

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

DAIANA TATIELE FIEDLER

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DO LODO DE UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA) EM SOLO PARA UTILIZAÇÃO EM
CAMADAS IMPERMEABILIZANTES DE ATERRO SANITÁRIO

PONTA GROSSA

2023

DAIANA TATIELE FIEDLER

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DO LODO DE UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA) EM SOLO PARA UTILIZAÇÃO EM
CAMADAS IMPERMEABILIZANTES DE ATERRO SANITÁRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental
da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como
requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro
Lautenschläger

PONTA GROSSA

2023

F452 Fiedler, Daiana Tatiele
Análise da incorporação do lodo de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) em solo para utilização em camadas impermeabilizantes de aterro sanitário / Daiana Tatiele Fiedler. Ponta Grossa, 2023.
87 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger.

1. Lodo de eta. 2. Camada impermeabilizante. 3. Aterros. I. Lautenschläger, Carlos Emmanuel Ribeiro. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. III.T.

CDD: 628.4

**CERTIFICADO - 01/2020 - PPGESA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
SANITÁRIA E AMBIENTAL**
Certificado nº 03/2023 PPGESA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Título da Dissertação: **“Análise da incorporação de lodo de estação de tratamento de água em solo para utilização em camadas impermeabilizantes de aterro sanitário”**

Nome: **DAIANA TATIELE FIEDLER**

Orientador: **Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger**

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger – UEPG

Prof^ª. Dr^ª. Giovana Kátie Wiecheteck – UEPG

Prof. Dr. Vitor Pereira Faro – UFPR

(Assinatura eletrônica)

Ponta Grossa, 19 de dezembro de 2023



Documento assinado eletronicamente por **Giovana Katie Wiecheteck, Professor(a)**, em 20/12/2023, às 18:12, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Vítor Pereira Faro, Usuário Externo**, em 21/12/2023, às 08:41, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschlager, Professor(a)**, em 03/04/2024, às 15:48, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **1775995** e o código CRC **87E096B4**.

23.000073999-0

1775995v2

Dedico este trabalho ao meu marido Alcemir
e aos meus filhos Victória e Lucas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre me fortalecer e me guiar na busca pelos meus sonhos.

Ao meu marido pelo amor, companheirismo, motivação, força e amizade.

A minha filha por me apoiar e ser a maior motivadora de tudo.

A toda minha família pelo apoio de sempre.

Aos colegas de curso e de laboratório que se tornaram grandes amigos: Maitê, Rafael, Tiago, Rhuan, Nilson, Gustavo e tantos outros.... que contribuíram direta e indiretamente durante todo o trabalho de pesquisa, sempre me ajudando, torcendo por mim e enviando boas energias.

Ao meu orientador, professor Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger, por me aconselhar, orientar e não medir esforços durante todo o mestrado.

A todos os professores do curso que sempre se mostraram disponíveis para ajudar.

A Sanepar pela disponibilização de amostras de lodo de ETA para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos profissionais do Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas, do C-LABMU e do Laboratório de Recursos Hídricos da Universidade Estadual de Ponta Grossa pelo auxílio na obtenção dos resultados de ensaios.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudo durante um ano do curso de mestrado.

A Secretaria da Pós-Graduação pelo atendimento sempre solícito e rápido.

E a todas as pessoas que, de alguma forma, colaboraram na construção deste trabalho meu muito obrigada.

RESUMO

A captação e o tratamento de água são indispensáveis para garantir o fornecimento de água potável para a população. A água bruta passa por operações físicas e processos químicos necessários para a distribuição de água tratada às cidades, o que gera resíduos. Este resíduo gerado em Estações de Tratamento de Água (ETAs) é chamado de lodo de ETA, cuja disposição final deve seguir critérios para que não prejudiquem o meio ambiente. As empresas de saneamento enfrentam grande desafio para gerenciar os lodos gerados nas ETAs, tanto no que se refere a sua disposição final, quanto em alternativas para seu tratamento. Por outro lado, a disposição de resíduos sólidos diretamente no solo é prejudicial ao meio ambiente. Para minimizar este impacto ambiental são projetadas barreiras impermeabilizantes em aterros sanitários para impedir a percolação dos líquidos gerados e consequente contaminação de recursos hídricos subterrâneos. Assim, este trabalho avaliou o potencial do uso de lodo de ETA para utilização em camadas impermeabilizantes de aterro sanitário. Esta prática é utilizada em países como os EUA e Reino Unido e tem como vantagens: a redução da extração de solos em jazidas e a disposição ambientalmente adequada deste resíduo. A pesquisa envolveu a caracterização do lodo de ETA bem como a realização de ensaios de compactação utilizando 2 frações diferentes da mistura solo-lodo (2,5% e 5%) e com teores de umidade variando de 17,62 a 46,71%. Com os resultados do ensaio foi traçada a curva de compactação para a escolha da porcentagem de adição de lodo na mistura de solo-lodo, com o qual foram realizados os ensaios de condutividade hidráulica e de adensamento. Os resultados indicaram que a adição de lodo manteve (2,5%) ou melhorou (5%) as características de permeabilidade para o solo residual em estudo, fazendo com que, na melhor condição, a permeabilidade ficasse na ordem de grandeza de 10^{-9} m/s, ideal para aplicações em impermeabilização, como em barreiras minerais de aterros sanitários.

Palavras-chave: lodo de ETA; camada impermeabilizante; aterros.

ABSTRACT

Water treatment is essential to guarantee the drinking water supply to the population. Raw water undergoes physical operations and chemical processes that are necessary for treated water distribution to cities, which in turn generates residues. These residues generated in water treatment plants (WTP) is called WTP sludge, whose disposal must follow criteria so that it does not cause environmental harm. Sanitation companies face a major challenge in managing the WTP sludge, both in terms of its final disposal and alternatives for its treatment. On the other hand, solid waste disposal directly on the ground is harmful to the environment. To minimize this environmental impact, waterproofing barriers are designed in landfills to prevent liquid percolation and consequent underground water resources contamination. Thus, this work evaluated the potential of using WTP sludge in landfills' base and cover layers. This practice is used in countries such as the USA and the United Kingdom and has the following advantages: reducing the extraction of soil from deposits and environmentally appropriate disposal of this waste. The research involved the characterization of the WTP sludge as well as carrying out compaction tests of two different concentrations of soil-sludge mixtures (2.5% and 5%) with different moisture levels. With the test results, the compaction curve was drawn to choose the best soil and sludge mixture concentration, with which the hydraulic conductivity and consolidation tests were carried out. The results indicated that the addition of sludge maintained (2.5%) or improved (5%) the permeability characteristics for the residual soil under study, meaning that, in the best condition, the permeability was in the order of magnitude of 10^{-9} m/s, ideal for waterproofing applications, such as mineral barriers in landfills.

Keywords: WTP sludge; waterproofing barriers; landfills.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Etapas para tratamento de água.....	22
FIGURA 2 – Esquema de um aterro sanitário	31
FIGURA 3 - Representação típica de camada de fundo de um aterro sanitário	34
FIGURA 4 – Variação da massa específica dos grãos com a temperatura de secagem do lodo	41
FIGURA 5 – Curva de adensamento de diferentes lodos de ETA.....	43
FIGURA 6 – Fluxograma da pesquisa sobre o solo	48
FIGURA 7 – Fluxograma da pesquisa sobre o lodo	48
FIGURA 8 – Fluxograma da pesquisa sobre as misturas solo-lodo	49
FIGURA 9 – Curva granulométrica do solo argilo-arenoso	50
FIGURA 10 – Lodo da ETA de Iraí, Pinhais – PR	51
FIGURA 11 – Coleta do lodo na ETA de Iraí, Pinhais – PR e armazenamento hermético	52
FIGURA 12 – Lodo após secagem na MUFLA.....	59
FIGURA 13 – Micrografias com aumento de 5000 vezes	65
FIGURA 14 – Micrografias com aumento de 10000 vezes	66
FIGURA 15 – Micrografias com aumento de 20000 vezes	67
FIGURA 16 – Amostra compactada para Ensaio de condutividade hidráulica.....	70
FIGURA 17 – Preparação do corpo de prova e ensaio de adensamento	73

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1- Crescimento da população urbana no Brasil (1960-2015).....	19
GRÁFICO 2 - População urbana X População rural no Brasil (1950 - 2035)	19
GRÁFICO 3 - Destino do lodo gerado no Brasil, EUA e Reino Unido	26
GRÁFICO 4 - Destino do lodo gerado no Brasil	27
GRÁFICO 5 - Disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil (2008-2022)	29
GRÁFICO 6 – Exemplo de Curva de Compactação.....	54
GRÁFICO 7 – Curva de teor de umidade com secagem à 60°C.....	58
GRÁFICO 8 – Curvas granulométricas do lodo seco e in natura	61
GRÁFICO 9 – Limite de Liquidez do lodo seco	63
GRÁFICO 10 – Limite de Liquidez do lodo in natura.....	63
GRÁFICO 11 – Curvas de compactação misturas solo-lodo	68
GRÁFICO 12 – Curvas de compressibilidades – Solo e misturas solo-lodo	74
GRÁFICO 13 – Curvas de compressibilidades – Lodo	74

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Características de solos adequados para impermeabilização de aterros sanitários.....	35
QUADRO 2 - Sistemas de revestimento de fundo segundo regulamentações de diversos países	36
QUADRO 3 – Compilação de estudos sobre o reuso do lodo de ETA no Brasil	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Elementos constituintes do lodo centrifugado da ETA de Passaúna, Curitiba, PR e da ETA do Município de São Leopoldo, RS.....	39
TABELA 2 - Características mineralógicas do lodo de ETA encontrados na literatura	39
TABELA 3 - Teor de matéria orgânica do lodo de ETA encontrados na literatura	40
TABELA 4 – Resultados dos ensaios de caracterização realizados no solo.....	50
TABELA 5 – Resultados de teor de umidade do lodo	57
TABELA 6 – Resultados do peso específico real dos grãos de lodo.....	59
TABELA 7 – Teor de matéria orgânica médio	60
TABELA 8 – Parâmetros das curvas granulométricas	62
TABELA 9 – Composição química lodo de ETA – Ensaio MEV	64
TABELA 10 – Resultados do peso específico real dos grãos das misturas solo-lodo	67
TABELA 11 – Valores ótimos de compactação para o solo puro e misturas solo-lodo.	69
TABELA 12 – Propriedades físicas iniciais das amostras e condutividade hidráulica	70
TABELA 13 – Condutividades hidráulicas obtidas para o solo puro e misturas solo-lodo.	71
TABELA 14 – Caracterização do lixiviado de lodo e misturas solo-lodo.....	72
TABELA 15 – Propriedades físicas iniciais das amostras para ensaios de Adensamento	73
TABELA 16 – Índices de compressão e recompressão do solo e das misturas determinados nos ensaios de Adensamento.....	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO... ..	18
3.1	CONSUMO E QUALIDADE DA ÁGUA.....	18
3.2	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	21
3.3	PRODUÇÃO DE LODO EM UMA ETA.....	23
3.3.1	Produção do lodo gerado em ETAs.....	23
3.3.2	Disposição final do lodo gerado em ETAs.....	24
3.4	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) E OS ATERROS SANITÁRIOS.....	28
3.4.1	Destinação dos RSU no Brasil.....	28
3.4.2	Composição de um Aterro Sanitário.....	30
3.4.3	Sistemas de impermeabilização de um Aterro Sanitário.....	32
3.4.4	Requisitos geotécnicos para camadas de Aterros Sanitários.....	34
3.5	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO, DO LODO DE ETA E DAS MISTURAS.....	37
3.5.1	Caracterização Ambiental.....	37
3.5.2	Caracterização Mineralógica e Físico-Química.....	38
3.5.3	Caracterização Geotécnica.....	40
3.5.4	Comportamento Geotécnico.....	42
3.5.4.1	Compactação.....	42
3.5.4.2	Deformabilidade ou Compressibilidade.....	42
3.5.4.3	Permeabilidade.....	43
3.6	APROVEITAMENTO DE LODO DE ETAs NO BRASIL.....	44
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
4.1	COLETA DE AMOSTRAS DO SOLO E DO LODO.....	49
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E LODO.....	52

4.3	ENSAIOS.....	53
4.3.1	Ensaio de Compactação.....	53
4.3.2	Ensaio de Condutividade Hidráulica.....	55
4.3.3	Ensaio de Adensamento.....	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO LODO.....	57
5.2	PROPRIEDADES FÍSICAS MISTURA SOLO-LODO.....	67
5.2.1	Ensaio de Compactação.....	68
5.2.2	Ensaio de Condutividade Hidráulica.....	70
5.2.3	Ensaio de Adensamento.....	72
6	CONCLUSÃO.....	76
	REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

A partir do século XXI houve crescimento da urbanização no mundo todo. O aumento da população em áreas urbanas ocorreu em sua grande maioria sem planejamento, ocasionando a construção de moradias em áreas irregulares. Com isto, tornaram-se evidentes os problemas da falta de infraestrutura básica para a população e a importância da implementação de melhorias no sistema de saneamento básico e disponibilização de água potável (Rangel, 2005).

Ao encontro destas e outras necessidades básicas humanas, a Organização das Nações Unidas coordenou um compromisso assumido entre 193 países de todos os continentes chamado Agenda 2030. Este documento tem por objetivo orientar as nações rumo ao desenvolvimento sustentável, erradicação da pobreza extrema e reforço da paz mundial. A Agenda 2030 se baseia em 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com 169 metas a serem atingidas entre 2016 e 2030, englobando os pilares econômico, social e ambiental. Dois dos objetivos contemplados na Agenda 2030, cujos resultados implicam na qualidade de vida dos seres humanos e que estão relacionados ao saneamento básico são: Objetivo nº6 “assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos” e Objetivo nº15 “proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, travar e reverter a degradação dos solos e travar a perda da biodiversidade” (ONU, 2022).

O ODS 12 está relacionado ao consumo e produção responsáveis e traz no item 12.5 a meta de “até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso”. Ou seja, a ONU considera a gestão de resíduos como condição mínima de saneamento que deve ser garantida à população.

De acordo com uma pesquisa realizada para o Banco Mundial e conduzida por Kaza *et al.* (2018), em todo o mundo são gerados cerca de 1,4 bilhão de toneladas de resíduos sólidos urbanos por ano, o que representa 1,27 kg *per capita* por dia. E a expectativa é de que quando a população mundial atingir 9 bilhões de habitantes, previsto para ocorrer por volta de 2050, a geração de lixo urbano vai ultrapassar os 4 bilhões de toneladas por ano e atingir a média de 1,35 kg *per capita* por dia.

Os números da realidade encontrada no Brasil são semelhantes ao panorama mundial e apresenta indícios de crescimento na geração de resíduos sólidos ao longo dos anos. Este aumento pode ser observado a partir de dados do Panorama dos Resíduos Sólidos da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2022), onde mostrou que o país produziu em 2022 cerca de 82 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, o que representou 1,04 kg per capita por dia.

Devido ao crescimento populacional e à necessidade de disposição dos resíduos sólidos gerados, o Brasil convive com a deposição desordenada destes resíduos. A ABRELPE (2022), apresenta dados preocupantes quanto à quantidade de resíduos sólidos que ainda são destinados inadequadamente. O percentual de municípios que utilizavam lixões para destinar seus resíduos reduziu de 45,2% em 2008 para 39% em 2022, enquanto os que usavam aterros sanitários cresceu de 54,8% em 2008 para 61% em 2022.

Um dos tipos de resíduos destinados a aterros ou lixões são os lodos oriundos dos processos de tratamento de água ou esgoto. Para a potabilização da água é seguida uma série de etapas nas Estações de Tratamento de Água – ETAs, visando garantir sua qualidade, tais como: coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção (Achon; Barroso; Cordeiro, 2013).

Nesses processos de tratamento são adicionados produtos para facilitar a aglutinação de partículas para posterior sedimentação, cujo resíduo resulta no lodo de ETA (Rodrigues; Holanda, 2013). As características dos resíduos de uma estação de tratamento de água dependem da qualidade da água bruta, dos produtos químicos utilizados e da tecnologia de tratamento aplicada. O estudo da composição do lodo é importante para melhorar o entendimento da composição do resíduo resultante, visando estabelecer metodologias de reaproveitamento. Sua destinação é um grande problema ambiental, pois cerca de 1 a 5% do volume de água bruta tratada resulta em conteúdo sólido, ou seja, lodo de ETA (AWWA, 1978; Katayama, 2012).

Conforme Cunha *et al.* (2019), o descarte dos lodos de ETA geralmente é realizado em aterros sanitários, aterros exclusivos ou para fins agrícolas. Os elevados custos para transporte, a escassez de áreas para descarte e as legislações mais restritivas têm levado pesquisadores e engenheiros a buscarem novas soluções para uso ou para a disposição final dos resíduos gerados em ETAs e Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs).

A eficiência de aterros está relacionada ao desempenho das camadas utilizadas para impermeabilização dos mesmos. Camadas com baixa condutividade hidráulica e alta resistência ao cisalhamento minimizam a infiltração de lixiviados para as águas subterrâneas (Dixon *et al.*, 1999).

As camadas de revestimento em aterros, sejam do fundo, coberturas diárias ou cobertura final, possuem finalidades múltiplas como isolamento dos resíduos do ambiente externo, drenagem de percolado e gases, e separação do aterro em células. Os materiais utilizados nestas camadas podem ser sintéticos (como por exemplo barreiras geossintéticas), naturais, como solos compactados, misturas de solo com outro tipo de material pouco permeável ou ainda a combinação de geossintéticos com solos compactados. Deste modo, o emprego do lodo de ETA para fins geotécnicos, como em misturas com solo para camadas de impermeabilização de fundo, cobertura diária e cobertura final de aterros sanitários, pode ser uma possibilidade tecnicamente promissora para sua destinação, desde que respeitados os parâmetros geotécnicos relevantes e se o comportamento da mistura solo-lodo se mostrar adequado para utilização em camadas de aterros.

Conforme Gonçalves *et al.* (2017), para que o uso de lodo de ETA para este fim seja fundamentado, os critérios geotécnicos de impermeabilização de aterro sanitário devem ser obedecidos, tais como a distribuição granulométrica adequada e baixa permeabilidade. Se os parâmetros da mistura se mostrarem adequados, seu uso tem como benefício não impactar na redução da vida útil do aterro sanitário e possibilitar, ainda, a redução de áreas de empréstimo de solo para a operacionalização do confinamento de resíduos.

O presente trabalho teve por objetivo apresentar resultados iniciais de caracterização do lodo de ETA obtido na estação de tratamento de água localizada em Pinhais – PR, visando aplicações no contexto geotécnico, seguindo os ensaios empregados comumente na caracterização de solos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica do aproveitamento de lodo de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade de Pinhais – PR para a composição de solo-lodo a ser utilizado como barreira mineral em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar o lodo de uma ETA e do solo em estudo.
- b) Avaliar a melhor porcentagem de lodo de ETA na mistura solo-lodo para utilização como camadas impermeabilizantes em aterro sanitário.
- c) Avaliar se a condutividade hidráulica e a compressibilidade das misturas solo-lodo atendem aos critérios geotécnicos de impermeabilização.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão bibliográfica da presente dissertação aborda os seguintes temas: consumo e qualidade da água, as etapas de tratamento em uma ETA, geração de resíduos em ETAs, resíduos sólidos urbanos, aterros sanitários, aproveitamento de lodo de ETA no Brasil, bem como sua aplicação como componente de mistura com solo para camadas de aterros sanitários.

Os itens abordados tem como objetivo descrever os processos que levam à geração do resíduo em estudo, bem como apresentar a viabilidade técnica na destinação final para camadas impermeáveis de aterros sanitários.

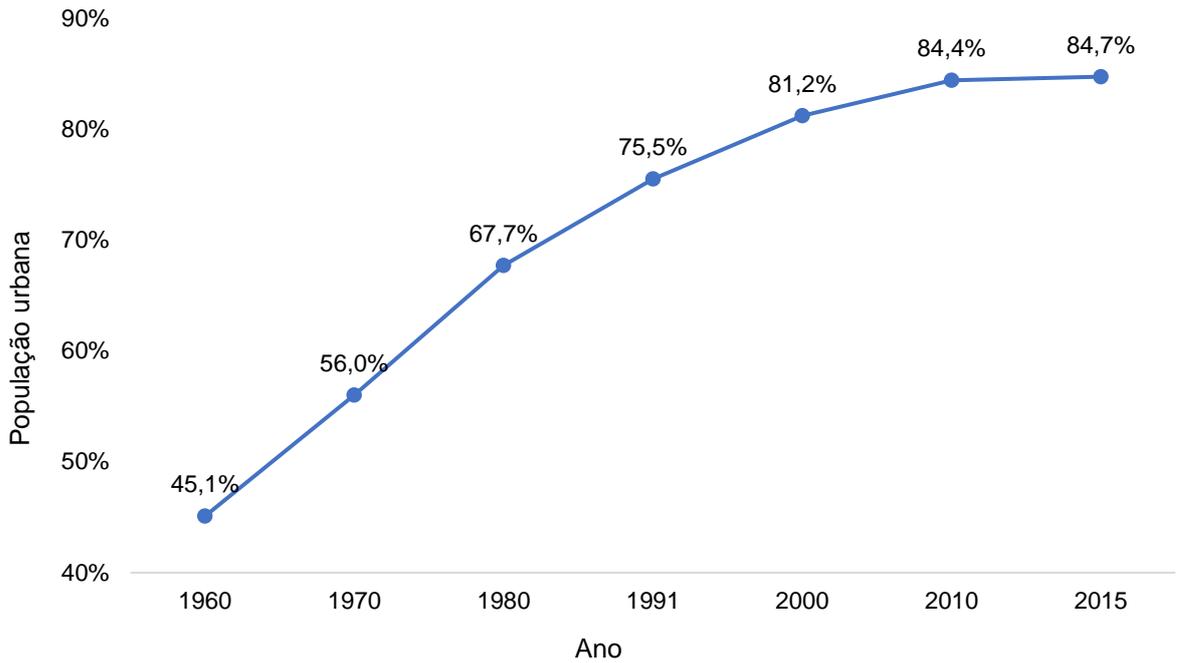
3.1 CONSUMO E QUALIDADE DA ÁGUA

As áreas urbanas possuem alta densidade populacional e grande atividade econômica, por isso necessitam de grande quantidade de água. Geralmente a água necessária para o abastecimento urbano provém de rios, que também recebem os efluentes gerados pela população (Camargo; Pereira, 2003).

Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, são encontradas maiores taxas de crescimento populacional residentes na área urbana, condição que, aliada ao fato de que 39,7% dos municípios brasileiros ainda não possuem serviço de esgotamento sanitário (baixo percentual de cobertura), amplia a pressão sobre sistemas que já se encontram sobrecarregados (Guerra, 2005; IBGE, 2017).

É possível visualizar no GRÁFICO 1 o aumento populacional do Brasil entre o período de 1960 a 2015. O censo demográfico identificou que o total da população que vive nas cidades passou de 45,1% em 1960 para 84,7% em 2015 (IBGE, 2017).

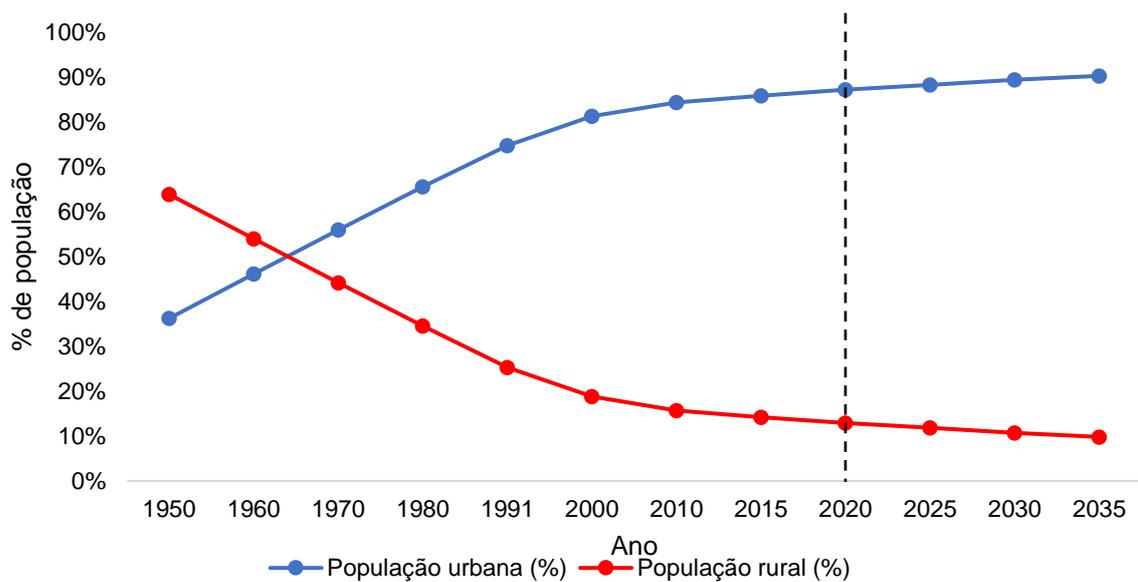
GRÁFICO 1- Crescimento da população urbana no Brasil (1960-2015)



Fonte: IBGE, Censo Demográfico (1960, 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010); PNAD (2015).

O relatório de perspectivas de urbanização mundial da Organização das Nações Unidas (2018), apresenta uma estimativa de que a população urbana no Brasil atinja 92,4% até 2050. O GRÁFICO 2, mostra a população urbana e rural no país em relação a porcentagem da população total, entre 1950 a 2035.

GRÁFICO 2 - População urbana X População rural no Brasil (1950 - 2035)



Fonte: Organização das Nações Unidas (2018 e 2022).

Os números apresentados no GRÁFICO 2 indicam crescimento considerável das áreas urbanas entre 1950 e 2020, conseqüentemente, houve acréscimo na demanda por produtos e serviços. Nestas condições, o meio ambiente passa a ser explorado com maior intensidade para fornecer os recursos necessários para o crescimento e desenvolvimento das cidades (Guerra, 2005).

Os setores de abastecimento de água e esgotamento sanitário estão demandando soluções cada vez mais desafiadoras, isso porque os recursos hídricos passaram a ser mais exigidos em virtude da necessidade de captação de maior volume de água para abastecimento público, processos industriais e agrícolas, e também pelo aumento na demanda de geração de energia (Guerra, 2005).

De acordo com Guerra (2005), o desenvolvimento urbano envolve duas atividades conflitantes: o aumento da demanda de água com qualidade e a degradação dos mananciais por contaminação, decorrente da disposição e falta de tratamento adequado dos resíduos gerados. Tucci (1999) afirma que a degradação dos mananciais geralmente não é tratada como prioridade. Prefere-se substituir um manancial degradado por outro em melhores condições, mesmo que tal escolha implique na necessidade de novos projetos de captação e tratamento.

Desta maneira, a demanda de água potável induz ao maior volume de captação e a um tratamento cada vez mais rigoroso, com maiores quantidades de produtos químicos para se efetuar o tratamento da água para abastecimento público, onerando o processo de tratamento e gerando uma maior quantidade de resíduos (Guerra, 2005).

O consumo de água entre as populações pode variar conforme o uso para qual se destina, de acordo com a região e questões culturais. A quantidade média diária para ingestão humana é de 2 litros, porém o uso doméstico estimado é de 250 litros por dia, por pessoa. Já para atividades agrícolas calcula-se cerca de 1.000 litros por dia, por pessoa (Camargo; Pereira, 2003).

A água utilizada para ingestão humana deve apresentar boa qualidade, ou seja, deve ser isenta de partículas em suspensão, microrganismos patogênicos, e substâncias orgânicas dissolvidas (Camargo; Pereira, 2003). A qualidade da água disponibilizada para a população está ligada diretamente na diminuição da incidência das doenças de veiculação hídrica e a melhoria nos sistemas de abastecimento traz efeitos benéficos para a saúde e qualidade de vida de toda a população (Silva, 2020).

Para proteger o meio ambiente e a saúde humana é preciso se enquadrar às legislações pertinentes na produção de água potável para abastecimento público e também destinar adequadamente os resíduos gerados nas unidades de tratamento (Barbosa, 2020). O local onde a água bruta torna-se potável denomina-se como Estação de Tratamento de Água (ETA), que tem como principal objetivo garantir os padrões de potabilidade ao consumo humano.

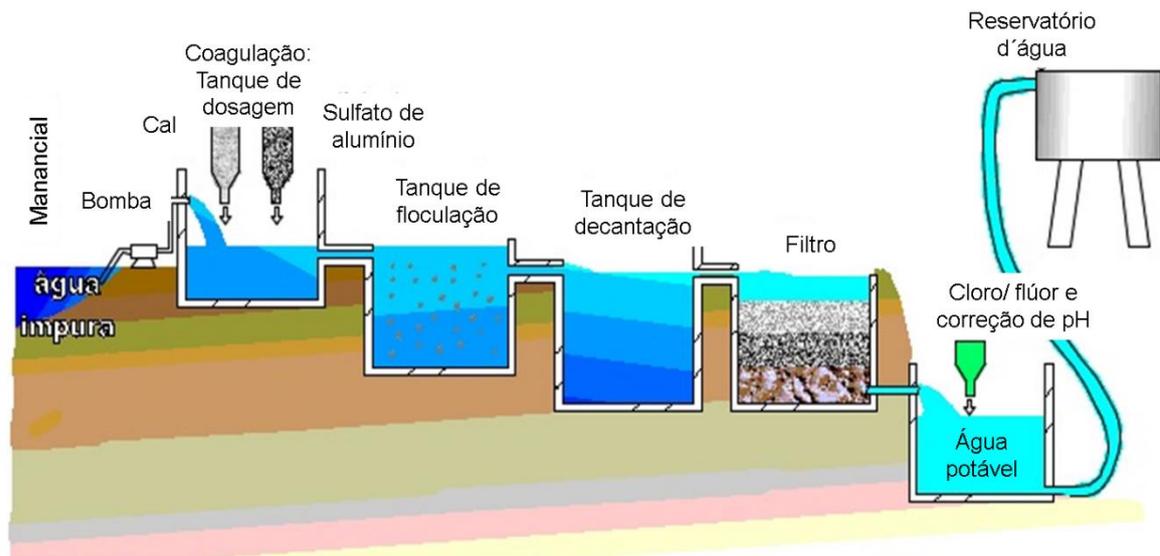
3.2 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

As ETAs são comumente utilizadas para produção de água potável, destinada ao abastecimento público. É o local onde a água bruta passa por diferentes processos e operações com o objetivo de transformá-la em água com qualidade adequada para o consumo humano (Kondageski *et al.*, 2013).

O princípio básico de funcionamento de uma ETA se dá pelo tratamento da água por etapas, que dependem principalmente do seu nível de poluição (Castro, 2008a).

De acordo com o SAAE (2006), o processo de tratamento pode ser dividido em: Simples Desinfecção, onde a desinfecção é feita apenas por cloração antes da distribuição; Tratamento não-convencional, quando são empregados alguns dos seguintes métodos: clarificador de contato, filtração rápida, flotação e desinfecção; e por fim o tratamento mais empregado, que é o Convencional com o processo completo, que inclui coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção de pH, , cujo desenho esquemático está representado na FIGURA 1 e com etapas detalhadas por Castro (2008a,b,c,d), nos tópicos a seguir.

FIGURA 1 – Etapas para tratamento de água



Fonte: Castro (2008a).

1) **Coagulação:** etapa inicial em que as impurezas são agrupadas por ação de reagentes químicos, em partículas maiores (flocos) para que possam ser removidas pelo processo de decantação. Os reagentes utilizados são denominados coagulantes e dispersos na água bruta de forma rápida utilizando, normalmente, um dispositivo chamado Calha Parshall.

2) **Floculação:** nesta etapa o objetivo é que os flocos formados na coagulação aumentem de densidade através de um processo de agitação mais lenta da água nas câmaras floculadoras.

3) **Decantação:** tem por objetivo separar as partículas sólidas presentes na água através da ação da gravidade. As impurezas sólidas se sedimentam no fundo do decantador enquanto a água é retirada por extremidade superior do tanque de decantação.

4) **Filtração:** o processo de filtração ocorre quando a água passa por um meio poroso granular constituído normalmente por areia, com uma ou mais camadas, instalado sobre um sistema de drenagem, capaz de reter as impurezas ainda presentes na água.

5) **Desinfecção:** é o processo de inativação ou destruição de organismos patogênicos capazes de provocar doenças ou outros organismos indesejáveis. Para isto utiliza-se, normalmente, agentes desinfetantes como o cloro, ozona, luz ultravioleta e íons de prata. Após estas etapas é realizado a correção de pH e

fluoretação da água para atender aos padrões de potabilidade exigidos para disponibilização à população.

3.3 PRODUÇÃO DE LODO EM UMA ETA

De acordo com dados do IBGE (2011), a potabilização de cerca de 70% da água bruta no Brasil é realizada através do tratamento de ciclo completo citado no item 2.2. Dentre as etapas de tratamento convencional, as que geram maiores quantidade de resíduos é na decantação (lodo de decantadores) e na filtração (água de lavagem dos filtros).

3.3.1 Produção do lodo gerado em ETAs

A produção de resíduos em ETAs está diretamente relacionada à qualidade da água bruta. Assim, ETAs que utilizam rios para a captação de água bruta geralmente geram mais resíduos sólidos do que aquelas que utilizam lagos ou reservatórios. (AWWA, 1978).

Para remover as partículas em suspensão na água é necessário neutralizar suas cargas elétricas. Para isto utilizam-se coagulantes com a capacidade de formar hidróxidos insolúveis como por exemplo o sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3]$, o cloreto férrico $[FeCl_3]$ ou o sulfato férrico $[Fe_2(SO_4)_3]$. A decisão técnica para escolha de qual tipo de coagulante será utilizado, inclui a qualidade da água a ser tratada, a disponibilidade do produto, a facilidade de operação, o menor custo do produto, o menor volume de lodo e as melhores condições para desidratar o lodo (Gomes *et al.*, 2019; Richter, 2009).

A geração de lodos de ETA resulta de processos que removem da água bruta materiais cuja presença no produto final é indesejável. Estes materiais incluem areia, argila ou silte, compostos orgânicos em solução ou estado coloidal, íons que causam dureza, microrganismos variados e resultantes dos compostos químicos aplicados no processo, tais como sais de alumínio ou ferro, polieletrólitos e cal, entre outros. Estes constituintes produzem uma suspensão química ou lodo com alto conteúdo de umidade, com coloração variada dependendo da natureza das impurezas removidas da água tratada (AWWA, 1978).

Os processos de tratamento da água resultam em dois tipos de resíduos: o lodo sedimentado no fundo dos decantadores e a água de lavagem dos filtros, sendo estes, constituídos de água e sólidos contidos na fonte de água, acrescidos de produtos reagentes dos processos de tratamento (Richter, 2009). O lodo de ETA é um material não biodegradável, rico em matéria orgânica, silicatos e produtos resultantes dos reagentes químicos do processo de tratamento (Rodrigues; Holanda, 2013).

Estima-se que em uma ETA de tratamento convencional que produz cerca de 51 m³/d de água potável por dia (SAMAE, 2018) gere aproximadamente 1,8 t/d de lodo úmido (Gomes *et al.*, 2019; Richter, 2009). De acordo com dados da American Water Works Association – AWWA (1978) o volume médio de lodo produzido pela coagulação representa aproximadamente 1% do volume de água bruta tratada, tendo 0,1 a 3,5% de conteúdo sólido. Já para Katayama (2012), o lodo de ETA é composto de impurezas removidas da água através da adição de produtos químicos, e, geralmente, compreende até 5% da produção anual da ETA. Para Chen *et al.* (2015), os resíduos de uma ETA de ciclo completo podem compreender de 3 a 10% da água produzida no sistema, dependendo das características da água bruta, da coagulação, dos produtos químicos adicionados e do método operacional.

3.3.2 Disposição final do lodo gerado em ETAs

A destinação desse resíduo é um grande problema ambiental para as empresas de saneamento, sejam públicas ou privadas. A devolução aos corpos hídricos caracteriza um crime ambiental de acordo com a Lei nº 9.605/98, que estabelece sanções àquele que “provocar, pela emissão de efluentes ou carreamento de materiais, o perecimento de espécimes da fauna aquática existentes em rios, lagos, açudes, lagoas, baías ou águas jurisdicionais brasileiras” (BRASIL, 1998).

Para Cordeiro e Campos (1998), as tecnologias de tratamento de lodos de ETAs buscam atingir condições favoráveis para sua disposição final, ou seja, buscam reduzir o volume de lodo em um estado sólido ou semissólido. Para isto, podem ser utilizados meios naturais, como os leitos de secagem e lagoas de lodo ou meios artificiais, tais como centrífugas, filtros-prensa, filtros a vácuo, prensas desaguadoras, entre outros.

No que se refere à disposição final do lodo de ETAs, podem ser citadas diferentes alternativas dependendo da análise de viabilidade técnica, econômica e

ambiental. Para Di Bernardo e Centurione Filho (2002), os métodos para disposição final do lodo podem ser o lançamento em lagoas, disposição no solo ou em aterro sanitário e a incineração. Richter (2009) cita ainda, como opções, o lançamento em cursos de água, no mar e em redes de esgotos, e pontua que o critério básico para escolher a alternativa de disposição é a quantidade de sólidos, que geralmente é delimitado da seguinte forma:

- Sólidos < 8%: Descarga em curso de água ou rede de esgotos sanitários;
- Sólidos entre 1% a > 15%: Aplicação no solo;
- Sólidos entre 15% a > 25%. Aterro sanitário.

Para Guerra (2005), a disposição do lodo no solo pode constituir-se em excelente forma de tratamento, desde que se respeite a capacidade natural do meio e dos microrganismos decompositores presentes. Os aterros convencionais podem ser utilizados para a disposição conjunta de resíduos orgânicos e resíduos sólidos não perigosos. É uma medida interessante do ponto de vista econômico, principalmente para os países em desenvolvimento, porém, este procedimento deve ser realizado com cautela a fim de se evitar alterações significativas dos líquidos percolados dos aterros. Para isso é necessário determinar a fração ideal de resíduo a ser adicionado aos resíduos orgânicos, de tal forma que se continue garantindo o bom desempenho dos aterros.

A forma como o lodo das ETAs é removido do decantador influencia diretamente na sua quantidade e qualidade, gerando problemas na gestão desse resíduo. O lodo dos decantadores pode conter contaminantes orgânicos e inorgânicos, o que pode dificultar sua remoção e sua disposição final (Achon; Barroso; Cordeiro, 2013).

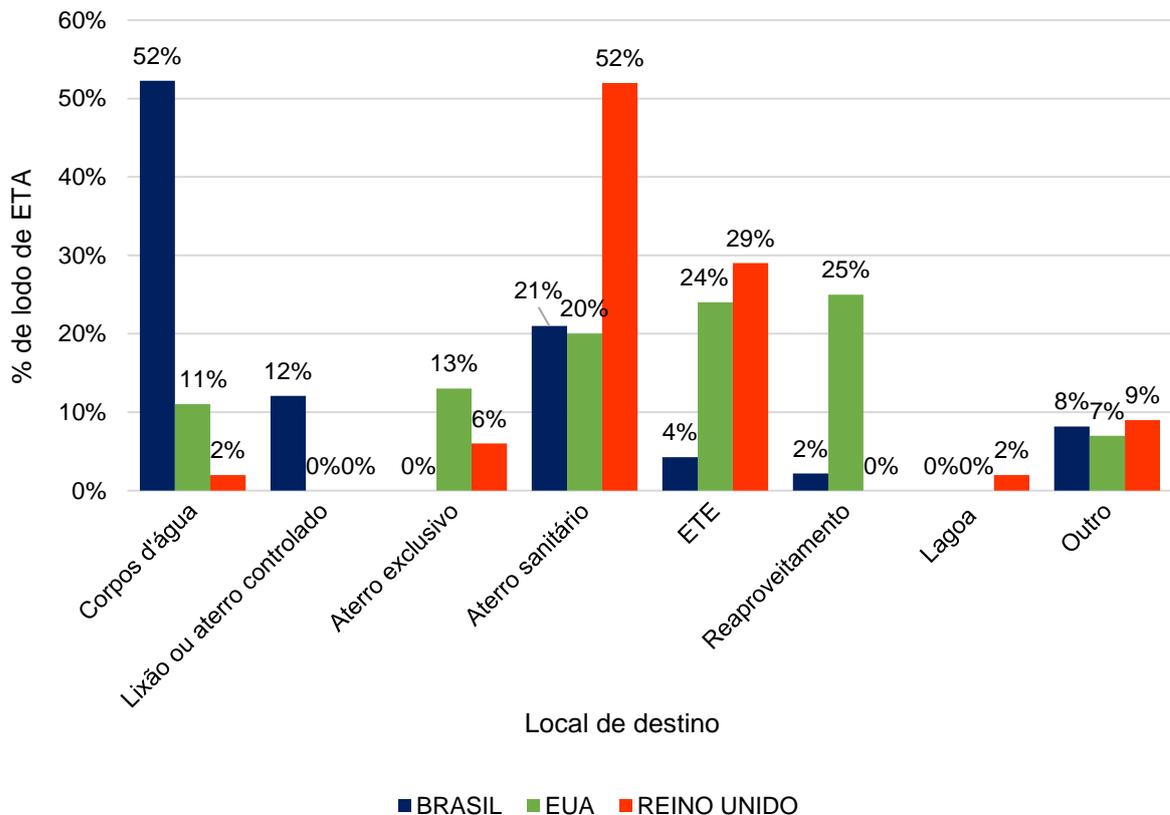
Dentro deste contexto, é necessário conhecer as características do resíduo que se deseja utilizar e do desenvolvimento de estudos no sentido de determinar a possível influência deste resíduo no meio inserido (Guerra, 2005).

Cornwell *et al.* (2000) fizeram um levantamento a respeito da disposição final de lodos das ETAs nos Estados Unidos. Na pesquisa foi verificado que 25% das ETAs aplicam o lodo no solo, em 24% o lodo é encaminhado para o sistema de esgotos, 20% é disposto em aterros, 13% em aterro exclusivo para lodos de ETA e ETE e 7% empregam outras formas de disposição final e apenas 11% das ETAs lançam o lodo de volta aos corpos d'água.

Em outra pesquisa realizada no Reino Unido e liderada por Simpson *et al.* (2002), constatou-se que apenas 2% das ETAs lançam o lodo nos corpos d'água e que a grande maioria dos casos o lodo é destinado para aterros sanitários (52%). Cerca de 29% realizam o lançamento no sistema de esgoto, 9% aplicam-se novos métodos, 6% fazem o depósito em aterro exclusivo para lodos de ETA e ETE e 2% encaminham para lagoas.

Já no Brasil, a realidade é outra. Conforme Oliveira (2020), as ETAs implantadas antes das leis que normatizam o licenciamento para atividades com potencial poluidor não seguem os critérios obrigatórios para destinação e disposição adequadas dos lodos gerados. Isso fica evidenciado na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico que está representada no GRÁFICO 3, onde mais da metade do lodo gerado nas ETAs é lançada no corpo d'água mais próximo, sem nenhum tratamento prévio, causando sérios problemas ambientais (IBGE, 2017).

GRÁFICO 3 - Destino do lodo gerado no Brasil, EUA e Reino Unido

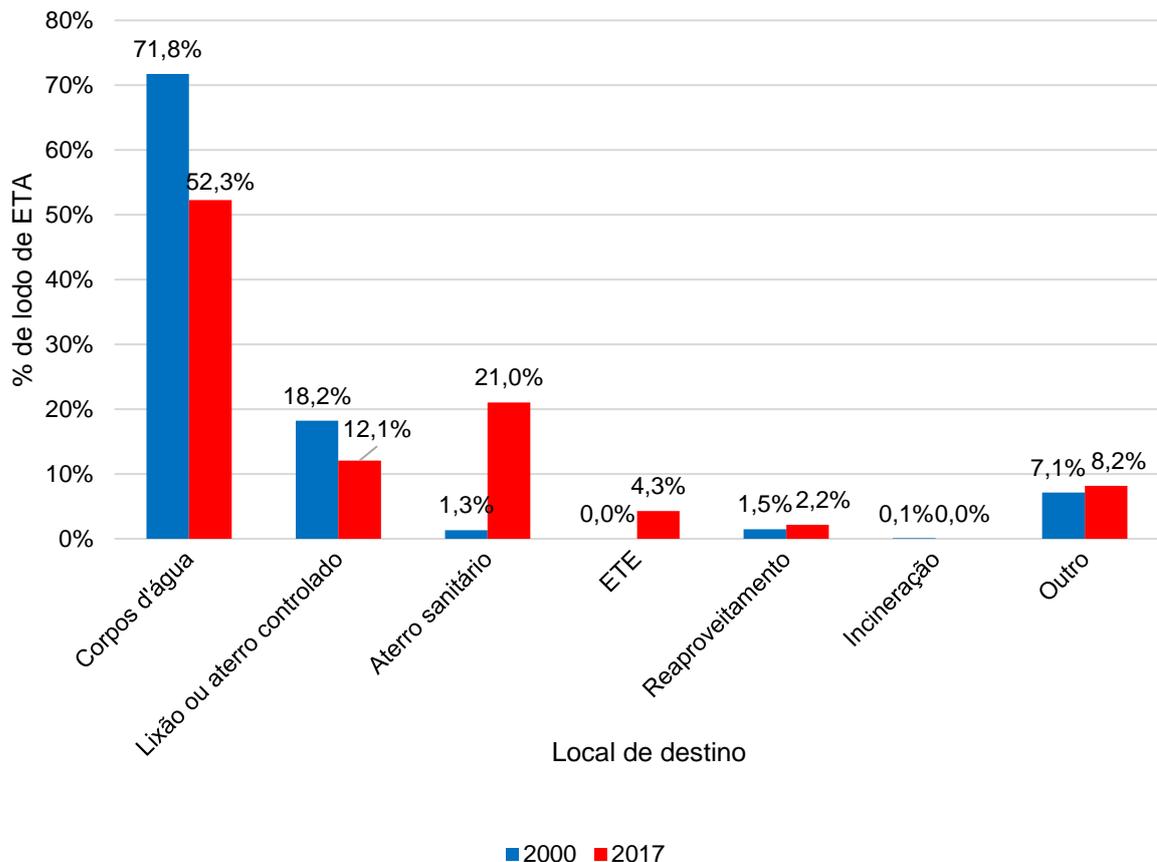


Fonte: Cornwell *et al.* (2000); Simpson *et al.* (2002); PNSB, IBGE (2017)

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada pelo IBGE entre os anos de 2000 e 2017 mostra uma melhoria na quantidade de lodo com destinação

adequada, como mostrado no GRÁFICO 4. Em 2000, cerca de 90% do lodo gerado era descartado em corpos d'água ou em lixões. Este percentual caiu para quase 65% em 2017, porém apesar dessa redução no descarte inadequado, os números ainda são alarmantes se comparados a países como os EUA e o Reino Unido, que nessa mesma comparação descartavam em corpos d'água ou em lixões 11% e 2%, respectivamente.

GRÁFICO 4 - Destino do lodo gerado no Brasil



Fonte: IBGE (2017)

A disposição final do lodo de ETA deve ser realizada baseada em critérios econômicos, sociais e de saúde pública. Por este motivo, torna-se necessário entender sua composição e seu comportamento para avaliar o efeito da sua disposição como resíduo em aterros sanitários ou a viabilidade de aplicação geotécnica como material constituindo na construção dos mesmos.

3.4 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) E OS ATERROS SANITÁRIOS

Neste tópico serão abordados a destinação dos RSU no Brasil, a composição de um aterro sanitário e os requisitos geotécnicos de materiais utilizados para camadas impermeabilizantes de aterros sanitários, sendo esta uma das principais aplicações deste estudo.

3.4.1 Destinação dos RSU no Brasil

Um dos principais aspectos a serem abordados quanto à disposição final dos resíduos está relacionado à sua classificação. A norma técnica NBR 10.004:2004 classifica-os quanto a sua fonte ou origem e quanto ao seu grau de periculosidade frente a determinados padrões de qualidade ambiental e de saúde pública, sendo enquadrados nas seguintes categorias:

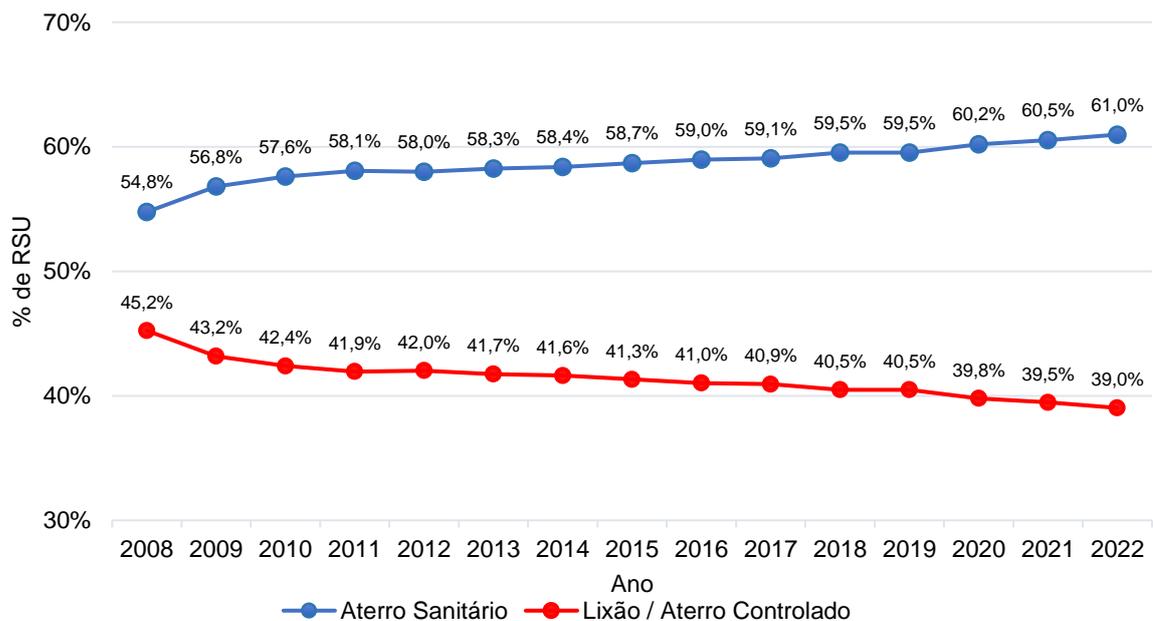
- Classe I – Resíduos perigosos; e
- Classe II – Resíduos não perigosos, que é subdividida em:
 - Classe II A – Resíduos não inertes: aqueles que não apresentam periculosidade, mas tem características como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
 - Classe II B – Resíduos inertes: aqueles que, submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

O manejo inadequado de resíduos sólidos contribui muito para o agravamento dos problemas ambientais. O destino final destes resíduos, quando efetuado de maneira inapropriada, constitui uma atividade potencialmente poluidora do ar, solo e das águas superficiais e do subsolo (Guerra, 2005).

Com uma população que ultrapassa os 200 milhões de habitantes, o Brasil é o quarto maior gerador de resíduos sólidos do mundo, cuja destinação deveria contemplar tratamento com solução ambiental de acordo com a legislação, porém grande parte acaba sendo disposto à céu aberto, lançados na rede de esgotos ou até mesmo queimados. (Kaza *et al.*, 2018).

Em seu último relatório sobre resíduos sólidos a ABRELPE (2022) ressalta que foram geradas em 2022 quase 82 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), cuja coleta chegou a 93% desse total, o que equivale a pouco mais de 76 milhões de toneladas. Deste total, apenas 46 milhões de toneladas, ou 61% do coletado, foi disposto em aterros sanitários. Aproximadamente 30 milhões de toneladas de resíduos, 39% do total coletado, foi depositado inadequadamente em lixões ou aterros controlados (GRÁFICO 5). E cerca de 6 milhões de toneladas de lixo geradas em 2022 sequer foram coletadas, tendo destino incerto e sem controle, mesmo quando a legislação determina a destinação para tratamento e, em último caso, para aterros sanitários.

GRÁFICO 5 - Disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil (2008-2022)



Fonte: Abrelpe (2008-2022)

As decisões técnicas e econômicas acerca do tratamento e destino final dos resíduos sólidos devem ser fundamentadas a partir da classificação dos mesmos, tendo o conhecimento da presença de compostos tóxicos ou elementos que se tornem prejudiciais. Este cuidado propicia a definição de medidas especiais, visando a proteção de pessoas que apresentem algum contato com este resíduo ou do meio ambiente, quando efetuada a sua destinação final (Guerra, 2005).

3.4.2 Composição de um Aterro Sanitário

O processo de disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) passou por vários aprimoramentos devido às agências de proteção ambiental e dos governos, que definiram políticas para que o gerenciamento desses resíduos se tornasse eminente (Melare *et al.*, 2017). De acordo com Boscov (2008), a redução dos impactos ambientais causados por aterros envolve questões como a seleção do local, o projeto, os componentes do sistema, os materiais empregados, a operação, o monitoramento e o planejamento para o fechamento e para as etapas pós-fechamento.

Conforme Prim (2011), o aterro é uma forma de disposição de resíduos no solo que, seguindo os critérios de engenharia e as normas operacionais específicas, garante um confinamento seguro em termos de poluição ambiental e proteção à saúde pública. Para tanto, o aterro sanitário deve conter uma localização adequada, projeto criterioso, infraestrutura de apoio, obras de controle de poluição, bem como e regras operacionais específicas.

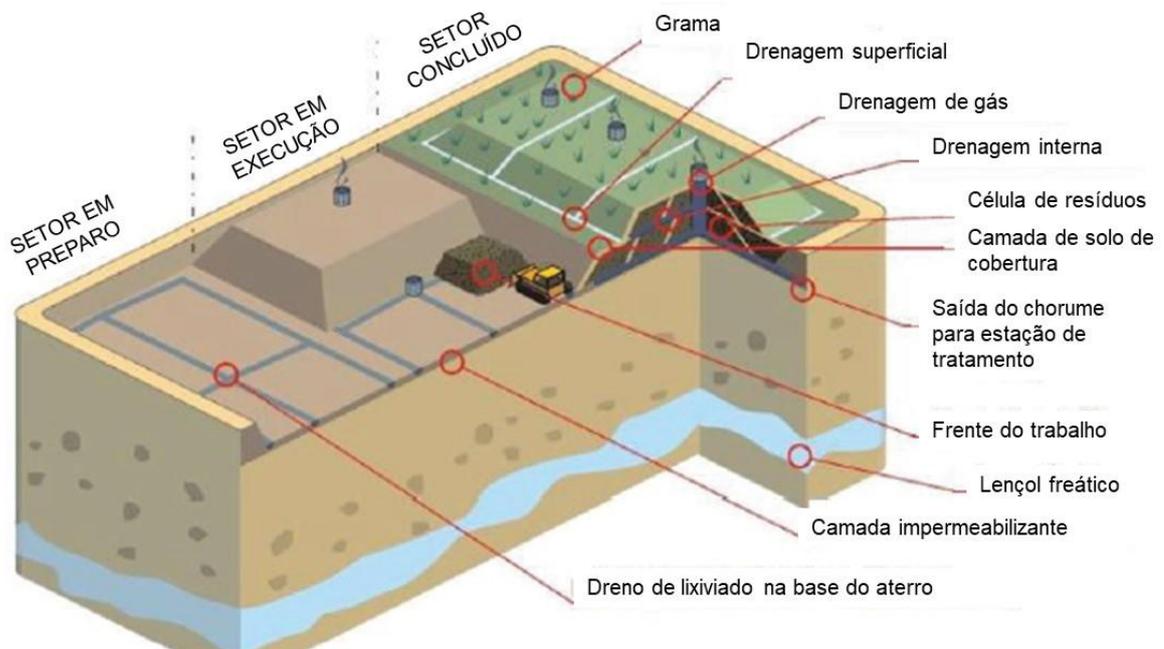
Os aterros podem ser denominados aterros sanitários, quando sua função é receber os resíduos sólidos urbanos, ou aterros industriais, quando recebem especialmente resíduos sólidos industriais (Prim, 2011). Segundo a NBR 8419 (ABNT, 1992), aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. Este método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de solo na conclusão de cada jornada de trabalho e, em intervalos menores, se necessário.

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2000) os aterros sanitários, conforme mostrado na FIGURA 2, são obras que permitem o confinamento de RSU de forma a garantir o controle de poluição ambiental, da proteção da saúde pública e, conseqüentemente, minimização dos impactos ambientais. Conforme Kawai *et al.* (2012) as transformações físico-químicas e biológicas geradas no processo de decomposição da matéria orgânica dos RSU produzem o lixiviado e o biogás, os quais precisam ser coletados e tratados.

De acordo com Boscov (2008), a construção e operação de um aterro sanitário no Brasil geralmente desenvolve-se nas seguintes etapas:

- 1) A área que irá receber os resíduos é recoberta com um revestimento de base, com camadas de drenagem e impermeabilização;
- 2) As camadas de RSU são construídas pelo método de rampa, onde o resíduo é descarregado dos caminhões no pé da rampa, um trator de esteira empurra o lixo de baixo para cima, subindo pelo talude e sendo compactado com três a cinco passadas em cada camada;
- 3) O resíduo compactado é coberto com uma camada de solo com aproximadamente 15 cm de espessura;
- 4) Cada célula composta com resíduos possui cerca de 2 a 4 metros de altura, são revestidas de solo ou mistura de solo com outro material na base, topo e laterais e possui drenagem em sua base;
- 5) Para sobreposição de uma célula em outra é necessário aguardar o tempo de decomposição do material;
- 6) O topo do aterro recebe camadas de drenagem e de impermeabilização;
- 7) É construído um sistema de canaletas, escadas d'água e drenos verticais para escape dos gases em todo o perímetro do aterro.

FIGURA 2 – Esquema de um aterro sanitário



Fonte: Adaptado de IPT (2000).

Conforme Knierim (2020), algumas medidas visam minimizar os impactos ambientais e proteger o ambiente onde será implantado o aterro e são elementos

típicos constituintes de aterros sanitários: divisão em células, compactação dos resíduos, camada de cobertura, sistema de impermeabilização de base, sistemas de drenagem, sistema de tratamento para líquidos e gases, monitoramento geotécnico e ambiental, entre outros. Portanto, aterro de resíduos refere-se à toda a instalação e atividades que são processadas nela, ou seja, inclui as estruturas, resíduos, local e os sistemas de implantação, operação e monitoramento (Boskov, 2008).

3.4.3 Sistemas de impermeabilização de um Aterro Sanitário

Os processos construtivos das camadas de impermeabilização merecem destaque frente aos outros elementos do sistema que compõem um aterro sanitário. As camadas impermeáveis são utilizadas como impermeabilização de base, camadas intermediárias e de cobertura. Essas camadas são construídas empregando técnicas que visam reter ao máximo possível a entrada de água da chuva ou a saída de líquidos percolados, de forma a não aumentar a geração de líquidos dentro da massa de resíduos, assim como evitar que aqueles gerados atinjam as águas e o solo natural (Prim, 2011).

Conforme relatado por Vilar (2003), as primeiras aplicações de camadas impermeabilizantes consistiam apenas de solo compactado. Com o passar do tempo as configurações dos sistemas de impermeabilização modificaram-se conforme problemas observados ao longo dos anos de execução e monitoramento dos aterros. A camada de impermeabilização pode conter uma ou mais camadas, com diferentes funções e diferentes materiais, dependendo das suas propriedades, funções, necessidades e custo do produto. As camadas de cobertura convencionais de aterros são constituídas por uma camada de solo natural argiloso ou pode ser intercalada com geossintéticos, visando impermeabilizar o topo das células do aterro (Mariano, 2008).

Com o avanço das pesquisas na área, novas opções estão surgindo, inclusive sendo produzidas em escala comercial. Pode-se optar por materiais naturais, (como argila, areia, cascalho, blocos rochosos), sintéticos (como geomembranas e geotêxteis) ou alternativos (como materiais residuais recuperadas ou recicladas, solos orgânicos, lodos, lamas) (Prim, 2011).

A camada de cobertura, também conhecida por barreira hidráulica, consiste numa barreira física que pode ser executada com solo argiloso compactado na umidade ótima e na massa específica aparente seca máxima, geocomposto argiloso,

barreiras geossintéticas ou executada numa combinação desses materiais. Essa camada é confeccionada diretamente sobre os RSU com um solo de baixa permeabilidade, podendo ser intercalada por geossintéticos (Huse, 2007; Costa, 2015). Existem vários métodos de projetos de construção da camada de cobertura, sendo a utilização de solos argilosos compactados, com baixa condutividade hidráulica, o método mais empregado (Huse, 2007). Embora possuam baixo custo para construção, este tipo de sistema é suscetível a falhas pelo surgimento de fissuras, aumento da permeabilidade de água e gases e, conseqüentemente, diminuição do desempenho da camada (USEPA, 2003).

Segundo a USEPA (2011), as razões para executar a camada de cobertura final passam por diversos fatores, entre os quais controlar a umidade e percolação para a zona de resíduos, minimizar a erosão, gerir o escoamento superficial das águas pluviais, prevenir a ocorrência de vetores de doenças e outras perturbações à saúde pública, evitar a exposição direta dos resíduos, controlar as emissões de gases e odores para atmosfera e também melhoria estética para outros fins de utilização final.

Devido a sua característica impermeabilizante, a camada de cobertura minimiza a entrada de água da chuva, o que reduz a produção de lixiviado no interior do aterro. O lixiviado é o produto da decomposição dos resíduos orgânicos no interior das células do aterro sanitário com contribuições da infiltração da água da chuva e da umidade dos resíduos. Além de reduzir a entrada de água para o interior do maciço a camada de cobertura também minimiza a emissão de gases gerados para a atmosfera (Araújo, 2017).

Segundo Yang *et al.* (2012), a execução de uma camada de cobertura de solo compactado de aterros sanitários, efetiva e econômica, é um desafio devido à diversidade de variáveis envolvidas como, tipos de solos, espessura da camada, questões climáticas, espécies vegetais, características topográficas do aterro, bem como, a inexistência de normas e regulamentações para sua execução. Ainda, a manutenção da estanqueidade em coberturas é desafiada pelos elevados recalques esperados mesmo após o encerramento das operações de um aterro sanitário.

Outra forma de executar a camada de cobertura é com o sistema evapotranspirativo ou monolítica, que consiste em uma espessa camada de solo de textura fina (areias finas, siltes e siltes argilosos), com capacidade de armazenamento de água e para suporte da vegetação (USEPA, 2004).

De acordo com Catapreta (2008) as coberturas de aterros no Brasil geralmente são confeccionadas com uma barreira de solo com espessura de aproximadamente 60 cm, constituída de materiais de baixa permeabilidade (condutividade hidráulica igual ou inferior a 10^{-9} m/s) e acima dessa camada de solo é aplicado em torno de 15 cm de cobertura vegetal.

Já o revestimento de fundo de um aterro tem como função reduzir o transporte de poluentes para a zona insaturada ou aquífero subjacentes. É composto basicamente por camadas de impermeabilização, geomembranas, drenagem e transição (Bosco, 2008), conforme representação na FIGURA 3.

FIGURA 3 - Representação típica de camada de fundo de um aterro sanitário



Fonte: Adaptado de BOSCOV (2008).

3.4.4 Requisitos geotécnicos para camadas de Aterros Sanitários

As normas brasileiras ligadas aos procedimentos em aterros sanitários, NBR 13896 (ABNT, 1997) e NBR 15849 (ABNT, 2010), não especificam o tipo de solo para utilização como material de camada impermeabilizante de aterros sanitários, e nem determinam uma espessura mínima ou metodologia de execução a ser seguida. Essas regulamentações apenas preconizam que o coeficiente de condutividade hidráulica não seja superior a 10^{-8} m/s como parâmetro a ser obedecido para seleção do material de cobertura.

A NBR 13896 (ABNT, 1997) indica que a camada de cobertura final de um aterro deve “minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não

estar sujeita à erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro”. Recomenda, ainda, a execução de aterros em áreas onde o subsolo tenha coeficiente de permeabilidade inferior a 5×10^{-5} cm/s, mas considera desejável a existência de um depósito natural de material com permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s.

A respeito do sistema de impermeabilização de aterro sanitário o Instituto Ambiental do Paraná – IAP apenas orienta que deve ser prevista impermeabilização, indicando: o tipo de impermeabilização adotado; os materiais empregados, com suas especificações e características segundo as correspondentes normas brasileiras; e o cálculo da quantidade de barreiras geossintéticas necessária. (IAP, 2014).

As características indicadas para solos de cobertura de aterros sanitários não são consensuais nem na legislação e nem na literatura, porém, após levantamento bibliográfico adotaram-se as referências do QUADRO 1, que mostra um resumo das características mais relevantes recomendadas para materiais usados na construção de camadas de cobertura e de base de aterros sanitários apresentados por diferentes autores.

QUADRO 1 - Características de solos adequados para impermeabilização de aterros sanitários

Característica	Referências			
	Rocca et al. (1993)	Daniel (1993)	Qasin e Chiang (1994)	NBR 13896 (ABNT, 1997)
Coeficiente de condutividade hidráulica	$k \leq 10^{-9}$ m/s	$k \leq 10^{-9}$ m/s	$k \leq 10^{-9}$ m/s	* $k < 5 \times 10^{-7}$ m/s
Porcentagem de pedregulhos	Classificação SUCS (CL, CH, SC ou OH)	% Retido na #4 < 30%	% Retido na #4 < 50%	-
Porcentagem de finos	% Passante na #200 > 30%	% Passante na #200 > 20%	% Passante na #200 > 30%	-
Limite de liquidez	LL > 30%	-	-	-
Limite de plasticidade	IP ≥ 15%	IP > 7%	IP 7% a 15%	-

Fonte: Adaptado de Prim (2011) e Montalvan (2016).

*para o subsolo do aterro.

SUCS: Sistema Unificado de Classificação dos Solos.

CL: Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras.

CH: Argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas.

SC: Areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila.

OH: Argilas orgânicas de média e alta plasticidade.

Normas e legislações de outros países exigem diferentes tipos de configurações para camadas de fundo de aterro sanitário, conforme descrito por Boscov (2008) no QUADRO 2.

QUADRO 2 - Sistemas de revestimento de fundo segundo regulamentações de diversos países

Países	Impermeabilização de solo compactado $K_{m\acute{a}x} =$	Geomembrana de PEAD $esp_{m\acute{i}n} =$	Camada de drenagem $esp_{m\acute{i}n} =$
ÁUSTRIA	10^{-9} m/s	0,60 m	0,50 m
BÉLGICA	10^{-9} m/s	1 m	não estipulado
FRANÇA	10^{-6} m/s	5 m	0,30 m
ALEMANHA	10^{-10} m/s	0,75 m	0,50 m
HUNGRIA	10^{-9} m/s	0,60 m	0,30 m
ITÁLIA	10^{-9} m/s	1 m	não estipulado
PORTUGAL	10^{-9} m/s	0,60 m	1 m
REINO UNIDO	10^{-9} m/s	1 m	não estipulado

Fonte: Adaptado de BOSCOV (2008).

K: Coeficiente de condutividade hidráulica.
 $esp_{m\acute{i}n}$: Espessura mínima.

Conforme Knierim (2020), o fator de maior importância a ser considerado nas camadas de coberturas de aterros é a permeabilidade do material, visto que quanto menor a permeabilidade, menor a possibilidade de contaminação do aquífero pelos subprodutos, especialmente gases e lixiviados. Outro parâmetro importante a ser considerado nas camadas de aterros é a resistência ao cisalhamento, devido às mudanças de temperatura e do peso dos resíduos, bem como das flutuações nas poropressões de gases e percolado, que podem elevar o potencial de ruptura ou deslizamento.

Além de conhecer as propriedades do lodo, a caracterização dos solos é indispensável ao pesquisador que deseja aprofundar-se sobre sistemas de coberturas de aterros sanitários. Uma das formas de caracterizar os solos para fins geotécnicos é através da classificação de Casagrande, a qual evoluiu para a Classificação Unificada, que leva em consideração tanto a granulometria dos solos como a sua plasticidade (Prim, 2011).

Para tal classificação são necessários, no mínimo, o levantamento da curva granulométrica, do limite de liquidez e do índice de plasticidade. A plasticidade se

refere a capacidade de moldagem do solo. De acordo com esta capacidade, os solos são classificados como sendo plásticos ou não-plásticos. Solos que contêm argila (grãos de tamanho inferior a 0,002 mm) em sua composição geralmente são considerados como plásticos, sendo comum associar a plasticidade de solos ao teor de argilominerais (Prim, 2011).

Conforme Prim (2011), solos argilosos, normalmente, apresentam baixas permeabilidades. Por este motivo são frequentemente usados como barreiras naturais em locais de disposição de resíduos, para limitar o escape de contaminantes para os lençóis de água e para o solo. Para melhor compreender sua função na impermeabilização dos aterros sanitários, é fundamental conhecer algumas características físicas e físico-químicas dos solos, tais como: massa específica, granulometria, forma dos grãos, plasticidade, teor de umidade, teor de umidade ótima, peso específico aparente seco máximo, entre outros parâmetros geotécnicos importantes.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO, DO LODO DE ETA E DAS MISTURAS

3.5.1 Caracterização Ambiental

O Brasil se assemelha aos Estados Unidos no que diz respeito ao enquadramento legal das ETAs para abastecimento. Em ambos os países elas são consideradas como indústrias, portanto, seus resíduos gerados devem ter tratamento e disposição adequados (Cordeiro, 1999; Saraiva Soares *et al.*, 2009).

De acordo com a norma técnica NBR 10.004:2004 – Resíduos Sólidos – Classificação (ABNT, 2004), resíduos sólidos são todos os resíduos em estado sólido ou semissólido, resultantes da atividade industrial, doméstica, hospitalar, comercial, de serviços ou agrícolas. Incluem-se dentro desta definição os lodos provenientes das ETAs e ETEs, resíduos gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição e líquidos e que não podem ser dispostos na rede pública de esgoto.

Nas pesquisas sobre caracterização e classificação do lodo de ETA, Boscov (2008) enquadra o lodo de ETA como classe II-A, ou seja, um resíduo não inerte, o que determina a sua disposição final em aterro sanitário. Conforme Portella *et al.* (2003), o lodo de ETA deve ser gerenciado como resíduo sólido e não deve ser lançado em corpos de água sem tratamento prévio, bem como deve estar em

consonância com os preceitos da Lei 12.305/2010 (artigo 3º, inciso XVI) (BRASIL, 2010) e norma NBR 10.004:2004 (ABNT, 2004).

3.5.2 Caracterização Mineralógica e Físico-Química

As principais técnicas utilizadas para caracterização mineralógica são a Difractometria de Raio-X (DRX), a Fluorescência de Raio-X (FRX) e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), sendo o MEV um dos mais versáteis instrumentos para se obter informações sobre a morfologia dos minerais. Quando possuem detectores que captam raios-X por dispersão de energia são chamados de MEV-EDS e fornecem dados sobre os elementos químicos que compõe a amostra. O MEV produz imagens tridimensional com alta resolução na observação de amostras (Silva, 2021).

No levantamento de dados para sua pesquisa, Silva (2021) cita que os principais componentes químicos encontrados em lodos de ETAs é o alumínio, ferro e silício, que são os elementos mais abundantes da crosta terrestre, além do alumínio e ferro serem comumente utilizados como coagulante nas formas óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e dióxido de silício (SiO_2).

O resíduo sólido dos processos de tratamento de água nas estações é usualmente composto por algas, bactérias, vírus, coloides, areia, silte, argila, material orgânico, microrganismos, cálcio, magnésio, ferro, manganês, além de hidróxidos de alumínio e polímeros. É uma substância gelatinosa e resistente ao adensamento durante o processo de tratamento (CETESB, 2009).

A composição química do lodo de tratamento de água pode ser bastante variável de acordo com o tipo de processo empregado para potabilização, conforme a qualidade da água bruta ou ainda conforme a época do ano. Portella *et al.* (2003) e Santos *et al.* (2000) *apud* Guerra (2005) estudaram a constituição química de amostras do lodo produzido por ETAs localizadas nos Estados do Paraná e Rio Grande do Sul. Os resultados obtidos pelos autores estão apresentados na TABELA 1 e pode-se verificar uma grande diferença entre suas composições.

TABELA 1 - Elementos constituintes do lodo centrifugado da ETA de Passaúna, Curitiba, PR e da ETA do Município de São Leopoldo, RS

Elementos	ETA - Passaúna (%)	ETA - São Leopoldo (%)
SiO ₂	14,1	34,8
Al ₂ O ₃	23,62	22,3
TiO ₂	0,35	0,94
Fe ₂ O ₃	8,39	6,6
MgO	0,15	0,69
CaO	0,33	0,4
Na ₂ O	<0,02	0,23
K ₂ O	0,11	0,57
P ₂ O ₅	0,34	--

Fonte: Portella *et al.* (2003); Santos *et al.* (2000) *apud* Guerra (2005).

As características físico-químicas e o teor de matéria orgânica do lodo dependem do manancial no qual a água é coletada e do tratamento aplicado, podendo apresentar grande variabilidade em seus componentes e percentuais encontrados, conforme pode ser visualizado na TABELA 2 e na TABELA 3.

TABELA 2 - Características mineralógicas do lodo de ETA encontrados na literatura

Autor	Componentes (%)							
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
(SILVA, E. L. G.; MACIEL, A. P., 2019)	52,19	21,09	17,70	0,45	2,03	0,31	4,08	0,78
(SANTOS, F. P., 2016)	17,80	11,10	16,50	-	0,60	0,44	0,73	0,34
(MONTALVAN, E. L. T., 2016)	18,30	46,00	8,89	0,24	0,42	1,59	1,00	0,25
(SANTOS, G. Z. B.; MELO FILHO, J. A.; MANZATO, L., 2018)	40,44	11,30	42,19	-	1,29	0,58	2,22	0,66
(FERNANDEZ, L. P., <i>et al.</i> , 2018)	18,56	0,62	33,98	3,60	0,12	0,63	-	-
(PETTERLE, L., <i>et al.</i> , 2018)	36,11	11,58	32,31	-	1,02	0,42	0,55	0,35
(LAURINDO, S. S., <i>et al.</i> , 2020)	31,76	9,65	24,97	1,49	0,39	0,64	1,35	-
(RUVIARO, A. S., <i>et al.</i> , 2020)	66,93	11,01	17,90	0,26	1,10	0,74	1,35	0,36
(ALEXANDRE, E.; LUZ, C. A., 2020)	24,20	19,30	25,80	0,30	2,90	0,60	0,20	0,40

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2020.

TABELA 3 - Teor de matéria orgânica do lodo de ETA encontrados na literatura

Autor	Matéria orgânica (%)
(TEIXEIRA, S. R. <i>et al</i> , 2006)	3,20
(OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F., 2010)	0,95
(BOTERO, W. G. <i>et al.</i> , 2009)	20,50
	32,50
	68,90
(RODRIGUES, F. N.; AMÂNCIO, D. V., 2018)	12,97
(LUDUVICE, M., 1996)	30-40
(SANTOS, F. P., 2016)	26,00

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2020.

De modo geral os lodos dos decantadores apresentam elevada concentração de microrganismos, matéria orgânica, metais, hidróxidos de alumínio (Al) e ferro (Fe). Já a água de lavagem dos filtros apresenta carbono orgânico total, substâncias húmicas coloidais e precipitadas, sólidos suspensos, partículas de argila e silte, metais e compostos que dão sabor e odor à água ou subprodutos da desinfecção (USEPA, 2011; Gonçalves *et al.*, 1999).

De acordo com Hsieh e Raghu (1997), elevados valores de pH em lodo de ETAs (pH>7) favorecem a imobilização de metais e inibem a biodegradação da matéria orgânica; valores muito abaixo de 5 podem favorecer a lixiviação de metais; e pH próximo ao neutro a biodegradação é favorecida e a solubilização de componentes pode ser minimizada.

3.5.3 Caracterização Geotécnica

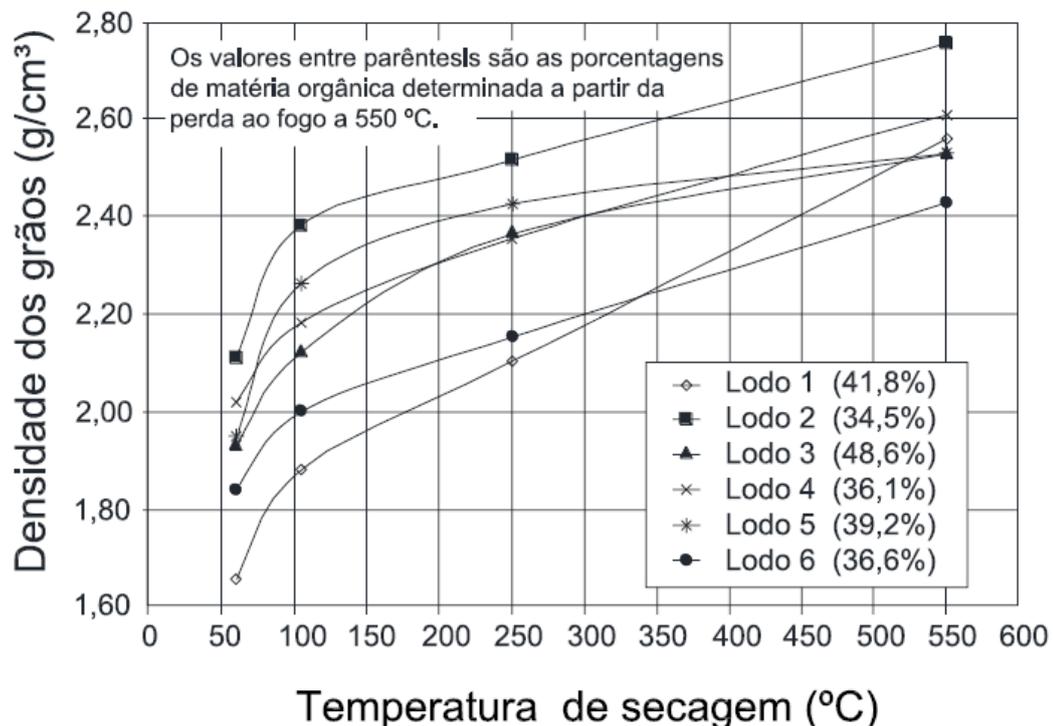
A caracterização e classificação geotécnica compreende o teor de umidade natural (ABNT, 2016a), Limite de Liquidez (ABNT, 2016b), Limite de Plasticidade (ABNT, 2016c), Densidade real dos grãos (DNER, 1994) e Análise granulométrica (ABNT, 2016d).

Conforme Montalvan (2016), a massa específica de um solo depende de sua composição mineralógica. A maioria dos minerais que constituem os solos possuem entre 2,55 e 2,75 g/cm³. No caso dos lodos de ETA, que geralmente possui granulometria fina em suas partículas seria comum pensar que sua massa específica seria parecida com aquela dos argilominerais, que possui em média 2,77 g/cm³ (Montalvan, 2016).

De acordo com as pesquisas de Montalvan (2016) a presença de matéria orgânica e os produtos químicos adicionados no tratamento alteram a massa específica dos grãos dos lodos. Neste caso, um elevado teor de matéria orgânica diminui a massa específica enquanto a presença de metais (quando presente no coagulante) o incrementará.

Basim (1999) analisou o efeito da temperatura de secagem na variação da massa específica do lodo de diferentes ETAs. A FIGURA 4 mostra que a massa específica dos grãos aumenta conforme a temperatura utilizada na secagem for maior. Ainda conforme este autor, a matéria orgânica é responsável pelos baixos valores de massa específica e também é responsável pelo seu aumento quando oxida à temperaturas maiores de secagem. Por exemplo, na amostra do Lodo 2 com 34,5% de matéria orgânica a massa específica era de 2,11 g/cm³. Quando a mesma amostra passou pela secagem a 550°C a massa específica passou para 2,75 g/cm³, ou seja, um aumento de 30,3% devido à temperatura de secagem.

FIGURA 4 – Variação da massa específica dos grãos com a temperatura de secagem do lodo



Fonte: Basim (1999).

Basim (1999) determinou os limites de Atterberg dos lodos de ETAs *in natura* (úmido para seco) e com secagem prévia (seco para úmido). No estado *in natura* do lodo, o autor encontrou todas as amostras de lodo plástico, com LL entre 280 e 425%

e IP entre 82 e 225%. Porém, a amostra de lodo seca perde afinidade com a água, sofrendo redução drástica na plasticidade, tornando-se não-plástica.

A distribuição granulométrica dos lodos de ETA depende de uma série de fatores, como a estação climática no momento da coleta da amostra, a umidade e o tipo de coagulante utilizado. A secagem do lodo pode gerar a cimentação das partículas devido aos metais existentes nos coagulantes, com isso o material tende a ficar mais granular e aspecto mais arenoso (Montalvan, 2016).

3.5.4 Comportamento Geotécnico

3.5.4.1 Compactação

Conforme Montalvan (2016) o ensaio de compactação trata-se da aplicação de uma energia mecânica ao solo, buscando diminuir seu volume de vazios e incrementar o peso específico aparente seco do material. Com a variação do teor de umidade do material é possível determinar os parâmetros para sua compactação em determinada energia, o peso específico aparente seco máximo e o teor de umidade ótima. Este ensaio pode ser realizado com ou sem a secagem prévia do material, dependendo da especificação normativa seguida.

Quando este ensaio é realizado seguindo a NBR 6457 (ABNT, 2016a) os solos são secos até a umidade higroscópica e é adicionado água progressivamente para compactação de cada um dos pontos. A curva do peso específico aparente seco (γ_d) em função do teor de umidade (ω) é aproximadamente parabólica com a concavidade voltada para baixo, cujo ponto mais alto da curva fornece os parâmetros de compactação ótimos.

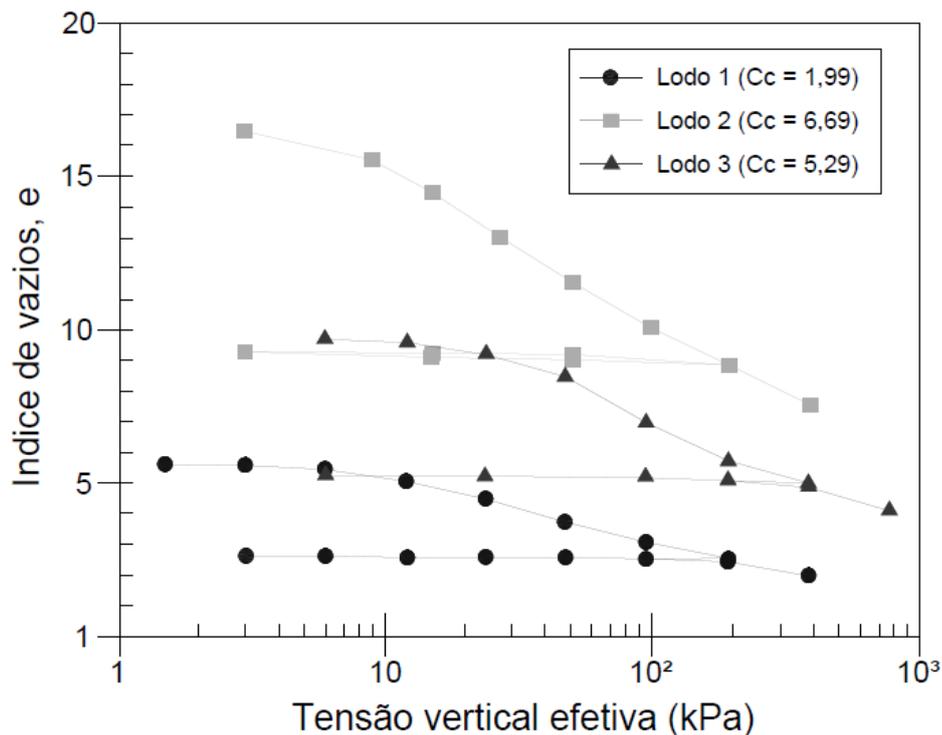
Para os lodos de ETA não há uma norma específica que defina a metodologia para ensaios, porém é comum que autores utilizem os mesmos procedimentos preconizados para solos (Cornwell *et al.*, 2000; Hsieh e Raghu, 1997; Basim, 1999; Silva, 2021; Araújo, 2017; Montalvan, 2016).

3.5.4.2 Deformabilidade ou Compressibilidade

Wang *et al.* (1992) estudaram a compressibilidade de três amostras de lodo de ETA por meio de ensaio de adensamento edométrico, conforme visualizado na

FIGURA 5, que apresenta a variação dos índices de vazios de diferentes amostras segundo acréscimos de tensão vertical. Os resultados encontrados por ele foram índices de compressão dos lodos muito superiores (entre 1,99 e 6,69) do que a montmorilonita, que é o argilomineral mais compressível, cujos índices variam de 1,0 a 2,6. Ou seja, o lodo de ETA se apresentou muito mais compressível do que as argilas naturais.

FIGURA 5 – Curva de adensamento de diferentes lodos de ETA



Fonte: Wang *et al.* (1992)

3.5.4.3 Permeabilidade

De acordo com Gonçalves *et al.* (2017) permeabilidade é a propriedade do solo que mede a facilidade de percolação de água através dos vazios do solo. O ensaio dos autores foi realizado em solos compactados, cuja característica básica é o baixo índice de vazios (relação entre volume de vazios e volume de sólidos) e para tanto utilizaram-se de um permeâmetro de carga variável, instrumento mais recomendado para este tipo de ensaio em solos de baixa permeabilidade. Assim, os corpos de prova do ensaio de permeabilidade puderam ser montados na condição de máxima eficiência da compactação, ou seja, no teor de umidade ótima ($w_{ótima}$) e no

peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$), obtidos através da curva de compactação.

Os valores dos coeficientes de permeabilidade (k) obtidos nos ensaios de laboratório pelos autores, realizados para o solo, lodo e misturas solo-lodo resultaram em condutividades hidráulicas na faixa de 10^{-10} a 10^{-9} m/s, mostrando uma variação de até dez vezes. Ressalta-se ainda que tais valores enquadram-se nos valores referência para materiais de baixa permeabilidade, indicados para uso em obras de aterro sanitário (Bosco, 2008).

Hsieh e Raghu (1997) calcularam os coeficientes de permeabilidade (k) de dois lodos a partir dos resultados de ensaios de adensamento unidimensionais. Os resultados apontaram para material pouco permeável, com coeficientes entre $10^{-8} \leq k \leq 10^{-9}$ m/s.

3.6 APROVEITAMENTO DE LODO DE ETAs NO BRASIL

Novas alternativas para aproveitamento de lodo de ETAs estão sendo estudadas e testadas, no qual o resíduo torna-se um produto útil para a sociedade, sendo através da incorporação em materiais construtivos, ou seja, em técnicas de recuperação de insumos presentes no lodo.

No QUADRO 3 é apresentada compilação de estudos sobre o reuso do lodo de ETAs no Brasil. Estão descritas as vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas de disposição do lodo estudadas com seus respectivos autores.

QUADRO 3 – Compilação de estudos sobre o reuso do lodo de ETA no Brasil

(continua)

LOCAL	TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DO LODO		FONTE
	VANTAGENS	DESVANTAGENS	
REVESTIMENTO RODOVIÁRIO			
Ponta Grossa, PR	Foi comprovada a possibilidade de uso do lodo para aplicação em revestimento rodoviário.	A adição do lodo como parte do solo reduz a qualidade do mesmo, sendo necessário adicionar mais cimento para o desempenho ideal, encarecendo o material solo cimento.	FADANELLI e WIECHETECK (2010)

QUADRO 3 – Compilação de estudos sobre o reuso do lodo de ETA no Brasil

(continuação)

LOCAL	TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DO LODO		FONTE
	VANTAGENS	DESVANTAGENS	
INCORPORAÇÃO EM CERÂMICA VERMELHA			
Ouro Preto, MG	Possibilidade de uso do lodo de ETA em cerâmica vermelha para adições de até 10% de lodo à argila.	Partículas de lodo favorecem a fratura do corpo causando diminuição dos valores de Tensão de Ruptura à Flexão dos corpos de prova.	PAIXÃO (2005)
Presidente Prudente, SP	O lodo pode ser utilizado no material de fabricação da cerâmica.	Variações nas características do lodo influenciam diretamente na qualidade do material produzido, principalmente na resistência, plasticidade e absorção de água.	TEIXEIRA <i>et al.</i> (2006)
INCORPORAÇÃO EM MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL			
Campos dos Goytacazes, RJ	O lodo de ETA pode ser incorporado no processo, pois sua composição é semelhante à mineralogia das argilas utilizadas na fabricação da cerâmica.	A incorporação do lodo em até 10% com argila aumenta a absorção de água e diminui a resistência mecânica após a fase de queima da argila.	MARGEM (2008)
Rio de Janeiro, RJ	Reaproveitado como matéria-prima na indústria cerâmica, na proporção máxima de 10% de lodo.	Houve alteração nas propriedades físicas e tecnológicas do material levando a uma redução na qualidade das peças obtidas.	COUTO (2011)
São Paulo, SP	Produzir tijolos com porcentagens admissíveis de lodo incluído à massa nas condições de umidade reais de saída da centrífuga mostrou-se viável.	A adição de quantidades superiores a 8% alterou negativamente as propriedades físico-mecânicas nas peças cerâmicas.	TARTARI <i>et al.</i> (2011)
Rio de Janeiro, RJ	Apresentou potencial para incorporar o lodo em massas argilosas na fabricação de cerâmica.	Uso moderado, pois, eleva o valor de limite plástico.	PINHEIRO <i>et al.</i> (2014)
INCORPORAÇÃO EM MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL			
São Carlos, SP	O uso de lodo de ETA como agregado miúdo em concretos para recomposição de calçada é viável e possui potencial para utilização em concreto para fins mais nobres.	Quantidade de lodo até 10% e com espessura de camada para calçadas de aproximadamente 5 cm.	COSTA (2011)
Salvador, BA	Potencial uso de lodo de ETA como matéria prima para confecção de blocos.	Não identificado pontos negativos.	SANTOS (2011)

QUADRO 3 – Compilação de estudos sobre o reuso do lodo de ETA no Brasil

(conclusão)

LOCAL	TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DO LODO		FONTE
	VANTAGENS	DESVANTAGENS	
INCORPORAÇÃO EM MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL			
São Paulo, SP	Fabricação de tijolos ecológicos utilizando cinzas de carvão de usinas termelétricas e de lodo de ETA atenderam aos requisitos de compressão e absorção de água.	As partículas do lodo de ETA apresentaram-se frágeis e com baixa interação química entre si.	SILVA (2011)
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS			
São Paulo, SP	Alternativa para substituição parcial de solo na fabricação de tijolo solo-cimento.	A incorporação de lodo de ETA na mistura solo-cimento tende a aumentar o teor de partículas finas, matéria orgânica e plasticidade da mistura solo-cimento, interferindo na hidratação do cimento.	RODRIGUES e HOLANDA (2013)
Brasília, DF	O lodo de ETA eleva os teores de macronutrientes e o valor de pH do solo de áreas degradadas.	Pode causar salinidade do solo se aplicado em grande quantidade. Sua aplicação deve estar sempre associada a um resíduo.	TEIXEIRA <i>et al.</i> (2005)
Brasília, DF	O lodo de ETA mostra-se promissor ao se avaliar os teores de fósforo e de matéria orgânica.	Não identificado pontos negativos.	MOREIRA <i>et al.</i> (2007)
Brasília, DF	O lodo de ETA mostrou-se compatível para recuperação de solos em regiões com características geológicas e hidroquímicas semelhantes.	A lixiviação do LETA contribuiu com o aumento da concentração de sólidos dissolvidos para o lençol freático. Porém, após 10 anos de disposição de LETA, o impacto ambiental nas águas subterrâneas pode ser considerado pequeno, pois não houve sequer alteração da fácies da água subterrânea.	MOREIRA <i>et al.</i> (2009)
REUTILIZAÇÃO DO SULFATO DE ALUMÍNIO			
Vitória, ES	Para as populações de 20.000 e 50.000 habitantes, a regeneração de coagulantes e sua reutilização na própria ETA ou em ETE mostrou-se economicamente viável.	Para ETAs de grande porte os processos de regeneração em reatores em batelada possivelmente não serão econômicos, devendo ser avaliada a utilização de reatores em regime contínuo.	GONÇALVES <i>et al.</i> (1999)

Fonte: A autora (2021).

Mesmo com o reaproveitamento de lodo acima mencionadas, haverá uma quantidade de lodo residual para disposição final, com características de composição e comportamento dependentes dos processos geradores. Este material, que não retorna ao ciclo de tratamento, pode ser transportado até aterros sanitários, onde é

disposto como rejeito. Pensar o lodo de ETA como material passível de aproveitamento em aplicações de engenharia consiste em encaminhamento ambientalmente desejável, pois além de aliviar a carga de deposição em aterros sanitários, pode compor misturas com características adequadas para diferentes aplicações.

Estudos geotécnicos para utilização de lodos de ETA em misturas com solos têm se apresentado mais frequente na literatura geotécnica, principalmente nas aplicações onde se deseja aprimorar o comportamento impermeabilizante de solos locais.

A importância atual do desenvolvimento de pesquisas para o uso/ destinação dos lodos de ETA é denotada pelo destaque nacional que o tema alçou em 2021, com o primeiro evento destinado exclusivamente para este tópico: o “1º Encontro Nacional de Lodo de Estação de Tratamento de Água”, ocorrido de forma online. No referido evento, Scapin (2021) apresentaram a caracterização de misturas de solo com lodo de ETA empregando ensaios de caracterização geotécnica como granulometria, limites de Atterberg, compactação e condutividade hidráulica, denotando a importância da campanha de ensaios para obtenção do comportamento geotécnico de misturas de lodo com o solo regional. Silva e Hemsli (2021) apresentaram estudos de aplicação de misturas de lodo-cal para aplicação em coberturas diárias em aterros sanitários, e na mesma linha de aplicação, Marchiori *et al.* (2021) avaliaram o potencial de uso de resíduo de ETA como impermeabilizante em obras de terra.

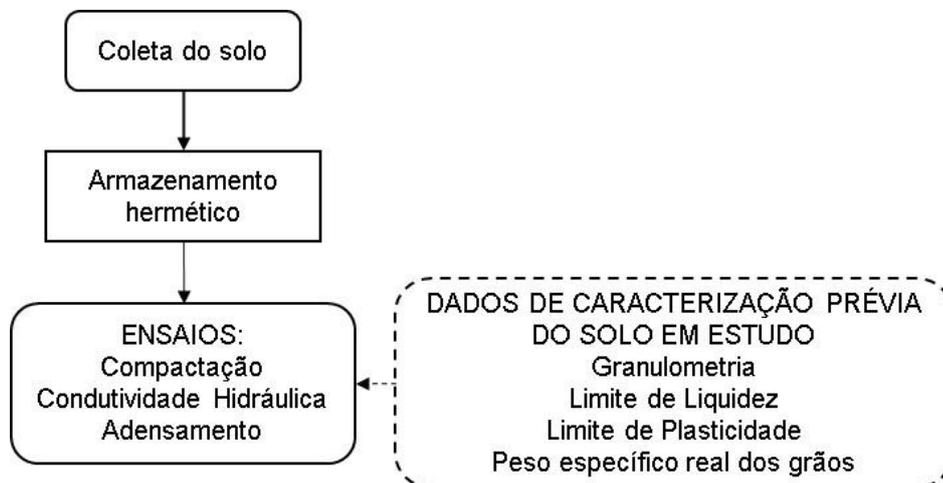
A exploração do potencial de uso do lodo de ETA como material de baixa permeabilidade em barreiras impermeáveis se configura como linha de pesquisa promissora para destinação ambientalmente adequada a este rejeito. Não obstante, o emprego do lodo associado ao solo, através de misturas em diferentes dosagens, torna ambientalmente ideal a destinação como material de fundo/cobertura em aterros sanitários, pois além de diminuir o volume de resíduo lançado nos aterros, contribui para a diminuição da exploração de recursos naturais como o solo de jazidas, pois o lodo entra na mistura em substituição à uma fração do material granular, podendo conferir a ele, ainda, melhores características hidráulicas e mecânicas para a aplicação. Ainda, associar o uso do lodo a materiais granulares artificialmente cimentados se destaca como linha promissora, considerando o amplo leque de aplicações das técnicas de estabilização de solos em geotecnia ambiental e convencional.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta informações gerais sobre o solo, do lodo de ETA, suas características e os métodos utilizados para realização dos ensaios laboratoriais.

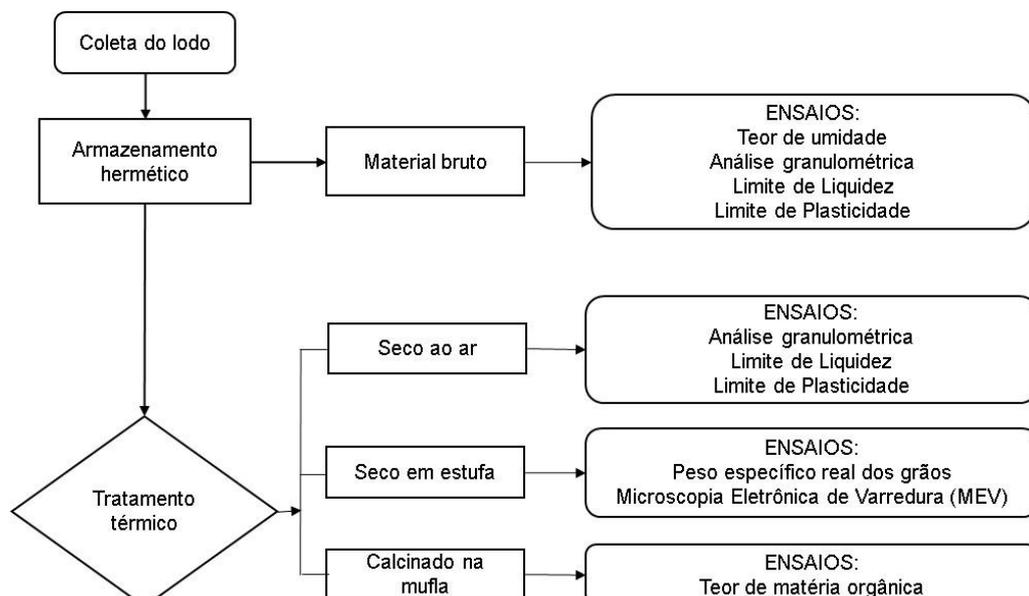
A pesquisa foi dividida em 3 estágios, conforme fluxogramas a seguir. Na primeira etapa foi realizada a caracterização do solo (FIGURA 6). Na segunda etapa a caracterização do lodo (FIGURA 7) e na terceira etapa foram realizados os ensaios com o solo, com o lodo e com as misturas nos percentuais em termos de massa seca de Solo 97,5% - Lodo (*in natura*) 2,5% e Solo 95% - Lodo (*in natura*) 5% (FIGURA 8).

FIGURA 6 – Fluxograma da pesquisa sobre o solo



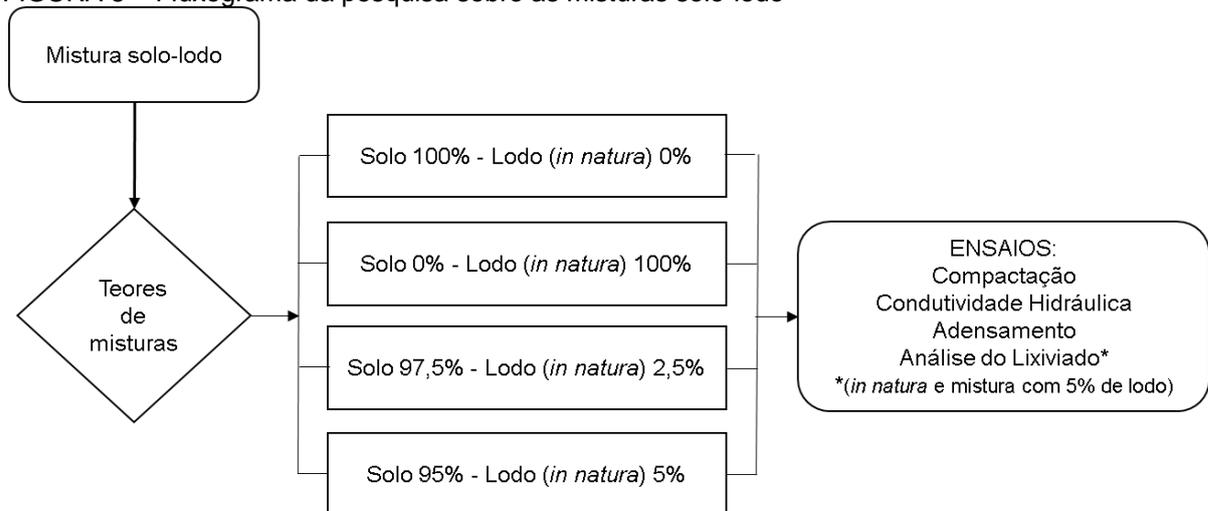
Fonte: A autora (2023).

FIGURA 7 – Fluxograma da pesquisa sobre o lodo



Fonte: A autora (2023).

FIGURA 8 – Fluxograma da pesquisa sobre as misturas solo-lodo



Fonte: A autora (2023).

4.1 COLETA DE AMOSTRAS DO SOLO E DO LODO

O solo coletado teve a finalidade de ser misturado ao lodo para composição de camada impermeabilizante de aterro, cujo comportamento foi analisado através de ensaios em laboratório. As amostras do solo estudado foram coletadas do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa, de predominância argilo-siltosa e com ocorrência típica na região dos Campos Gerais, cuja caracterização tem sido relatada em publicações recentes para diferentes aplicações geotécnicas (Anibele, 2020; Pereira; Vargas, 2019; Tonus *et al.*, 2022).

Os ensaios geotécnicos para caracterização do solo natural seguiram a orientação da NBR 6457: Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização (ABNT, 2016a). Conforme prescreve a norma, a amostra deve ser seca previamente ao ar, espalhando-se a amostra sobre uma superfície, para retirar o excesso de umidade. Após secagem, as amostras foram destorroadas e peneiradas conforme ensaio a executar.

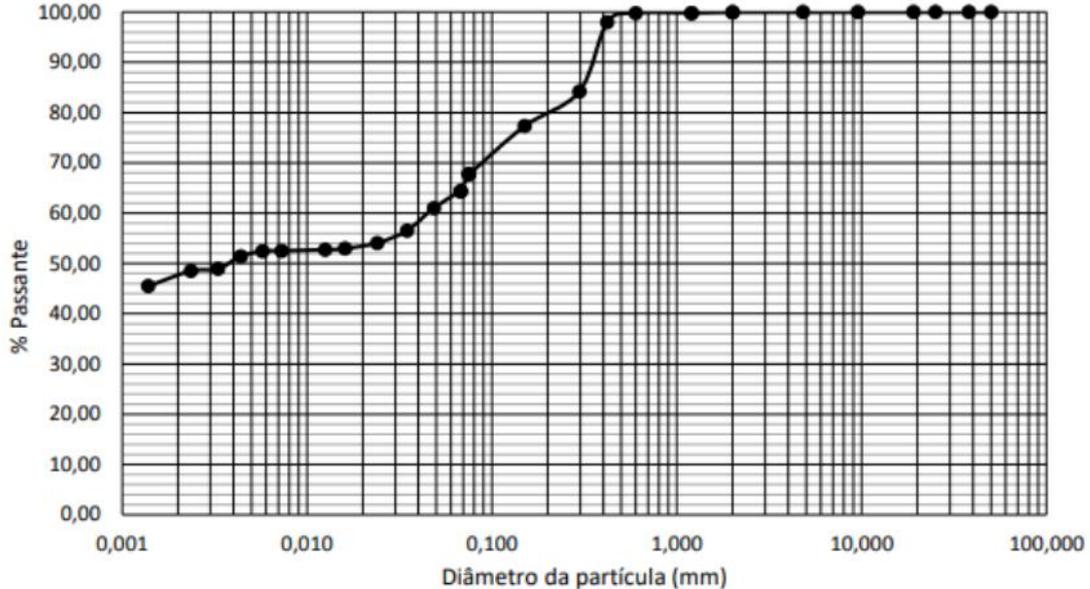
As informações sobre a Densidade real dos grãos, Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade foram obtidos por Anibele (2020) e estão descritos na TABELA 4 e na FIGURA 9, sendo o solo caracterizado como argilo-arenoso (SC).

TABELA 4 – Resultados dos ensaios de caracterização realizados no solo

Ensaio	Densidade real dos grãos	LL	LP	IP
Solo	2,669	37	-	NP

Fonte: Anibele (2020).

FIGURA 9 – Curva granulométrica do solo argilo-arenoso



Fonte: Anibele (2020).

O peso específico real dos grãos deste solo foi ensaiado em amostras de diferentes profundidades, segundo a DNER-ME 093 (DNER, 1994), apresentando valores na faixa de 2,63 a 2,85 g/cm³. As características de consistência, obtidas através dos ensaios definidos pelas NBR 6459 (ABNT, 2004) e NBR 7180 (ABNT, 2004), indicaram que o limite de liquidez do solo está na faixa entre 31% a 43%, sendo caracterizado como um solo não plástico por não apresentar índice de plasticidade (Anibele, 2020).

A Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) é a empresa responsável pela captação, tratamento e abastecimento de água, coleta e tratamento de esgotos, assim como, o destino dos sólidos gerados nas ETAs e ETEs em diversas cidades do Paraná, entre elas da ETA cujo lodo foi utilizado (FIGURA 10).

FIGURA 10 – Lodo da ETA de Iraí, Pinhais – PR



Fonte: A autora (2023).

Neste estudo utilizou-se o lodo centrifugado proveniente da ETA Iraí, localizada no município de Pinhais, Paraná. A referida estação é responsável pelo abastecimento de mais de 1 milhão de habitantes de Curitiba e região metropolitana (Oliveira, 2010). Nesta ETA, a água bruta passa pelo tratamento completo por flotação (coagulação, floculação, flotação, filtração, desinfecção, correção de pH e cloração), no qual os decantadores foram substituídos pela floto-filtração.

A flotação consiste na separação de fases sólido-líquido, obtida pelo movimento ascendente de partículas, flocos ou outros agregados presentes no líquido, em que as forças de empuxo predominam sobre as gravitacionais, seja por diferença de densidades ou por introdução de microbolhas de ar que se aderem às partículas, aumentando mais o empuxo sobre as mesmas, arrastando-as no sentido ascensional em direção à superfície. A flotofiltração é processo físico de separação baseado no processo de flotação por ar dissolvido, onde a água saturada com ar é misturada à água floculada numa câmara de expansão que antecede os flotofiltros (flotação na camada superior dos filtros).

O lodo é retirado da superfície com auxílio de raspadores e passa por processo de centrifugação para desidratação. Desta forma o lodo utilizado na pesquisa se apresentava em estado pastoso com teor de sólidos médio de 22,58%.

A coleta e armazenamento do lodo foi realizada em recipientes apropriados e mantidos em ambiente controlado até a realização dos ensaios em laboratório (FIGURA 11).

FIGURA 11 – Coleta do lodo na ETA de Iraí, Pinhais – PR e armazenamento hermético



Fonte: A autora (2023).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E LODO

Foi utilizado nesta pesquisa amostra de solo residual maduro do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG – UEPG), que consiste de uma argila areno-siltosa, de comportamento laterítico, típico de regiões tropicais, cujos resultados dos ensaios de caracterização foram retirados do trabalho de Anibeles (2020).

O lodo coletado passou por caracterização físico-química, bem como geotécnica, visando sua aplicação em associação ao solo, porém em substituição à matéria seca e não apenas ao líquido da mistura. Para a caracterização geotécnica foram realizados ensaios de teor de umidade (NBR 6457/2016), análise granulométrica (NBR 7181/2016), peso específico real (DNER-ME 093/1994), limites de Atterberg (limites de liquidez e plasticidade) (NBR 6459/2016 e 7180/2016) e teor de matéria orgânica (NBR 13600/2022). Para determinar o teor de umidade e o peso específico real dos grãos, foram realizadas secagens do lodo em estufa à $60 \pm 5^\circ\text{C}$ e à $105 \pm 5^\circ\text{C}$, visando a observação das variações desses parâmetros, considerando a possível presença e influência da matéria orgânica nesta obtenção. Os ensaios de limites de Atterberg foram realizados para amostras de lodo secas ao ar destorroadas, secas em estufa à $60 \pm 5^\circ\text{C}$

destorroadas e o lodo *in natura*. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas, da UEPG.

A análise granulométrica do lodo foi realizada a partir do Analisador de Tamanho de Partículas do modelo Bettersizer 2600 da marca Bettersize, utilizando duas amostras: lodo *in natura* e lodo seco. Para a caracterização química, realizou-se o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com três amostras de lodo destorroado e secos em estufa à $60 \pm 5^\circ\text{C}$, para aquisição de imagens e análises químicas pontuais através de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS). Este ensaio foi realizado no Laboratório C-LABMU, Complexo de Laboratórios Multiusuários da UEPG.

Após a caracterização do solo e lodo individualmente, foram caracterizadas amostras em duas diferentes proporções de mistura de solo e lodo: Solo 97,5% - Lodo (*in natura*) 2,5% e Solo 95% - Lodo (*in natura*) 5%. As proporções de mistura foram definidas para analisar o comportamento do solo com a incorporação de menores quantidades de lodo, visto que na literatura há trabalhos semelhantes, porém com utilização de proporção que varia de 15 a 100% de incorporação de lodo ao solo, como estudado por Montalvan (2016), Silva (2021), Gonçalves *et al.* (2017). Dessa forma buscou-se verificar a influência dos teores de adição de lodo no comportamento geotécnico das misturas, através de ensaios de compactação, de condutividade hidráulica e de adensamento para as duas porcentagens de mistura de solo-lodo bem como amostras somente do lodo. O objetivo desta fase foi comparar as características das misturas solo-lodo com as características indicadas para solos de cobertura de aterros sanitários.

4.3 ENSAIOS

4.3.1 Ensaio de Compactação

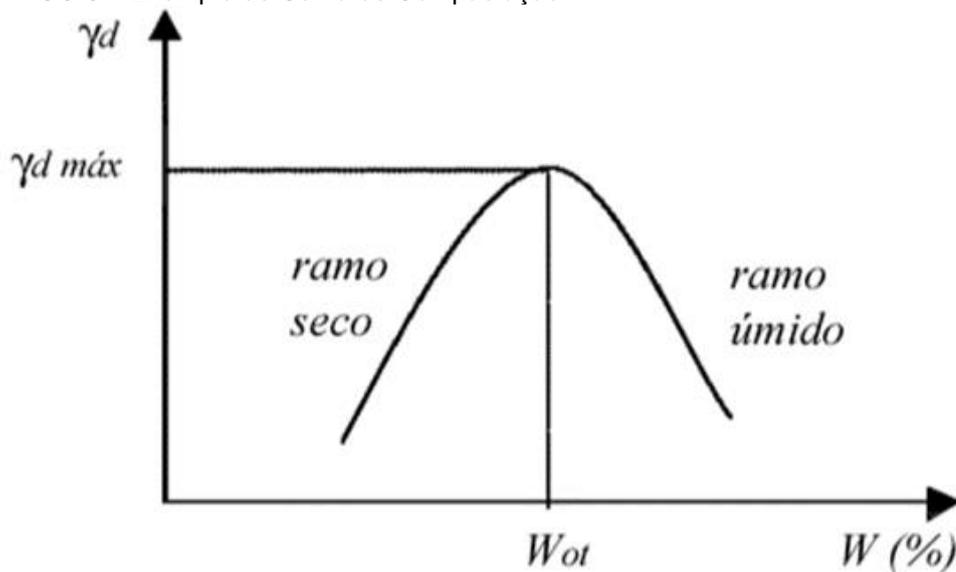
O ensaio de compactação (ABNT, 2016e) foi realizado com o solo natural e com as duas misturas de solo-lodo. O ensaio foi realizado em cilindro Proctor, com energia normal e com reuso de solo após cada corpo de prova. Foram realizados cinco pontos em cada ensaio para a obtenção da curva de compactação (ABNT, 2016e) e a partir delas foi escolhido o teor de mistura mais adequado para condução dos demais ensaios.

A compactação realizada com base no Ensaio normal de Proctor consiste em compactar uma amostra de material utilizando um cilindro de volume de aproximadamente 1000 cm³, aplicando-se 26 golpes em 3 camadas sucessivas, com um soquete de 2,5 kg em queda livre a 30,5 cm de altura.

O ensaio foi realizado com pelo menos cinco diferentes teores de umidade do solo e de cada uma das misturas solo-lodo, determinando-se, para cada teor o peso específico aparente seco. Após compactados, os corpos de prova foram extraídos do cilindro de Proctor e os teores de umidade verificados. Com os valores obtidos para a curva de compactação foi possível traçar o gráfico “Peso específico aparente seco x Teor de umidade”, obtendo-se o ponto de umidade ótima ($\omega_{\text{ótima}}$) e o peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d\text{máx}}$) para o solo e para as misturas.

Com estes resultados, foi possível traçar as curvas de compactação do solo e de cada uma das misturas solo-lodo. Os resultados foram demonstrados semelhantemente ao GRÁFICO 6, cujo objetivo principal foi a definição dos valores de umidade ótima, cuja região de ocorrência no gráfico serviu como referência para o estabelecimento das combinações de peso específico aparente seco e teores de umidade adotados para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos e hidráulicos.

GRÁFICO 6 – Exemplo de Curva de Compactação



Fonte: Trindade *et al* (2003).

4.3.2 Ensaio de Condutividade Hidráulica

A determinação do coeficiente de condutividade hidráulica do solo e das misturas solo-lodo foi realizada conforme a NBR 14545 (ABNT, 2001), no Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas da Universidade Estadual de Ponta Grossa. Este ensaio se baseia na lei de Darcy, pressupondo a existência de proporcionalidade direta entre as velocidades de fluxo e os gradientes hidráulicos. Considera-se, ainda, um escoamento contínuo, sem variação no volume do solo e com a saturação total do corpo de prova, sendo possível obter o coeficiente de condutividade hidráulica do solo e solo-lodo.

O ensaio de condutividade hidráulica foi realizado em permeâmetro de parede rígida com carga variável (ABNT, 2020) em amostras dos materiais (solo e misturas solo-lodo) compactados no corpo do permeâmetro, com umidade e peso específico aparente seco próximos a $\omega_{ótima}$ e $\gamma_{dmáx}$. Todos os ensaios de laboratório foram realizados com grau de compactação mínimo definido em 95% e desvio máximo do teor de umidade de $\pm 1\%$ em relação aos valores-objetivo para cada amostra.

Após a compactação, foram levantados seu volume e massa para verificação do atendimento aos parâmetros ótimos de compactação. Optou-se por fazer a compactação diretamente no permeâmetro para evitar que a água criasse caminhos preferenciais entre a corpo de prova e a lateral do permeâmetro, assim a água percolou apenas no sentido vertical e ascendente, até a saturação do corpo de prova. Após a saturação, foi realizada a medição de carga hidráulica, do tempo decorrido e da temperatura da água que percolou pelo corpo de prova, dados necessários para calcular o coeficiente de permeabilidade.

Foram realizados ensaios de condutividade hidráulica em 3 amostras, sendo 1 corpo de prova de solo natural e 1 corpo de prova para cada uma das misturas solo-lodo estudadas.

Após os ensaios de condutividade hidráulica, o lixiviado resultante destes ensaios foram analisados, tanto para o lodo puro quanto para mistura de solo com o maior teor de lodo, 5%. Foram analisados o pH, a turbidez, o teor de sólidos dissolvidos totais e a condutividade elétrica utilizando o Medidor multiparâmetro HQ 440D, marca HACH disponível no Laboratório de Recursos Hídricos da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

4.3.3 Ensaio de Adensamento

Um solo quando sofre um acréscimo de carga, como por exemplo, em um aterro ocorre uma alteração na sua estrutura, ou seja, há uma redução do índice de vazios presentes. Solos arenosos tem permeabilidade alta e quando sofrem um carregamento expulsam a água presente em seus vazios, modificando o arranjo dos grãos. Já um solo argiloso possui baixa permeabilidade, o que significa que a redução do volume dos vazios ocorre de forma mais demorada. O processo de transmissão de carga para os grãos do solo ao longo do tempo é chamado de adensamento.

O adensamento unidimensional é realizado em laboratório com o ensaio edométrico empregando a prensa de compressão edométrica com cisalhamento direto “MS 102 – Cisalhamento Automático”, onde o corpo de prova é confinado lateralmente por um anel metálico rígido, limitando desse modo as deformações e o fluxo à direção vertical. São aplicados estágios de carregamentos verticais ao corpo de prova de forma crescente, desde 0 até 200 kPa, após a estabilização dos deslocamentos medidos entre cada aplicação. Ao final do ensaio foram obtidos os valores referentes ao descarregamento gradual da amostra, visando verificar os parâmetros relativos à recompressão. O anel de adensamento é do tipo fixo, com dimensões de 5,05 cm de diâmetro e 2,00 cm de altura, formando uma área de 20,03 cm² e um volume de 40,06 cm³. O peso do anel corresponde a 45,32 g.

O ensaio de consolidação em prensa de adensamento (ABNT, 2020) foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas da Universidade Estadual de Ponta Grossa, na condição de compactação e umidade ótimas do solo e do solo-lodo. Foram realizados 4 ensaios, sendo 1 corpo de prova de cada uma das misturas solo-lodo dos 2 valores de peso específico aparente seco empregados no ensaio de condutividade hidráulica, 1 corpo de prova de solo e 1 corpo de prova de lodo. Com este ensaio puderam ser obtidos os coeficientes de adensamento do solo e do solo-lodo, bem como os coeficientes de compressão e recompressão característicos das misturas moldadas nas condições ótimas, através da análise da variação do índice de vazios da amostra versus o *log* dos acréscimos de tensão vertical na condição edométrica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o levantamento de dados sobre o solo utilizado na pesquisa, cujos resultados já citados foram obtidos por Anibele (2020), foi realizada a caracterização do lodo da ETA através do levantamento do teor de umidade, do peso específico real dos grãos, teor de matéria orgânica, análise granulométrica, limites de Atterberg e caracterização química.

A segunda etapa da pesquisa se concentrou na realização de ensaios de compactação, condutividade hidráulica, adensamento e análise do lixiviado, utilizando o solo, o lodo e duas frações diferentes da mistura solo-lodo (2,5% e 5%) e com teores de umidade variando de 17,62 a 46,71%.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO

Tendo a caracterização do solo a ser utilizado, seguiu-se para a caracterização do lodo da ETA de Iraí. Considerando-se que o lodo é um material composto de sólidos suspensos provenientes do tratamento da água bruta, espera-se que ele possua uma certa porcentagem de matéria orgânica. Por esse motivo foi realizada a secagem de amostras de lodo em estufa à $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ para comparação dos resultados, como observado na TABELA 5.

Em relação ao teor de umidade encontrou-se valores de 342,87% de umidade quando a amostra foi seca em estufa por 24 horas à $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$ e de 368,66% quando seca em estufa por 24 horas à $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ (TABELA 5).

TABELA 5 – Resultados de teor de umidade do lodo

Teor de umidade (h%)	Secagem à $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	Secagem à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
	342,87%	368,66%

Fonte: A autora (2023).

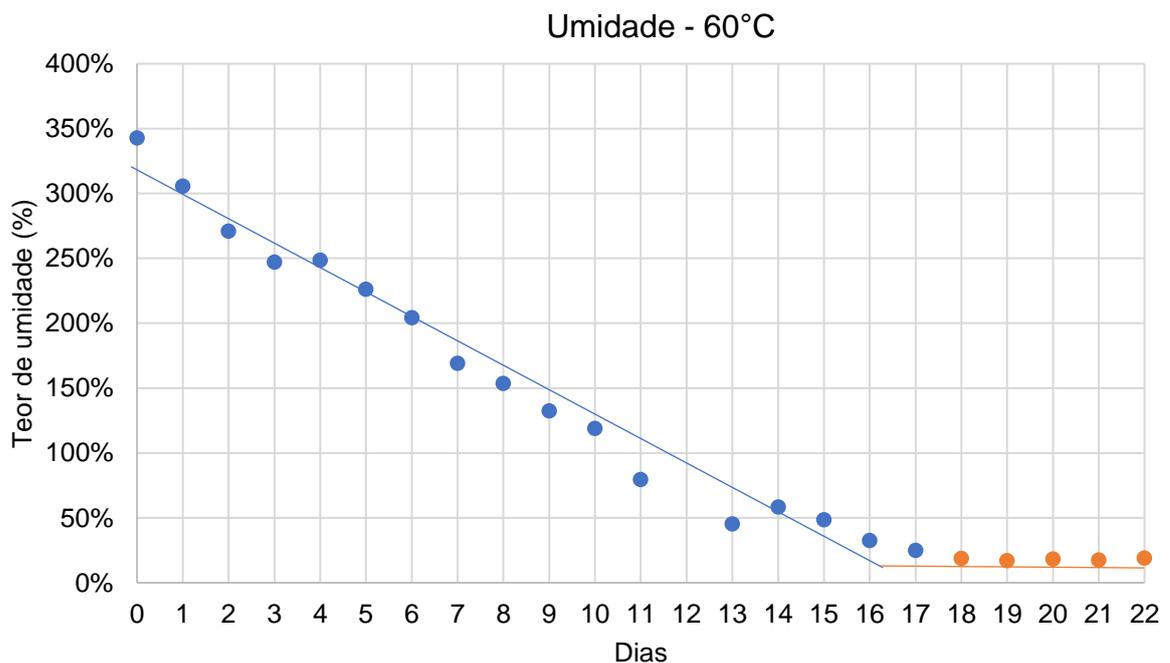
Como houve uma variação entre os teores de umidade entre as duas temperaturas de secagem, considera-se que há um teor de matéria orgânica sendo passível de ser volatilizada em maiores temperaturas. Como o objetivo do trabalho é utilizar o lodo natural, sem passar por processo de secagem, adotou-se como valor

de teor de umidade a porcentagem referente à secagem de $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, aplicável para solos com presença de matéria orgânica segundo a NBR 6457/2016.

Ainda em relação ao teor de umidade, considerando a dificuldade de estabilização das massas durante o processo de secagem, foi realizada a curva de umidade do lodo, como observado no GRÁFICO 7 .

Observa-se que o lodo apresentou duas fases distintas, onde a primeira foi o decaimento do teor de umidade até o dia 17 de secagem, aproximadamente, e a segunda fase corresponde à estabilidade do teor de umidade até o dia 22 de secagem, quando o ensaio foi encerrado. Isso indica uma alta capacidade do lodo de reter umidade e a dificuldade da extração da água intrínseca ao material, seja devido alta presença de matéria orgânica ou conferido ao coagulante utilizado, conforme levantado por Silva (2021).

GRÁFICO 7 – Curva de teor de umidade com secagem à 60°C



Fonte: A autora (2023).

Em relação ao peso específico real dos grãos de lodo, o ensaio também foi realizado considerando a secagem do lodo à $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Para as duas variações obtiveram-se os valores observados na TABELA 6.

TABELA 6 – Resultados do peso específico real dos grãos de lodo

Peso específico real dos grãos (γ_s)	Secagem à 60°C ± 5°C	Secagem à 105°C ± 5°C
		2,051 g/cm ³

Fonte: A autora (2023).

Os valores de peso específico real dos grãos encontrados foram de 2,051 g/cm³ para amostras secas em estufa à 60 ± 5°C e de 2,110 g/cm³ para amostras secas em estufa à 105 ± 5°C. Essa diferença entre umidades e os baixos valores de peso específico, quando comparados com solos, podem indicar a presença de uma maior quantidade de matéria orgânica, passíveis de volatilização sob maiores temperaturas. Esse ponto se reforça quando é avaliado o resultado do ensaio de teor de matéria orgânica, que indicou 51,72%. Comparando-se à literatura, os dados obtidos nesta etapa da caracterização se mostram coerentes, como ocorreu em Roque *et al.* (2021), Montalvan (2016) e Scapin (2021).

Neste contexto de matéria orgânica, foi realizado o ensaio para determinar sua porcentagem. Utilizaram-se amostras de lodo que foram secas em estufa à 60 ± 5°C até a estabilização do teor de umidade (GRÁFICO 7). Essas amostras foram colocadas para a secagem em um forno MUFLA à 700°C por 2 horas e, dessa forma, o resultado foi de que 51,72% do material sólido das amostras secas se enquadram como matéria orgânica (FIGURA 12). O resultado do ensaio pode ser observado na TABELA 7.

FIGURA 12 – Lodo após secagem ao ar, na estufa e na mufla, respectivamente



Fonte: A autora (2023).

TABELA 7 – Teor de matéria orgânica médio

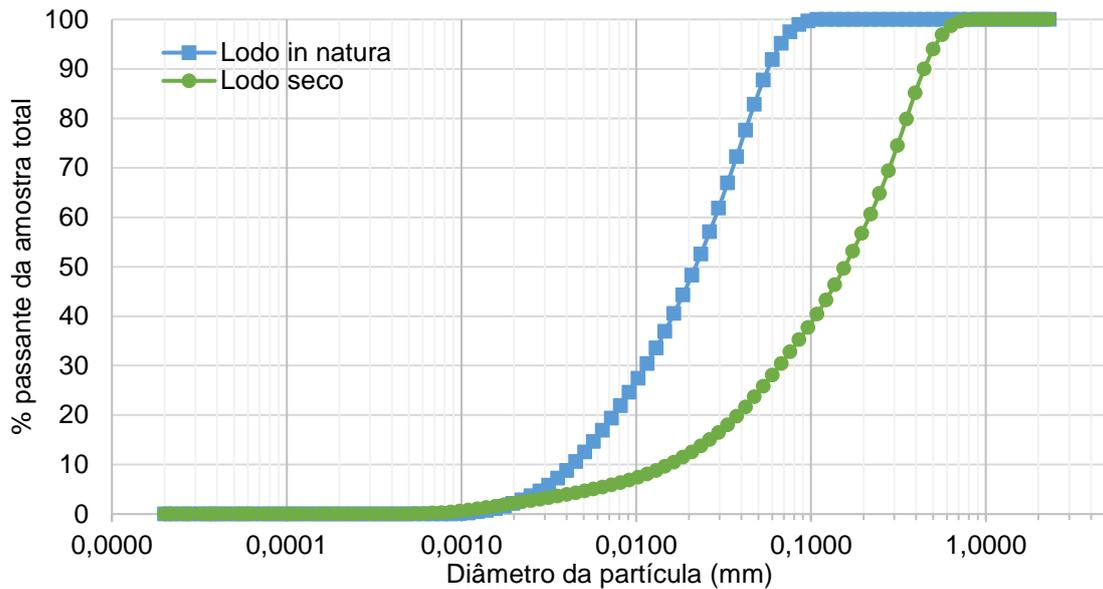
Cadinho	Peso cadinho pós MUFLA (g)	Peso cadinho + lodo (g)	Peso lodo inicial (g)	Peso cadinho + lodo pós MUFLA (g)	Peso lodo final (g)	Teor de Matéria Orgânica (%)	Teor de Matéria Orgânica Médio (%)
1	41,669	51,684	10,015	46,539	4,870	51,3729	51,72
2	30,336	40,349	10,013	35,152	4,816	51,9025	
3	30,867	40,871	10,004	35,679	4,812	51,8992	

Fonte: A autora (2023).

Conforme O’Kelly (2016), a massa específica dos sólidos de lodos de ETAs se relaciona inversamente com o teor de matéria orgânica. Portanto, quando há uma alta porcentagem de matéria orgânica, há a tendência de diminuir o valor de massa específica. Portanto, considerando que em temperaturas maiores espera-se que tenha ocorrido uma maior solubilização de matéria orgânica, os valores encontrados para o lodo da ETA de Iraí estão condizentes com a expectativa de comportamento encontrado na literatura.

Em relação à granulometria, salienta-se que o comportamento dos agrupamentos granulométricos do lodo em estudo é afetado pela presença de componentes de natureza aglomerante no processo de tratamento, como o sulfato de alumínio, que possivelmente interagiu de maneira prejudicial com o defloculante empregado na análise de sedimentação, e impossibilitou a análise também sem uso de defloculante devido ao agrupamento das partículas sólidas em virtude da presença do coagulante.

A análise granulométrica foi realizada através do Analisador de Tamanho de Partículas modelo Bettersizer 2600 com duas amostras de lodo: *in natura* e seco em temperatura ambiente. Optou-se pela realização das curvas desses dois tipos de amostra para melhor visualização do efeito da secagem na granulometria do resíduo. As curvas granulométricas podem ser observadas no GRÁFICO 8.

GRÁFICO 8 – Curvas granulométricas do lodo seco e *in natura*

Fonte: A autora (2023).

Verifica-se que ocorre um deslocamento para a direita da curva que demonstra a granulometria do lodo seco em relação ao lodo *in natura* e essa reação do lodo em relação à secagem pode ocorrer devido ao comportamento do lodo quando submetido à perda de água. Quando ocorre a secagem do lodo, ele apresenta uma textura granular já que, conforme ocorre a perda de água, o material sofre aglutinação de suas partículas que acabam formando grumos maiores e fortemente cimentados (Montalvan, 2016).

Outro ponto a ser destacado quando observado o GRÁFICO 8 são o diâmetro efetivo (D_{10}), o coeficiente de uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c) das duas curvas, que estão especificados na

TABELA 8. Apesar dos C_c de ambas as curvas possuírem valores próximos (valores entre 1 e 3 são considerados solos bem graduados), a diferença nos valores de C_u indica a discrepância entre as duas, visto que a curva do lodo seco quase se encaixaria como um solo desuniforme (bem graduado) enquanto o lodo *in natura* se enquadra como de uniformidade média. (Pinto, 2006).

TABELA 8 – Parâmetros das curvas granulométricas

	Curva granulométrica – Lodo <i>in natura</i>	Curva granulométrica – Lodo seco
Diâmetro Efetivo (D_{10})	0,004 mm	0,015 mm
Coefficiente de Uniformidade (C_u)	7,5	14
Coefficiente de Curvatura (C_c)	1,30	1,34

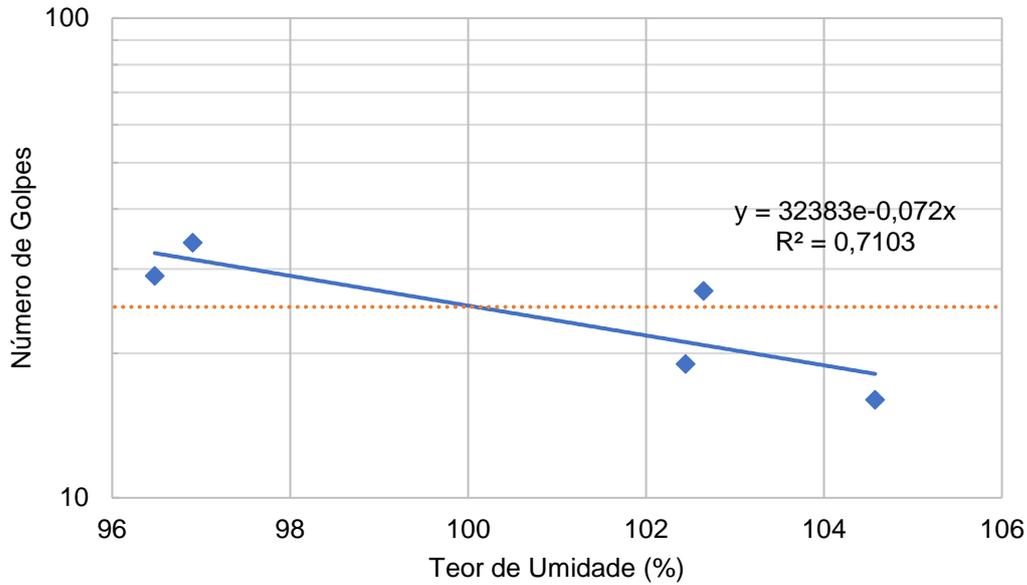
Fonte: A autora (2023).

Em relação aos limites de consistência do lodo, foram realizados ambos os ensaios com o lodo *in natura* e com o lodo seco à temperatura ambiente e obtiveram-se valores de LL de 100% para secagem à temperatura ambiente e destorroado e 487% para amostras *in natura*.

Em relação ao limite de plasticidade, apenas a amostra *in natura* apresentou plasticidade com um valor de LP de 392%. Isso indica um Índice de Plasticidade de 95%, o que aponta que o lodo *in natura* é altamente plástico (GRÁFICO 10). Esses valores se apresentaram comparáveis em ordem de grandeza a outros estudos com lodo neste estado, como Roque *et al.* (2021). As propriedades plásticas dependem do teor de umidade, da forma das partículas, da granulometria e da composição química e mineralógica do material. Quando submetido a processo de secagem, o lodo perde suas características plásticas, em conformidade com o que aponta Scapin (2021), indicando alteração de outros fatores citados anteriormente, além do teor de umidade.

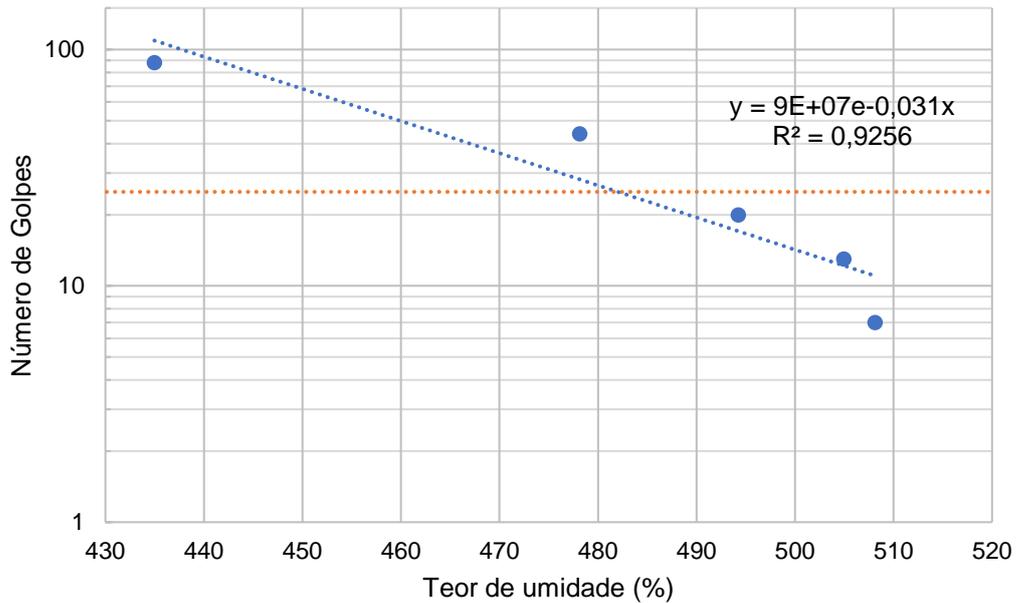
Com o lodo seco percebe-se uma grande diferença de comportamento. O limite de liquidez encontrado foi de 100%, como observado no GRÁFICO 9. Quando realizado o ensaio para determinar o limite de plasticidade, o lodo seco se classificaria como não-plástico.

GRÁFICO 9 – Limite de Liquidez do lodo seco



Fonte: A autora (2023).

GRÁFICO 10 – Limite de Liquidez do lodo *in natura*



Fonte: A autora (2023).

Unindo os dados obtidos da análise granulométrica e dos limites de Atterberg, determinou-se que o lodo *in natura* é um resíduo que se enquadraria geotecnicamente dentro do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como um argila orgânica (OH) por causa de sua alta porcentagem de matéria orgânica e por se tornar não-plástico após secagem (Roque; Montalvan; Boscov, 2021). Já o lodo seco possui uma classificação diferente, pois possui granulação mais grossa, com porcentagem

de finos inferior à 50%. De acordo com a classificação SUCS, o lodo seco se enquadraria como uma areia siltosa (SM).

Na caracterização química, as micrografias obtidas pelo ensaio MEV então apresentadas nas FIGURA 13, FIGURA 14 e FIGURA 15, nas ampliações 5.000, 10.000, 20.000 vezes respectivamente, acompanhadas do gráfico de ocorrências obtido através do EDS. De forma geral, as análises químicas pontuais por EDS indicaram que o lodo apresentou uma média de 22,05% de Carbono (C), 33,59% de Oxigênio (O), 21,54% de Alumínio (Al), 6,82% de Silício (Si), 1,09% de Enxofre (S) e 14,91% de Ferro (Fe), conforme pode ser visualizado na TABELA 9.

TABELA 9 – Composição química lodo de ETA – Ensaio MEV

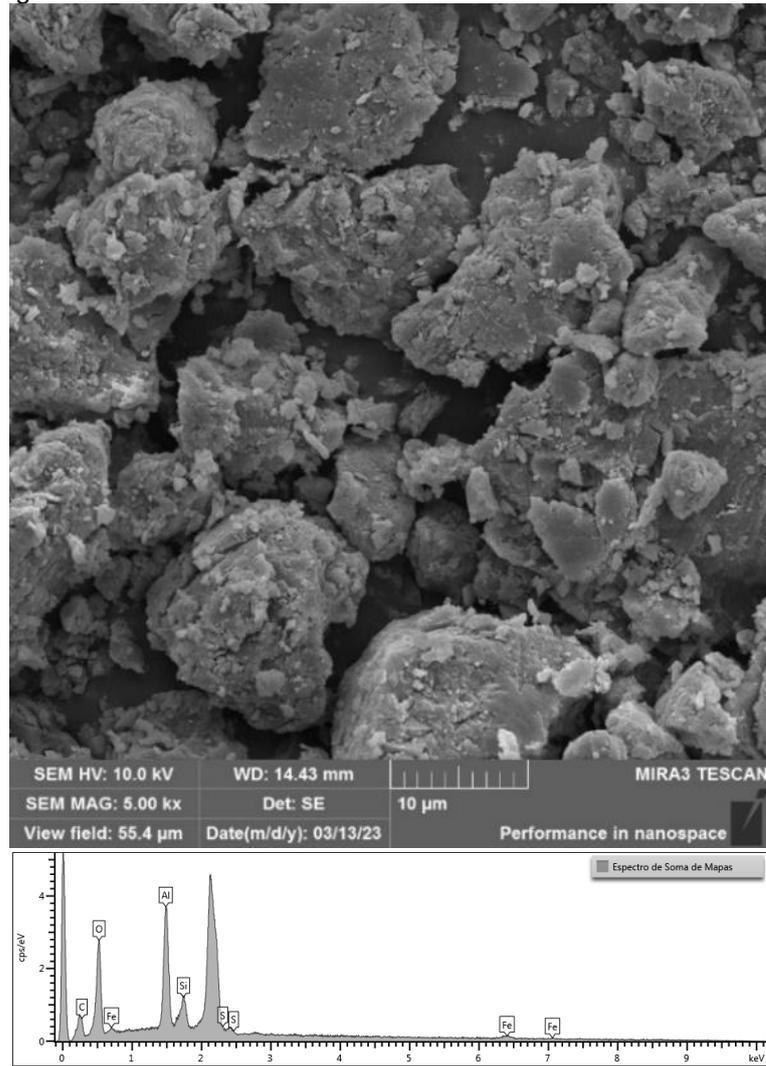
Amostra 1 (%)		Amostra 2 (%)		Amostra 3 (%)		Média (%)
C	24,50	C	20,97	C	20,67	22,05
O	37,79	O	31,88	O	31,12	33,59
Al	18,36	Al	23,41	Al	22,83	21,54
Si	5,33	Si	7,12	Si	8,02	6,82
S	0,93	S	1,09	S	1,26	1,09
Fe	13,09	Fe	15,54	Fe	16,10	14,91
Total	100,00	-	100,00	-	100,00	100,00

Fonte: A autora (2023).

A elevada quantidade de alumínio e ferro nas amostras pode ser decorrente dos coagulantes utilizados, como o sulfato de alumínio e o polímero catiônico, utilizados na ETA onde foi coletado o lodo utilizado nesta pesquisa. Os altos teores de carbono são referentes à presença de matéria orgânica nas amostras e o oxigênio poderia estar associado a presença dos outros elementos.

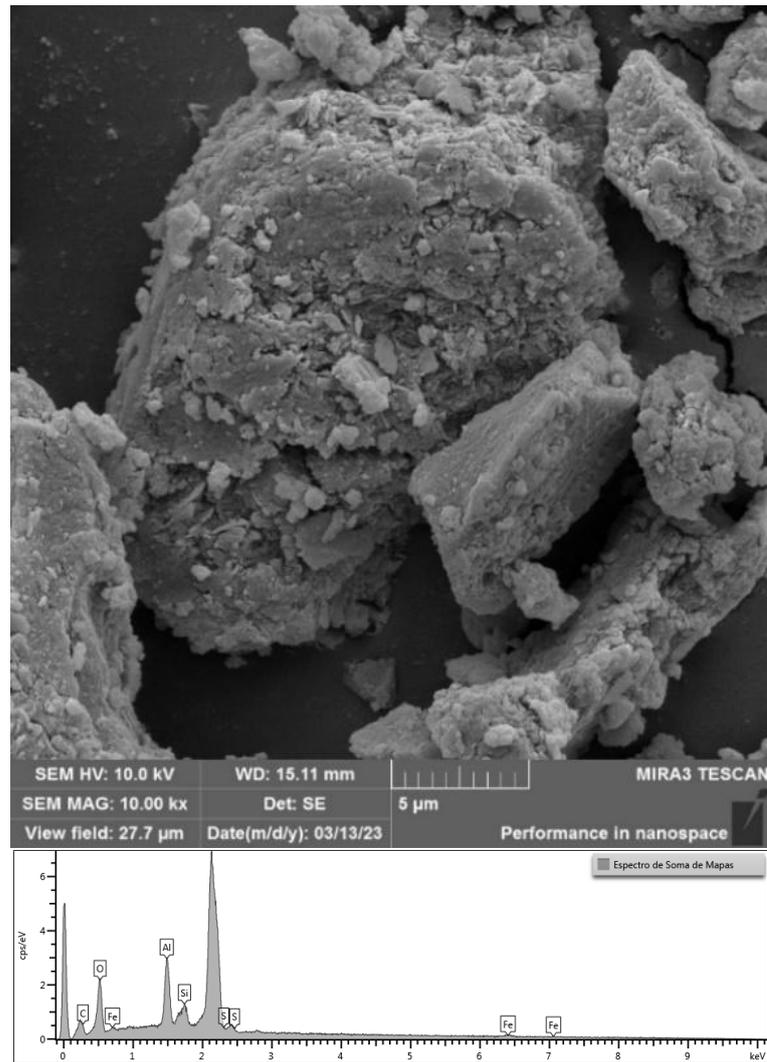
As imagens indicam que, mesmo na maior ampliação, os componentes do lodo ainda ocorrem de forma aglomerada, com fragmentos na faixa coloidal, confirmando a natureza extremamente fina do material.

FIGURA 13 – Micrografias com aumento de 5000 vezes



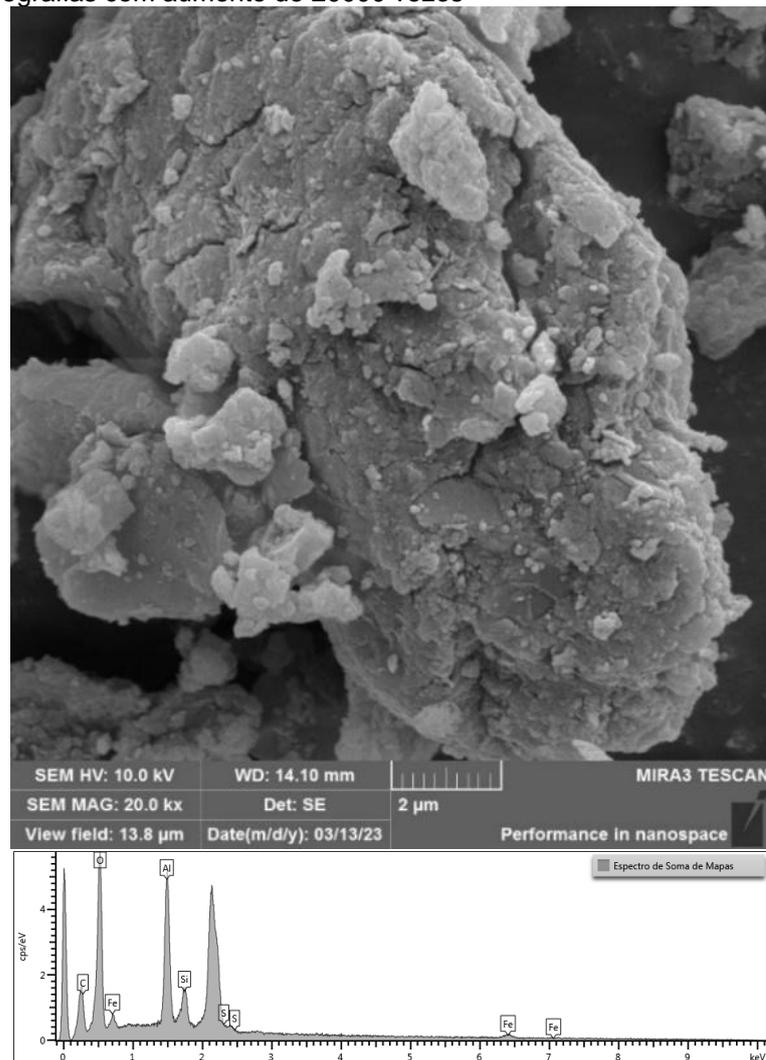
Fonte: A autora (2023).

FIGURA 14 – Micrografias com aumento de 10000 vezes



Fonte: A autora (2023).

FIGURA 15 – Micrografias com aumento de 20000 vezes



Fonte: A autora (2023).

5.2 PROPRIEDADES FÍSICAS MISTURA SOLO-LODO

No que se refere ao peso específico real dos grãos das misturas solo-lodo, os resultados podem ser avaliados na TABELA 10. Compreende-se que a presença do lodo em diferentes porcentagens diminuiu o valor final de peso específico ($\gamma_{sm\acute{a}x}$), visto que o próprio lodo já possui um valor baixo de peso específico dos sólidos.

TABELA 10 – Resultados do peso específico real dos grãos das misturas solo-lodo

	Solo-Lodo 2,5%	Solo-Lodo 5%
Peso específico real dos grãos ($\gamma_{sm\acute{a}x}$)	2,661 g/cm ³	2,656 g/cm ³

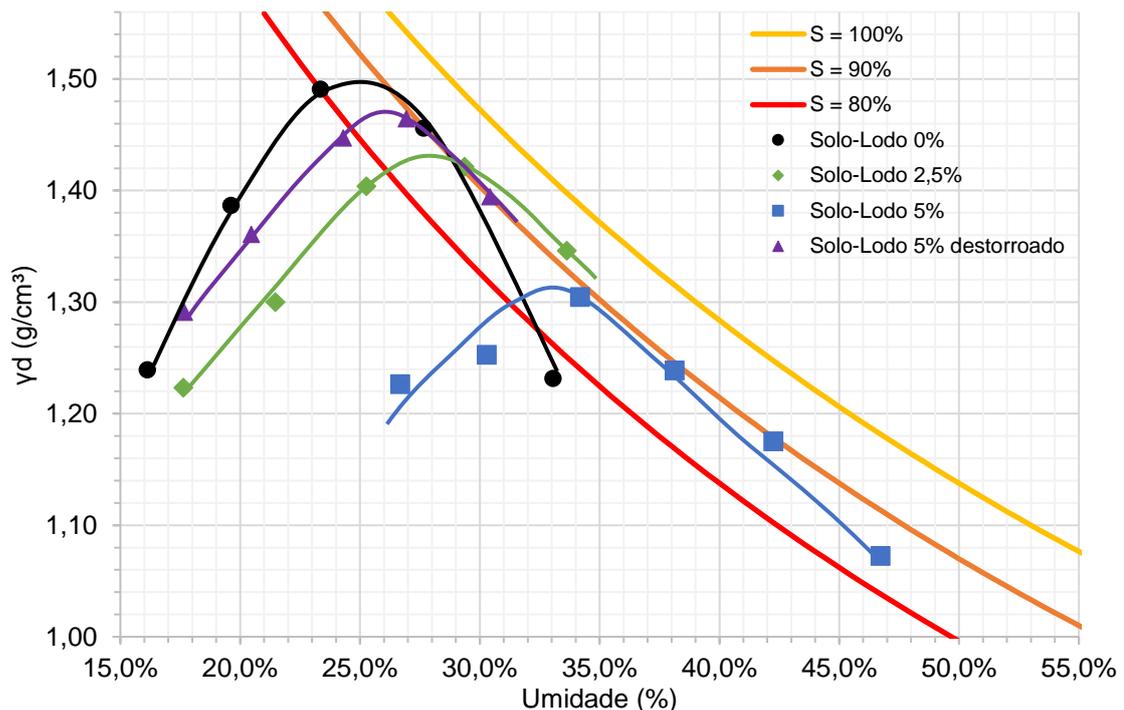
Fonte: A autora (2023).

5.2.1 Ensaio de Compactação

Foram realizados ensaios de compactação para todas as variações das misturas solo-lodo (0%, 2,5% e 5%) utilizando o lodo *in natura*. Não ocorreu ensaio de compactação para a amostra de lodo puro devido à impossibilidade de compactar a amostra devido ao estado semissólido e ao alto teor de umidade. As curvas de compactação das misturas solo-lodo podem ser observadas no GRÁFICO 11.

Misturas do lodo com o solo foram realizadas, empregando o solo descrito no item 3.1. Foram realizados ensaios de compactação, na energia de Proctor Normal segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016), empregando diferentes combinações de incorporação de lodo em substituição à parcela de massa seca do solo: inclusão de lodo *in natura* em dois teores, representando 2,5% e 5% em relação ao teor de sólidos; e inclusão de lodo seco e destorroado representando 5% em relação ao teor de sólidos. As curvas de compactação dos materiais alterados podem ser avaliadas no GRÁFICO 11, em comparação à curva de compactação do solo puro (solo-lodo 0%), e na TABELA 11 podem ser apreciados os valores de teor de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para cada caso. No gráfico também são apresentadas as curvas de saturação.

GRÁFICO 11 – Curvas de compactação misturas solo-lodo



Fonte: A autora (2023).

Observa-se que a adição do lodo *in natura* alterou a posição da curva de compactação no sentido de aumentar o teor de umidade ótima e diminuir o peso específico aparente seco, comportamento esperado para solos de característica mais argilosa (Pinto, 2006). Em relação ao uso de lodo no estado seco e destorroado, a modificação da curva foi pouco expressiva, ficando bastante próxima à curva do solo original. Este comportamento é coerente com as diferenças observadas nos ensaios de consistência realizados em amostras *in natura* e amostras secas e destorroadas, onde a primeira apresenta elevados índices de plasticidade, e a última apresenta comportamento não plástico, denotando a influência dos processos de preparação do lodo no comportamento da mistura.

A partir de ensaios de compactação do solo, obteve-se que o valor de peso específico aparente seco máximo deste solo, nas condições de Proctor Normal, regido pela NBR 7182 (ABNT, 2016), foi de 14,9 kN/m³, associado à umidade ótima de 24,6%, sendo importante para a definição das três variações de compacidade estudadas (TABELA 11).

TABELA 11 – Valores ótimos de compactação para o solo puro e misturas solo-lodo.

Variável	Amostra avaliada		
	Solo Puro	Solo-Lodo 2,5%	Solo-Lodo 5%
Teor de umidade ótimo (%)	24,6	28,2	34,2
Peso específico aparente seco máximo (g/cm ³)	1,498	1,428	1,305

Fonte: A autora (2023).

Considerando a finalidade em estudo, de aplicação do lodo em camadas de baixa permeabilidade, os demais ensaios foram realizados com incorporação de lodo *in natura* na massa de solo, empregando as quantidades avaliadas nos ensaios de compactação: 2,5% e 5,0%. Esta escolha foi considerada ideal, pois apresenta encaminhamento direto do lodo, da forma como é disponibilizado na ETA, sem necessidade de pré-tratamento, além de conduzir o solo à um ambiente de compactação típico de materiais argilosos, os quais são menos permeáveis e mais adequados ao uso em camadas impermeabilizantes.

5.2.2 Condutividade Hidráulica

A partir dos resultados dos ensaios anteriores foi realizado o ensaio de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida e carga variável, conforme NBR 14545 (ABNT, 2021) (FIGURA 16). A preparação das amostras para o ensaio de condutividade hidráulica foi realizada considerando a compactação máxima, ou seja, foi aplicada uma energia de compactação para que fossem atingidos os valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e de $\omega_{\acute{o}tima}$. Os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica realizados, bem como os índices físicos das amostras na condição de ensaio, são apresentados na TABELA 12.

FIGURA 16 – Amostra compactada para Ensaio de condutividade hidráulica



Fonte: A autora (2023).

TABELA 12 – Propriedades físicas iniciais das amostras e condutividade hidráulica

Amostra	Peso específico seco máximo γ_d (g/cm ³)	Umidade ótima $\omega_{\acute{o}tima}$ (%)	Índices de vazios $e_{m\acute{a}x}$	Porosidade n (%)
Solo-Lodo 0%	1,498	24,55	0,7817	43,87
Solo-Lodo 2,5%	1,428	28,20	0,8635	46,34
Solo-Lodo 5%	1,305	34,20	1,0352	50,87

Fonte: A autora (2023).

A variação de porcentagem de lodo aplicado nas misturas influenciou na condutividade hidráulica do material, visto que o lodo *in natura* utilizado nos ensaios apresenta uma alta porcentagem de finos, como visto no GRÁFICO 8 da curva granulométrica. Essa parcela de resíduo na faixa coloidal auxiliou na diminuição do tamanho dos poros entre grãos da mistura e, dessa forma, reduziu os coeficientes de condutividade hidráulica, permitindo que as misturas fossem menos permeáveis quando comparadas com o solo puro (Ferreira *et al.*, 2011).

Os resultados indicaram que a adição de lodo manteve (2,5%) ou melhorou (5%) as características de permeabilidade para o solo residual em estudo, fazendo com que, na melhor condição, a condutividade hidráulica ficasse na ordem de grandeza de 10^{-9} m/s, ideal para aplicações em impermeabilização, como em barreiras minerais de aterros sanitários. Na TABELA 13 podem ser apreciados os resultados dos ensaios realizados no solo puro e com as adições de lodo *in natura*.

TABELA 13 – Condutividades hidráulicas obtidas para o solo puro e misturas solo-lodo.

Variável	Amostra avaliada		
	Solo Puro	Solo-Lodo 2,5%	Solo-Lodo 5%
Condutividade Hidráulica (m/s)	$8,5 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-8}$	$4,9 \times 10^{-9}$

Fonte: A autora (2023).

Montalvan (2016) incorporou 16,7%, 20% e 25% de lodo úmido ao um solo do tipo arenoso, com condutividade hidráulica que variava entre 4×10^{-7} e 7×10^{-6} m/s e com isso obteve valores de condutividade hidráulica para as misturas solo-lodo na ordem de 10^{-7} e 10^{-6} m/s. Ou seja, observou-se que quantidades mais elevadas de lodo adicionados ao solo não melhoraram seu desempenho para uso como barreira impermeabilizante.

O lixiviado obtido a partir dos ensaios de condutividade hidráulica foi analisado, tanto para o lodo puro quanto para mistura de solo com o maior teor de lodo, 5%. Para o lixiviado do lodo *in natura*, obteve-se pH igual a 7,31, Turbidez 0,96 uT, teor de sólidos dissolvidos totais igual a 227 mg/L e condutividade elétrica 419 μ S/cm. Para o lixiviado da mistura solo-lodo, obteve-se pH igual a 6,11, Turbidez 0,76 uT, teor de sólidos dissolvidos totais igual a 9,21 mg/L e condutividade elétrica 4,8 μ S/cm. Estes resultados encontram-se dentro dos padrões de referência considerados pelo CONAMA (Brasil, 2005) e em consonância com o pH encontrado

nos estudos de Hsieh e Raghu (1997), Prim (2011), Guerra (2005), Portella *et al.* (2003), Montalvan (2016) e conforme pode ser observado na TABELA 14, que apresenta a comparação dos resultados.

TABELA 14 – Caracterização do lixiviado de lodo e misturas solo-lodo

Variável	Referência CONAMA	Amostra avaliada	
		Lodo Puro	Solo-Lodo 5%
pH	5 a 9	7,31	6,11
Turbidez uT	40 a 100	0,96	0,71
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	500	227	9,21
Condutividade elétrica $\mu\text{S/cm}$	*	419	4,8

Fonte: A autora (2023).

*não estipulado

As análises conduzidas, desde a caracterização do material até a realização de ensaios para obtenção de características hidráulicas do material, possibilitam a visualização do horizonte de viabilidade do emprego em misturas com solo para aplicação em camadas impermeabilizantes. As pesquisas apontam não apenas para o potencial do uso do lodo como material para incorporação na construção de aterros sanitários – deixando de ser rejeito neste local, passando a ser material de construção – mas também introduzem metodologia de avaliação que pode ser expandida para diferentes aplicações geotécnicas com uso de barreiras minerais.

5.2.3 Adensamento

Como parte do entendimento do comportamento do lodo *in natura* ou em adição ao solo para misturas passíveis de serem empregadas em aterros sanitários, torna-se importante entender seu comportamento em compressibilidade.

O estudo da deformabilidade do solo, do lodo e das misturas solo-lodo foi realizado por ensaios de adensamento unidimensional em corpos de prova compactados (FIGURA 17). Na Tabela 15 estão apresentadas as propriedades físicas dos corpos de prova, tendo sido adotada a condição *in natura* para o lodo puro e as condições ótimas de compactação das misturas solo-lodo. As curvas de adensamento do solo, do lodo e das misturas solo-lodo obtidas neste ensaio estão demonstradas no GRÁFICO 12 e no GRÁFICO 13.

FIGURA 17 – Preparação do corpo de prova e ensaio de adensamento



Fonte: A autora (2023).

Tabela 15 – Propriedades físicas iniciais das amostras para os ensaios de Adensamento

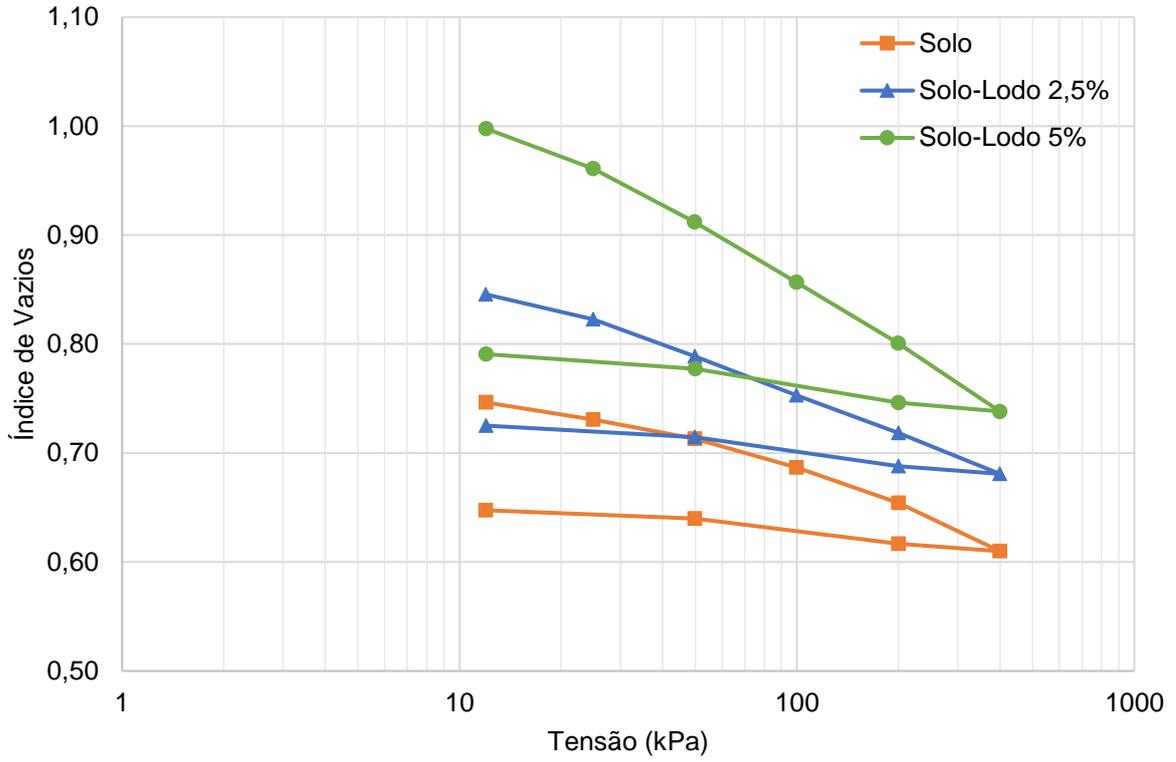
Amostra	Peso específico seco máximo $\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	Umidade ótima $W_{\acute{o}tima}$ (%)	Índices de vazios e_i
Lodo	0,239*	342,87%*	7,828*
Solo-Lodo 0%	1,515	24,55	0,761
Solo-Lodo 2,5%	1,422	28,20	0,871
Solo-Lodo 5%	1,290	34,20	1,058

*Dados do lodo *in natura* para realização do ensaio. Não foi possível realizar a compactação devido sua consistência.

Fonte: A autora (2023).

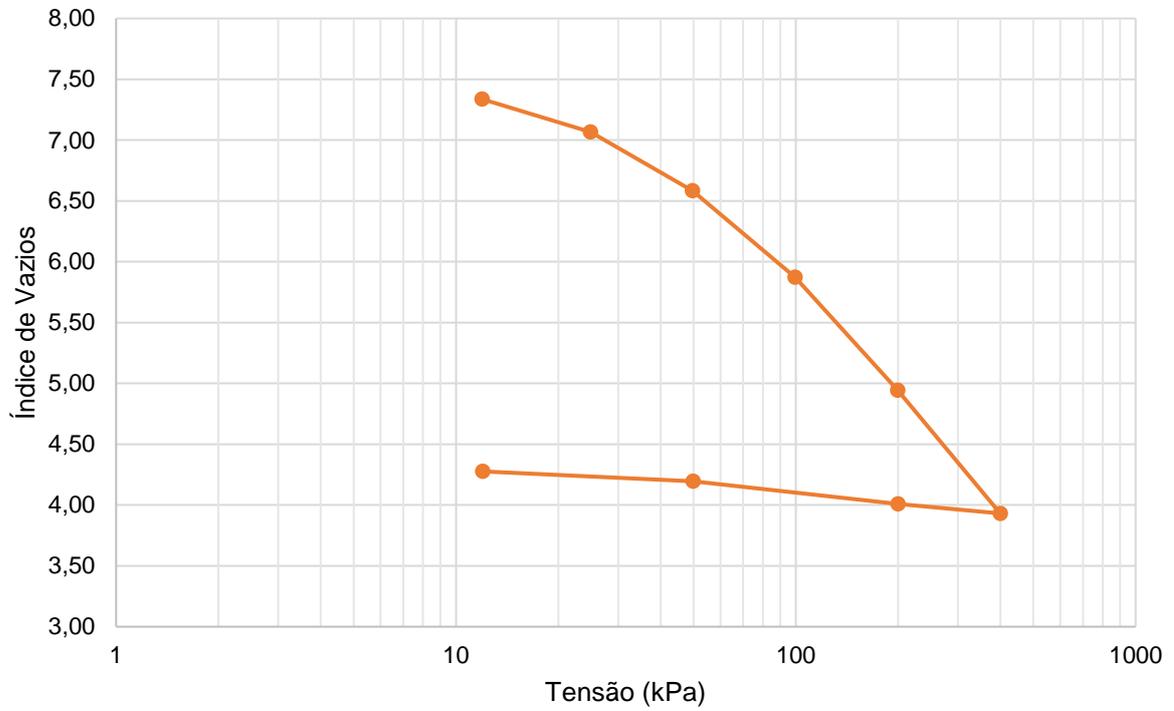
O índice de vazios inicial das amostras com solo-lodo moldadas nas condições de umidade ótimas é maior, considerando o valor do peso específico seco máximo (γ_d) obtido na curva de compactação, gerando maiores variações de índice de vazios sob os mesmos estágios de carregamento da amostra sem adição de lodo no solo. Ainda que a compressibilidade seja maior em misturas com maior teor de lodo, a condutividade hidráulica é menor nestes casos, indicando que, após processos de consolidação por adensamento, a tendência da condutividade hidráulica da mistura é diminuir ao longo do tempo, característica desejável para materiais de camadas impermeabilizantes em aterros sanitários.

GRÁFICO 12 – Curvas de compressibilidade – Solo e misturas solo-lodo



Fonte: A autora (2023).

GRÁFICO 13 – Curvas de compressibilidade – Lodo



Fonte: A autora (2023).

O solo compactado nas condições ótimas, obtidas através da curva de compactação, apresentou um índice de compressão (C_c) de 0,046 e um índice de recompressão (C_r) de 0,028. A mistura solo-lodo 2,5% apresentou um C_c de 0,051 e C_r de 0,039 e a mistura solo-lodo 5% resultou em C_c de 0,080 e C_r de 0,060, conforme Tabela 16.

Tabela 16 – Índices de compressão e recompressão do solo e das misturas determinados nos ensaios de Adensamento

Amostra	C_c	C_r
Lodo	1,399	0,691
Solo-Lodo 0%	0,046	0,028
Solo-Lodo 2,5%	0,051	0,039
Solo-Lodo 5%	0,080	0,060

Fonte: A autora (2023).

Em ambas composições solo-lodo os resultados de compressão e recompressão apresentaram valores superiores ao do solo puro, o que indica que as misturas são mais compressíveis do que o solo puro compactado na umidade ótima. Isso se justifica pela alta compressibilidade do lodo puro devido a impossibilidade de compactação do mesmo no anel de adensamento devido a sua consistência, o que apresentou um C_c de 1,399 e C_r de 0,691, valores compatíveis com os resultados obtidos por O’Kelly (2016) e Wang *et al.* (1992) em trabalhos semelhantes.

6 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado busca contribuir para a sustentabilidade do meio ambiente com relação à disposição adequada de resíduos gerados em ETAs, usando-o como incremento ao solo para camadas de impermeabilizantes de aterros sanitários.

Sobre a análise da inclusão de lodo de ETA no estado semissólido, em misturas com solo, foi demonstrada a viabilidade técnica do emprego em aplicações de uso na engenharia civil, como em obras de aterros sanitários, se apresentando viável do ponto de vista da condutividade hidráulica, enquadrada em valores adequados às aplicações em camadas impermeabilizantes, e do ponto de vista da consolidação, indicando variações de índices de vazios que promoverão ainda mais a redução da permeabilidade, com coeficiente de compressão nas misturas solo-lodo muito inferiores ao do lodo puro.

O uso do lodo em substituição à parcela do solo (lodo em estado semissólido) é desejável pois, além de economizar recursos naturais, como água e o solo, confere valor ao rejeito, que tem potencial para ser empregado como material de construção em camadas impermeabilizantes dos aterros sanitários onde seria disposto, ou até mesmo na fabricação de produtos com alto volume de produção, como aterros rodoviários, pois apresenta condutividade hidráulica aceitável para material de camada impermeabilizante.

Houve um decaimento dos valores de peso específico aparente seco máximo e aumento da umidade ótima conforme aumentou a porcentagem de lodo na mistura. Também ocorreu a diminuição dos valores de coeficiente de condutividade hidráulica, indicando uma maior impermeabilidade do sistema e possibilidade da aplicação da mistura em camadas de aterro sanitário sob o ponto de vista hidráulico. Apesar de os valores dos parâmetros geotécnicos das misturas com 2,5 e 5% de lodo incorporado ao solo se apresentarem aceitáveis, é necessário considerar sua deformabilidade maior que se comparado somente com uso de solo.

Ainda como benefícios esperados destaca-se a apresentação de uma solução viável para a destinação de resíduos de ETAs, redução do consumo de matérias-primas naturais e o emprego sustentável de um resíduo que comumente ocupa um espaço útil precioso em aterros, dispondo-o de forma ambientalmente correta, socialmente responsável e economicamente viável.

Sugere-se para prosseguimento da pesquisa:

- estudo do comportamento das misturas solo-lodo com a adição de barreiras geossintéticas;
- estudo do comportamento das misturas solo-lodo com a adição de cal;
- análise da viabilidade econômica e financeira desta alternativa;
- estudo em campo das variáveis que possam interferir na aplicação prática das misturas solo-lodo;
- estudo da viabilidade ambiental a longo prazo das misturas solo-lodo através de ensaios de lixiviação;
- monitoramento de células de aterro após encerramento do mesmo com uso de misturas solo-lodo para entender o comportamento de compressibilidade e adensamento a longo prazo.

REFERÊNCIAS

- ACHON, C. L.; BARROSO, M. M; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, ISSN 1413-4152, vol. 18, nº.2, Rio de Janeiro, abril/junho 2013, pp. 115-122.
- ANIBELE, R. **Análise em modelo de laboratório da substituição de filtro de areia por geocomposto em barragens de terra**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Ponta Grossa. 2020.
- ARAÚJO, P. S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2008 a 2022**. Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 25 set. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16853**. Solo — Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15849**. Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**. Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896**. Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13600**. Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440° C. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**. Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**. Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**. Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . **NBR 6457**. Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

AWWA – American Water Works Association. Committee Report: Water Treatment Plant Sludges – An Update of the State of the Art: part 1. **JAWWA**, v. 70, n. 9, 1978, p. 498 – 503.

BARBOSA, M. F. **Caracterização radioquímica, química e mineralógica do lodo da estação de tratamento de água de Ponta Grossa – PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2020.

BASIM, S.C. **Physical and Geotechnical Characterization of Water Treatment Plant Residuals**. PhD Thesis, New Jersey: New Jersey Institute of Technology. 1999.

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

BRASIL. Lei Federal Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm> Acesso em 11 abr 2022.

BRASIL. Lei Federal Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato_2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em 11 abr 2022.

BRASIL. Resolução Conama Nº 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: < <https://conama.mma.gov.br/images/conteudo/LivroConama.pdf>> Acesso em 11 abr 2022.

CAMARGO, A. F. M.; PEREIRA, A. M. M. Qualidade da Água em Áreas Urbanas. *In*: BRAGA, R.; CARVALHO, P. F. (Orgs) **Recursos Hídricos e Planejamento Urbano e Regional**. Rio Claro: Laboratório de Planejamento Municipal – Deplan – UNESP – IGCE, 2003. cap 3.

CASTRO, Carmen Maria Barros de. **Ponto 1 – A Qualidade da Água / Ponto – 2 Introdução ao Tratamento da Água**. Porto Alegre: Gráfica UFRGS, 2008a.

CASTRO, Carmen Maria Barros de. **Ponto 3 – Coagulação e Floculação**. Porto Alegre: Gráfica UFRGS, 2008b.

CASTRO, Carmen Maria Barros de. **Ponto 4 – Sedimentação/Decantação**. Porto Alegre: Gráfica UFRGS, 2008c.

CASTRO, Carmen Maria Barros de. **Ponto 5 – Filtração**. Porto Alegre: Gráfica UFRGS, 2008d.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Superficiais de Estado de São Paulo**. Relatórios: São Paulo: Cetesb, 2009. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 17 nov 2021.

CHEN, Y. L. *et al.* Combining physico-chemical analysis with a *Daphnia magna* bioassay to evaluate a recycling technology for drinking water treatment plant waste residuals. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 122, p. 368-376, 2015.

CORDEIRO, J. S. Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs. *In*: REALI, Marco Antonio Penalva (Coord.). **Noções Gerais de Tratamento de Disposição Final de Lodos de ETA**. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, p.1-19, 1999.

CORDEIRO, J. S.; CAMPOS, J. R. O impacto ambiental provocado pela indústria da água de abastecimento [CD-ROM]. 1998, **Anais..** Lima: AIDIS, 1998.

CORNWELL, D.A.; MUTTER, R.N.; VANDERMEYDEN, C. **Commercial Application and Marketing of Water Plant Residuals**. Denver: American Water Works Association, 2000.

COSTA, Á. J. C. **Análise de viabilidade da utilização de lodo de ETA coagulado com cloreto de polialumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas: estudo de caso na ETA do município de Mirassol-SP**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – USP, São Carlos, São Carlos, 2011.

COSTA, C. M. C. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2015.

COUTO, V. M. P. **Desenvolvimento e caracterização de materiais cerâmicos derivados do processamento dos resíduos de estação de tratamento de água**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

CUNHA, G. D.; LIMA, J. A. V.; STACHIW, R.; TRONCO, K. M. Q. Caracterização e destinação ambientalmente corretas do lodo gerado pelas estações de tratamento de água. **Nature and Conservation**, v.12, n.2, p. 19-30, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093**. Solo – Determinação da densidade real. Brasília, 1994.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: RiMa. 2002.

DIXON, D. A.; GRAHAM, J.; GRAY, M. N. Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 36:5, p. 815-825. 1999.

FADANELLI, L. E. A.; WIECHETECK, G. K. Estudo da utilização do lodo de ETA em solo: O cimento para pavimentação rodoviária. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 2, n. 2, p. 22-30, 2010.

FERREIRA, S. R. D. M. *et al.* Hydraulic conductivity and soil-sewage sludge interactions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1569–1577, out. 2011.

GOMES, S. D. C., ZHOU J. L., LI W., LONG G. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation and Recycling**. 145, 148-59. 2019.

GONÇALVES, F.; SOUZA, C. H. U.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R. S. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Revista Dae**, [s.l.], v. 65, n. 205, p.5-14. Editora Cubo Multimídia. 2017.

GONÇALVES, R. F.; BARRETO, E. M. S.; BRANDÃO, J. T. Viabilidade econômica da regeneração do sulfato de alumínio de lodos de ETAs. *In*: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 20., **ABES**. Rio de Janeiro, 1999.

GRANATO, T. C. Biosolids land application by the metropolitan water reclamation district of greater Chicago: an overview of the program, its benefits, and environmental impacts. *In*: SIMPOSIO INTERAMERICANO DE BÍOSSÓLIDOS, 7, 2010, Campinas. **Palestra...**, Campinas, 2010.

GUERRA, R. C. **Caracterização e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário**. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Aplicada) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

HSIEH, H. N.; RAGHU, D. **Criteria development for water treatment plant residual monofills**. American Water Works Association Research Foundation and American Water Works Association, 1997.

HUSE, K. **Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP). **Portaria IAP Nº 260 de 26 de novembro de 2014.** <https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-09/portaria_iap_260-2014_documentos.pdf>. Acesso em: 27 set 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo 2010.** 2011. <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8&uf=00>>. Acesso em: 16 nov 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Atlas de saneamento 2011.** Rio de Janeiro, 2011. 268 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional do Saneamento Básico (PNSB).** 2017. <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101885>>. Acesso em: 20 abr 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Manual de gerenciamento integrado.** Lixo Municipal: 2. Ed. São Paulo. 2000. 29 p.

IZZO, R. L. S.; MAHLER, C. F.; ROSE, L. Barreira capilar construída com resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental.** V. 18, n. 4, 2013, p. 303-312.

KATAYAMA, V.T. **Quantificação da produção de lodos de estação de tratamento de água de ciclos completo: uma análise crítica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

KAZA, S.; YAO, L. C.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.** Urban Development: Washington, DC: World Bank. 2018.

KAWAI, M. *et al.* Biodegradability and methane productivity during anaerobic co-digestion of refractory leachate. **International Biodeterioration & Biodegradation.** v72, pag. 46-51, 2012.

KNIERIM, L. S. **Estudo do comportamento mecânico e hídrico do uso do lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo argiloso laterítico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

KONDAGESKI, J. H. *et al.* Pesquisas Interdisciplinares e a Estruturação dos Estudos da rede Interinstitucional de Pesquisa em Lodo de Água. *In:* CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. **Lodo de Estação de Tratamento de Água – Gestão e Perspectivas Tecnológicas.** 1. e d. Curitiba; Thinks Creative, 2013. p. 47-66.

LEBLANC, R. J.; MATTHEWS, P.; RICHARD, R. P. **Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource.** Kenya: United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT), 2008.

LUKIANCHUKI J. A.; ESQUIVEL, E. R. Hydraulic conductivity and shear strength behaviour of compacted lateritic soil bentonite mixtures used for sanitary landfill liners. **Soils Rocks**. 33:69–79, 2010.

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

MARCHIORI, L.; STUDART, A.; Albuquerque, A.; Cavaleiro, V.; Silva, A. P. **Geotechnical Characterization of Water Treatment Sludge for Liner Material Production and Soft Soil Reinforcement**. 2021.

MARGEM, J. I. **Caracterização e incorporação de lodo de decantação de estação de tratamento de água (e.t.a.) em cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais), Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2008.

MARIANO, O. H. M. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

MELARE, A. V. S. *et al.* Technologies and decision support systems to aid solidwaste management: a systematic review. **Waste Management**, 2017, vol. 59, p. 567-584.

MONTALVAN, E. L. T. **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo de tratamento de água do município de Cubatão, SP**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MOREIRA, R. C. A. *et al.* Estudo geoquímico da disposição de lodo de estação de tratamento de água em área degradada. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 8, 2009.

MOREIRA, R. C. A. *et al.* Uso do lodo químico, rico em alumínio, produzido pela ETA Rio Descoberto para a recuperação de uma área degradada. **Geochimica Brasiliensis**, v. 21 p.022 - 035, 2007.

O'KELLY, B. C. Geotechnics of municipal sludges and residues for landfilling. **Geotechnical Research**, v. 3, n. 4, p. 148–179, 1 dez. 2016.

OLIVEIRA, R. N. **Produção de material geopolimérico utilizando lodo de ETA tratado com drenagem ácida de minas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade Meridional, Passo Fundo, 2020.

OLIVEIRA, N. S. **Estudo da secagem de lodo de estação de tratamento de água**. Curitiba, Brasil. 209 p. 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais, Divisão de População, 2018. <<https://population.un.org/wup/Country-Profiles/>>. Acesso em: 16 nov 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Envisaging the Future of Cities. 2022. <<https://unhabitat.org/wcr/>>. Acesso em: 25 set 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2022. <https://brasil.un.org/ptbr/sd_gs>. Acesso em: 13 abr 2022.

PAIXÃO, L. C. C. **Aproveitamento do lodo de Estação de Tratamento de Água em Cerâmica Vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Rede Temática de Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2005.

PEREIRA, E. V.; VARGAS, M. C. **Estudo de Dosagem para Misturas de Solo-Cimento e Resíduos de Construção e Demolição Mediante Ensaio de Compressão Simples**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2019.

PEREIRA, V. E. **Disposição de lodo adensado de ETA em ETE com tratamento primário quimicamente assistido**. Dissertação (Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

PINHEIRO, B. C. A.; ESTEVAO, G. M.; SOUZA, D. P. Lodo proveniente da estação de tratamento de água do município de Leopoldina, MG, para aproveitamento na indústria de cerâmica vermelha Parte I: caracterização do lodo. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, Set. 2014.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; SALES, A.; BARON, O. Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna. Curitiba, PR. *In*: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 22., Joinvile, 2003.

PRIM, E. C. C. **Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RANGEL, M. L. A influência da Urbanização na qualidade da água: Barragem Mãe D'água - Porto Alegre - RS. **Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina** - Universidade de São Paulo, p. 12.335-12.358. 20 a 26 de Março de 2005.

RICHTER C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. **Cerâmica**, São Paulo, v. 59, n. 352, dez. 2013.

ROQUE, A.; MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. Caracterização mineralógica, química e geotécnica do lodo da estação de tratamento de água Taiacupeba. **Geotecnia**, n. 151, p. 33–52, 12 mar. 2021.

SANTOS, S. S. A. **Caracterização e utilização de resíduo sólido: lodo de eta, como matéria prima para confecção de elementos da construção civil**. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

SARAIVA SOARES, A. F.; LAGES, F. A. E.; MACHADO, A. O. V.; CUNHA, A. B. L. **Orientações Básicas Acerca do Impacto do Lodo Gerado nas ETAs, Alternativas de Tratamento/Disposição e Legislação Correlata**. Ministério Público do Estado de Minas Gerais. CEAT/MA 2009 (Manual técnico).

SCAPIN, J. **Avaliação da utilização de mistura de solo e lodo de estação de tratamento de água como material de cobertura e de fundo em células experimentais de resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO – SAAE. **Sistemas de tratamento de água**. Aracruz, ES. 2006. Disponível em: <https://www.saaeara.com.br/arquivos/outros/Tratamento_de_Agua.pdf>. Acesso em: 24 jun 2022.

SERVIÇO AUTÔNOMO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO – SAMAE. **Samae projeta reforma para dobrar volume de água tratada na ETA Celeste Gobbato**. 2018. Disponível em: <<https://caxias.rs.gov.br/noticias/2018/04/samae-projeta-reforma-para-dobrar-volume-de-agua-tratada-na-eta-celeste-gobbato>>. Acesso em: 24 set 2023.

SILVA, A. DOS S.; HEMSI, P. S. Adição de cal a um lodo de ETA visando melhoria da resistência para uso em cobertura diária de aterros sanitários. *In*: 1º Encontro Nacional de Lodo de Estação de Tratamento de Água (**LETA 2021**), 2021.

SILVA A. R. **Comportamento Geotécnico de Misturas de Areia Argilosa Laterítica e Lodo de Estação de Tratamento de Água Taiacupeba, Município de Suzano**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

SILVA, A. S., LIMA, B. L., SPINOLA, C. A. Saneamento Básico e Doenças de Veiculação Hídrica: Um estudo da Comunidade Quilombola de Remanso, Lençóis-Ba. **Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos**. Goiânia, Brasil, v. 6, n. 1, p. e7987, 2020.

SILVA, M. V. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - USP, São Paulo, 2011.

SIMPSON, A.; BURGESS, P.; COLEMAN, S.J. The Management of Potable Water Treatment Sludge: Present Situation in the UK. *In*: Management of Wastes from Drinking Water Treatment. Proceedings. London: **The Chartered Institution of Water and Environmental Management**, p. 29-36. 2002.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Programa Nacional do Setor de Saneamento. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos do Saneamento 2015**. 2015. Disponível em: www.snis.gov.br. Acesso em: 20 nov 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos do Saneamento 2020**. 2022. Disponível em: www.snis.gov.br. Acesso em: 27 set 2023.

TARTARI, R. *et al.*. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 344, dez. 2011.

TEIXEIRA, S. R. *et al.* Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Cerâmica**, São Paulo, v. 52, n. 323, set. 2006.

TEIXEIRA, S. T.; MELO, W. J. M.; SILVA, É. T. Aplicação de lodo da estação de tratamento de água em solo degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.1, p.91-94, jan. 2005.

TONUS, B. P. A.; LAUTENSCHLÄGER, C. E. R.; VIEIRA, A. F.; FARO, V. P.; TSUHA, C. H. C. Site characterization for a study on shallow geothermal energy exploitation in southern Brazil. **Soils and Rocks**. Aceito para publicação. 2022.

TRINDADE, T. P. *et al.* Compactação dos Solos. 6 Simpósio Brasileiro sobre Colheita e Transporte Florestal. **Anais...** Belo Horizonte, Brasil. 2003.

TUCCI, C. E. M. Água no Meio Urbano. *In*: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Org.). **Águas Doces no Brasil – Capital Ecológico, Uso e Conservação**. São Paulo: Escrituras, 1999. cap. 14.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Drinking water treatment plant residuals**. 2011.

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

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet**. Solid Waste and Emergency Response. EPA 542-F-03-015. Agency (5102G). 2003. Disponível em: <<http://www.epa.gov/tio/download/remed/epa542f03015.pdf>> Acesso em: 01 jun 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Fact sheet on evapotranspiration cover systems for waste containment**. Office of solid waste and emergency response. EPA-542-F-11-001. Cincinnati: USEPA, 2011. 26p.

VILAR, M. O. **Geossintéticos em Aplicações Ambientais**. 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Porto Alegre, 2003. 18 p.

WANG, M. C.; HULL, J. Q.; JAO, M. Stabilization of water treatment plant sludge for possible use as embankment material. **Transportation Research Record**, n. 1345, p. 36-43, 1992.

WIECHETECK, G. K. PROGRAMA PARANAENSE DE PESQUISAS EM SANEAMENTO AMBIENTAL (PPPSA). Fundação Araucária / Sanepar. Anexo I – Roteiro Descritivo da Proposta, 2022.

YANG, C.; SHENG, D.; CARTER, J. P. Computers and Geotechnics. **Journal Homepage**. v.41, p.36-56, 2012.