camada de cobertura de aterros sanitários, é possível fazer uma comparação com os valores apresentados por Kabir e Taha (2004). Segundo esses autores, amostras com peso específico superior a 14,50 $\text{kN}\cdot\text{cm}^{-3}$ são indicadas para esta aplicação. Com base nesse critério, todos os materiais aqui estudados são elegíveis para uso em camadas de cobertura de aterros sanitários.

3.1.4 Composição química dos materiais

A Tabela 5 mostra os resultados da composição química do solo natural e da argila quantitativamente em forma de óxidos.

Tabela 5: Composição química dos solos

Elemento	SN	AV
SiO ₂ (%)	58,87	54,34
Al ₂ O ₃ (%)	28,41	23,34
K ₂ O (%)	6,17	5,88
Fe ₂ O ₃ (%)	3,89	9,76
Na ₂ O (%)	1,38	0,00
TiO ₂ (%)	0,70	1,57
CaO (%)	0,56	1,76
ZrO ₂ (%)	0,02	0,03
MgO (%)	-	3,05
MnO (%)	-	0,16

Fonte: Os autores.

O solo natural encontrado no aterro sanitário contém altas concentrações de óxidos, com destaque para o óxido de silício (SiO_2) (típico de solos, o que indica a grande presença de quartzo e argilominerais), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de potássio (K_2O). Em menor escala, há presença de óxidos de ferro (3,89%), sódio (1,38%), titânio (0,70%), cálcio (0,56%) e zircônio (0,02%).

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

A AV apresenta menor teor de SiO_2 (54,34%) e Al_2O_3 (23,34%) em relação ao SN, mas é substancialmente mais rica em Fe_2O_3 (9,76%), MgO (3,05%), TiO (1,57%) e CaO (1,76%). Esse enriquecimento da argila em óxidos metálicos está associado à presença de minerais do tipo esmectita, ilita e/ou clorita, que contribuem para maior capacidade de retenção de água, aumento do índice de plasticidade e redução da permeabilidade.

O Fe_2O_3 tem influência na coloração do material. As percentagens de K_2O estão maiores que Na_2O , associadas aos feldspatos (Crozetta *et al.*, 2016). Em menores proporções, encontram-se óxidos de magnésio (3,05%), cálcio (1,76%), titânio (1,57%), manganês (0,16%) e zircônio (0,03%). 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, o que complementa a falta de fertilidade do SN, ao ser misturado.

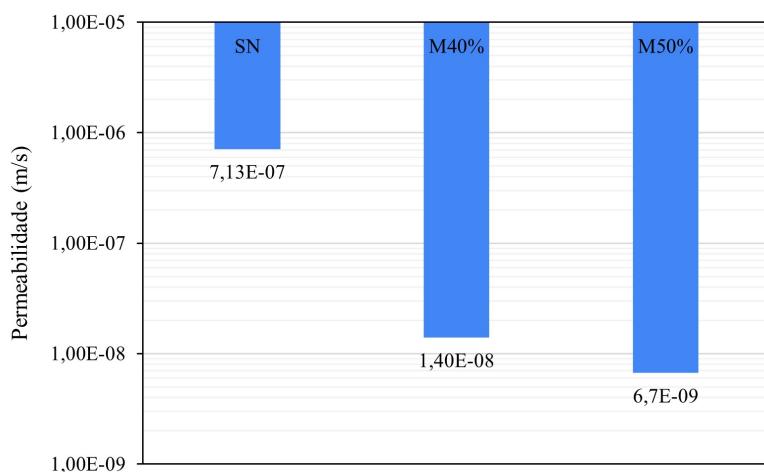
Concordando com Santos (1975), essa variação na composição química influencia o comportamento do SN ao ser misturado com a argila, nas M40% e M50%, melhorando propriedades geotécnicas para aplicação em camadas de aterro sanitário, como plasticidade e permeabilidade.

Magalhães e Borghetti Soares (2021) estudaram o uso de argilas expansivas como camadas de impermeabilização em coberturas de aterros sanitários e, mesmo com o surgimento de trincas superficiais, concluíram que o desempenho foi satisfatório. Os autores ressaltam, no entanto, que o uso de argilas deve ser avaliado com cautela, uma vez que seu desempenho em campo, ao longo das diferentes fases de construção e operação do aterro, está sujeito às variações climáticas, em que as trincas formadas durante os ciclos de umedecimento e secagem podem comprometer sua função de vedação.

3.2 Coeficientes de permeabilidade à água

Os resultados dos ensaios de permeabilidade do SN e das misturas M40% e M50% estão apresentados na Figura 5, ou seja, os valores dos coeficientes de permeabilidade à água (k).

Figura 5: Coeficiente de permeabilidade do SN e das misturas M40% e M50%



Fonte: Os autores

Verifica-se que a permeabilidade do SN foi de $7,13 \times 10^{-7}$ m/s e, com adição da argila, houve uma redução, chegando a $6,70 \times 10^{-9}$ m/s para a mistura M50%. De acordo com Miguel, Benetti e Heineck (2020), a permeabilidade está relacionada com a expansão da argila e quando submetidas a tensões mais elevadas durante sua hidratação, apresentam uma menor permeabilidade.

A Tabela 6 apresenta os valores de coeficiente de permeabilidade especificado em normas nacionais e internacionais bem como na literatura para sistema de impermeabilização de base em aterro sanitário, e compara com os valores de k obtidos para cada material, em condições de máxima densidade seca e umidade ótima, obtidas sob energia de compactação Proctor normal.

Tabela 6: Limites de permeabilidade à água para solos de camadas de base

Referência	Especificação (m/s)	SN	M40%	M50%
CETESB (1993)	$k < 1 \times 10^{-9}$	N.A.	N.A.	N.A.
Daniel (1993)	$k \leq 1 \times 10^{-9}$	N.A.	N.A.	N.A.
NBR 13896 (ABNT, 1997)	$k < 1 \times 10^{-8}$	N.A.	Atende	Atende
DepV (Alemanha, 2009)				
Aterro Sanitário Classe 0	$k \leq 1 \times 10^{-7}$	N.A.	Atende	Atende
Aterro Sanitário Classe I	$k \leq 5 \times 10^{-10}$	N.A.	N.A.	N.A.
Aterro Sanitário Classe II	$k \leq 5 \times 10^{-10}$	N.A.	N.A.	N.A.
Aterro Sanitário Classe III	$k \leq 5 \times 10^{-10}$	N.A.	N.A.	N.A.

Nota: N.A. = Não atende.

Fonte: Os autores.

Baseado na Tabela 6, nota-se que o solo natural é ineficaz para a aplicação na camada de base de aterros sanitários, pois não atende os valores estabelecidos por nenhuma das referências. As misturas M40% e M50% atendem o valor de referência da NBR 13896 (ABNT, 1997), mas não são suficientes para as demais normativas, sendo acima do estabelecido pela CETESB (1993) e USEPA (1991). Desse modo, a utilização das misturas para camadas impermeabilizantes em aterro sanitário demanda mais cautela, visto que elas não atendem às demais referências.

A adição de argila ao SN resultou em uma redução da permeabilidade, mesmo com o aumento do índice de vazios (de 0,195 para 0,280 em M40%) e da porosidade total (de 0,163 para 0,219), indicando que a natureza e a conectividade dos poros são mais determinantes para o fluxo de líquidos através dos solos. A permeabilidade diminuiu de $7,13 \times 10^{-7}$ m/s (SN) para $1,40 \times 10^{-8}$ m/s (M40%) e $6,7 \times 10^{-9}$ m/s (M50%), revelando que a incorporação de frações finas leva à formação de microestruturas com poros menores e menos conectados, típicos de solos argilosos (Jiao; Zhou; Wang, 2021).

A Tabela 7 mostra os valores de coeficiente de permeabilidade especificado na literatura e em normas nacionais e internacionais sistema de impermeabilização de cobertura de aterro sanitário, e compara com os valores de k de cada material, em condições de máxima densidade seca e umidade ótima, obtidas sob energia de compactação Proctor normal.

Tabela 7: Limites de permeabilidade à água para solos de camadas de cobertura

Referência	Especificação (m/s)	SN	M40%	M50%
CETESB (1993)	$k < 1 \times 10^{-9}$	N.A.	N.A.	N.A.
Daniel (1993)	$k \leq 1 \times 10^{-9}$			
NBR 13896 (ABNT, 1997)	$k < 1 \times 10^{-8}$	N.A.	Atende	Atende
USEPA (2004)	$k < 1 \times 10^{-9}$	N.A.	N.A.	N.A.
DepV (Alemanha, 2009)				
Aterro Sanitário Classe 0	— ¹	Atende	Atende	Atende
Aterro Sanitário Classe I	$k \leq 5 \times 10^{-9}$	N.A.	N.A.	N.A.
Aterro Sanitário Classe II	$k \leq 5 \times 10^{-9}$	N.A.	N.A.	N.A.
Aterro Sanitário Classe III	$k \leq 5 \times 10^{-10}$	N.A.	N.A.	N.A.

Nota: N.A. = Não atende; 1. Camada de recultivo/camada funcional técnica (sem k definido).

Fonte: Os autores.

Para sistemas de cobertura de aterros sanitários, os valores de permeabilidade são menos rígidos que para impermeabilização de base. Se for um aterro sanitário de resíduos inertes, Classe 0 pela norma DepV (Alemanha 2009), nem há especificação quanto a valores de coeficientes de permeabilidade para a camada de cobertura, orienta-se apenas para execução de uma camada funcional de recultivo. Neste caso até mesmo o SN serviria, sendo a única aplicação que este material se enquadraria quanto ao parâmetro de permeabilidade.

As misturas M40% e M50% atendem o requisito da NBR 13896 (ABNT, 1997), além de já servirem para cobertura de aterros sanitários de Classe 0 de acordo com a DepV (Alemanha, 2009). Além disso, a M50% apresentou valores de permeabilidade ($6,7 \times 10^{-9}$ m/s) bem próximos dos exigidos para Aterros Sanitários Classe I e II ($k \leq 5 \times 10^{-9}$ m/s) de acordo com a mesma norma.

3.3 Comparativo entre as misturas

Com foco nas duas misturas estudadas (M40% e M50%), em condições de máxima densidade seca e umidade ótima, obtidas sob energia de compactação Proctor normal, o Quadro 4 resume e compara os valores permissíveis para cada parâmetro geotécnico conforme a literatura e normas nacionais e internacionais. A análise dos parâmetros foi dividida com foco na sua aplicação, seja no sistema de impermeabilização de base ou cobertura em aterros sanitários.

Quadro 4: Comparativo entre M40% e M50% quanto aos valores permissíveis para sistema de impermeabilização de base e cobertura

Parâmetro	Valor permissível para camada de base	Valor permissível para camada de cobertura	M40 %	M50%	Comparação
Teor de finos (Passa na peneira Nº 200)	>30% (CETESB, 1993); ≥20-30% (Daniel, 1993)	>30% (CETESB, 1993); ≥20-30% (Daniel, 1993); ≥ 30-50% (USEPA, 2004)	48	55	Ambas as misturas atendem todas as referências.
Limite de Liquidez (LL)	≥30% (CETESB, 1993)	≥30% (CETESB, 1993)	24,9	33	Apenas a M50% atende.
Limite de Plasticidade (IP)	≥15% (CETESB, 1993); ≥ 7-10% (Daniel, 1993)	≥15% (CETESB, 1993); ≥ 7-15% (USEPA, 2004); ≥ 7-10% (Daniel, 1993)	9,66	16,42	M50% atende todas as referências para base e cobertura. M40% só não atende a CETESB (1993) tanto para base como para cobertura.
Classificação	CL, CH, SC ou OH (CETESB, 1993)	CL, CH, SC ou OH (CETESB, 1993)	CL	CL	Ambas as misturas atendem a referência.
Coeficiente de permeabilidade à água, k_w (m/s)	$\leq 1 \times 10^{-9}$ m/s (Daniel, 1993); $< 10^{-9}$ m/s (CETESB, 1993); $< 5 \times 10^{-7}$ m/s (ABNT, 1997); $\leq 1 \times 10^{-7}$ m/s (Aterro Sanitário Classe 0) e $\leq 5 \times 10^{-10}$ m/s (Aterros Sanitários Classe I a III) (Alemanha, 2009)	$\leq 1 \times 10^{-9}$ m/s (Daniel, 1993); $< 10^{-9}$ m/s (USEPA, 2004); $< 10^{-9}$ m/s (CETESB, 1993); $< 5 \times 10^{-7}$ m/s (ABNT, 1997); S.E. (Aterro Sanitário Classe 0), $\leq 5 \times 10^{-9}$ m/s (Aterros Sanitários Classe I e II) e $\leq 5 \times 10^{-10}$ m/s (Aterros Sanitários Classe III) (Alemanha, 2009)	1,40	$6,70 \times 10^{-8}$	Ambas as misturas para aplicação na camada de base e cobertura, só atende a ABNT (1997) e a DepV (2009) para aterros Classe 0. A M50% ficou próximo dos valores para Aterros Sanitários Classe I e II.

Fonte: Os autores.

4 Considerações finais

Este estudo teve como objetivo principal investigar o uso de misturas de solo natural e argila vermelha como alternativa para materiais em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários. Os resultados demonstraram que ambas as misturas avaliadas se mostraram viáveis para aplicação em sistemas de base e cobertura, com suas devidas ressalvas, atendendo a parâmetros técnicos essenciais para essa finalidade. Quanto às proporções, observou-se que a M50% apresentou desempenho geotécnico superior em relação à M40%, destacando-se como a mais promissora para uso prático. No entanto, a análise de conformidade com normativas nacionais e internacionais evidenciou que nenhuma das misturas atendeu de forma integral a todos os critérios exigidos. Assim, recomenda-se que o uso dessas misturas seja precedido de avaliações específicas, considerando o tipo de sistema a ser implantado, os requisitos de desempenho esperados e as características dos materiais disponíveis. Ressalta-se a importância de ponderações técnicas quanto à adequação ao contexto local, de modo a garantir a eficiência e a segurança das camadas de impermeabilização em projetos de aterros sanitários.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Ceará (UFC) pelo apoio institucional concedido para a realização desta pesquisa.

Referências bibliográficas

- 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.
- ALEMANHA. **Deponieverordnung – DepV:** Ordinance on Landfills and Long-Term Storage. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2009.
- AL-SOUDANY, K. Y.; FATTAH, M. Y.; RAHIL, F. H. Clay barriers performance in landfills: A review. **Engineering and Technology Journal**, v. 42, n. 11, p. 1327–1342, 2024.
- ALONSO, T. P. **Condutividade Hidráulica de Solos Compactados em Ensaios com Permeâmetro de Parede Flexível.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, dissertação de mestrado. 113p. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- ARAUJO, P. S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário.** Dissertação (Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2017.

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 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13.896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14.545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15.849**: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6.457**: Solos — Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2024.

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 6.502**: Representação de área de trabalho para desenhos técnicos. Rio de Janeiro, 1995.

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 7185**: Determinação da massa específica aparente, in situ, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE - ABREMA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: <https://abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 14 jun. 2025.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2487**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017.

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

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.

- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos Sólidos Industriais**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233p.
- CHRUSCIAK, M. R.; RAMBO, L. R.; ORNELAS, F. S.; CORRÊA, A. C. S.; BANHA, G. L. S.; ARAÚJO, G. R. M. B. **Geotecnia na Região Norte: práticas e atuação de engenheiros geotécnicos no norte do Brasil**. v. 1. Palmas-TO: Instituto Federal do Tocantins; ABMS Núcleo Norte, 2023.
- CROZETTA, J. R.; NANDI, V. S.; ROSSO, F.; ZACCARON, A.; NIERO, D. F. Influência da granulometria na plasticidade e retração de secagem das argilas. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 12–18, 2016.
- DANIEL, D. E. **Geotechnical practice for waste disposal**. Ed. Chapman & Hall. London, 1993.
- DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.
- FREMPONG, E. M.; 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.
- GIUSTI, L. A review of waste management practices and their impact on human health. **Waste Management**, v29, p.2227-2239, 2009.
- GOMES, G. J. C. **Análise da adição de composto orgânico para dimensionamento de biocoberturas em aterro sanitário**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.
- GUERRA, T. F. M. F.; SENA, T. S.; MARQUES JUNIOR, F. A. F.; MELO, M. C.; PAIVA, W. Methane generation potential for waste with different landfill ages, **International Journal of Environment and Waste Management**, Vol. 35, No. 2, 2024.
- GUPT, R. K.; BORDOLOI, S.; SAHOO, R. K.; SEKHARAN, S. Mechanical performance and micro-structure of bentonite-fly ash and bentonite-sand mixes for landfill liner application. **Journal of Cleaner Production**, v. 292, p. 126033, 2021.
- HANNAN, M. A.; MAMUN, M. A. A.; HUSSAIN, A.; BASRI, H.; BEGUM, R. A. A review on technologies and their usage in solid waste monitoring and management systems: Issues and challenges. **Waste Management**, v43, p.509-523, 2015.
- JIAO, W.; ZHOU, D.; WANG, Y. Effects of Clay Content on Pore Structure Characteristics of Marine Soft Soil. **Water**, 13, 1160, 2021.
- KAWAHIGASHI, F.; MENDES, M. B.; GOMES DA ASSUNÇÃO JÚNIOR, V.; GOMES, V. H.; FERNANDES, F.; HIROOKA, E. Y.; KURODA, E. K. Pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário com carvão ativado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 235–244, 2014.
- NATH, A.; KABIR, M. H.; AL KAFY, A.; RAHAMAN, Z. A.; RAHMAN, M. T. Geotechnical properties and applicability of bentonite-modified local soil as landfill and environmental sustainability liners. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 18, p. 100241, 2023.

NOROUZI, H.; UYGAR, H.; NALBANTOGLU, Z. A review on the effects of landfill leachate on the physical and mechanical properties of compacted clay liners for municipality landfills. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 15, p. 1174, 2022.

SANTOS, Jeovana Jisla das Neves. **Avaliação geotécnica de misturas de solo e composto orgânico para uso como biocoberturas em aterros sanitários**. 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, 2019.

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, 13pp, 2004.

MAGALHÃES, A. G.; BORGHETTI SOARES, M. M. Desempenho de cobertura de aterro sanitário com uso de solo expansivo. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 263–270, 2021.

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**, v20, p. 251-271, 2020.

SADASIVAM, B. Y. **Biochar-based biocovers for landfill methane mitigation: quantifying adsorption, transport and oxidation**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – University of Illinois at Chicago, Chicago, 2019.

SENA, T. S.; SANTOS, J. J. N.; SOUZA, J. C. M.; BORGHETTI SOARES, A.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D. Effects of organic compost, saturation, and compaction on air permeability in compost-modified soil for landfill biocover systems. **Journal of Environmental Engineering**, no prelo, 2025.

SILVA, Daniela L. Machado da. **Adsorção de Metais Tóxicos em Liners de Solo Compactado em Aterros Sanitários**. 2018. 85 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, 2018.

SILVA, Daniela L. Machado da. **Mecanismos de Transporte de Metais Pesados em Misturas de Solos Utilizados como Camada de Base em Aterro Sanitário**. 2023. Tese (Doutorado 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, 2023.

SILVA, T. F.; FREITAS, I. R. Potential of biogas generation from solid urban waste from the northwest region of São Paulo using different technical forecast models, **Bioenergy in Review: Dialogues** Vol. 9, No. 1, pp.87–100, 2019.

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

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