**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

KEMMYLLE SANNY DE MATOS FERREIRA

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS DE ARGILA LATERITICA COM
LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA
PARA USO EM OBRAS DE TERRA**

**SÃO PAULO
2020**

KEMMYLLE SANNY DE MATOS FERREIRA

VERSÃO REVISADA

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS DE ARGILA LATERÍTICA COM
LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA
PARA USO EM OBRAS DE TERRA**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Geotécnica

Orientadora: Profª. Drª. Maria Eugênia Gimenez
Boscov

SÃO PAULO

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Ferreira, Kemmylle Sanny de Matos

Comportamento Geotécnico de Misturas de Argila Laterítica com Lodo de Estação de Tratamento de Água para Uso em Obras de Terra / Kemmylle Sanny de Matos Ferreira; orientadora, Maria Eugênia Gimenez Boscov. – 2020 90 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Versão original

1. Lodo. 2. Estação de Tratamento de Água. 3. Argila Laterítica. 4. Geotecnia Ambiental

FERREIRA, K. S. M. Comportamento Geotécnico de Misturas de Argila Laterítica com Lodo de Estação de Tratamento de Água para Uso em Obras de Terra. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2020.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

“Mil nações
Moldaram minha cara.
Minha voz,
Uso pra dizer o que se cala.
O meu país
É meu lugar de fala.”

Elza Soares, 90 anos

“O trabalho é mérito honroso que a
capacidade oferece a todos.
Naturalmente virão o troféu da
missão realizada e a satisfação do
dever cumprido.”

Vera Lúcia Ferreira, 51 anos

"O perigo é quando políticos e
CEOs estão fazendo parecer que
uma movimentação real está
ocorrendo quando, na verdade,
quase nada é feito além de
contabilidade inteligente e relações
públicas criativas."

Greta Thunberg, 17 anos

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha orientadora, Dra. Maria Eugênia Gimenez Boscov, por toda paciência, compreensão e tempo dedicado ao longo da construção desse trabalho.

Agradeço imensamente à equipe do Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade de São Paulo, Antônio Heitzmann e Valdineia Silva, por todo o auxílio na realização dos ensaios, pelos cafés e conversas de tarde.

Agradecimento especial ao mestre e doutorando Edy Montalvan, sem o qual esta pesquisa não teria sido possível. Obrigada pelo apoio e companheirismo.

Aos meus companheiros de jornada, Alex Nowak, Caique Almeida, Danilo Vettorello, Juliana Tsugawa, Lívia Borges, Phillipe Stankevicius, Robinson Garcia e Túlio Ferreira, obrigada por todo conhecimento transmitido e amizade construída.

À minha família, Vera Lúcia Ferreira, Humblay Souza, Sattylla Sanny e Adolpho Ferreira, pelo apoio diário e incondicional.

Aos professores doutores Façal Massad, José Avesani, Marcos Futai, Roque Piveli e Sidney Ferreira, que me inspiraram com suas aulas e ensinamentos.

À CAPES, FAPESP e SABESP, pelo apoio financeiro.

RESUMO

A produção de lodo nas estações de tratamento de água é abundante e crescente. Dada a necessidade da correta destinação desse resíduo, este trabalho propõe-se a definir as propriedades geotécnicas de misturas solo:lodo para uso em obras de terra. O solo estudado é uma argila laterítica residual de diabásio, pertencente a uma classe de solos de larga ocorrência no estado de São Paulo, e o lodo é proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) de Cubatão (SP). Ambos foram caracterizados química, mineralógica e geotecnicamente. As misturas, preparadas em três traços solo:lodo (4:1, 3:1 e 2:1, em massa úmida), foram submetidas aos ensaios de compactação, compressão simples, adensamento, compressão triaxial e permeabilidade. Avaliou-se ainda o efeito da secagem prévia das misturas por meio dos ensaios de compactação e compressão simples. A inserção de lodo no solo argiloso provocou redução na fração argila em até 5%, e consequente redistribuição nas frações silte e areia fina, além do aumento dos limites de liquidez e plasticidade. Nos ensaios de compactação, a adição de lodo causou redução da massa específica aparente seca e aumento do teor de umidade ótimo, porém, com a secagem prévia, observou-se recuperação parcial dos parâmetros do solo. Os parâmetros de resistência à compressão simples das misturas solo:lodo são, em média, 40% inferiores aos obtidos para o solo. A recuperação quase total da resistência ocorreu para graus de secagem de 50% das misturas. Nos ensaios de adensamento, as misturas compactadas no ponto ótimo partem de índice de vazios inicial maior do que o solos, porém não se observaram grandes incrementos aos baixos valores de índice de compressão e recompressão típicos de solos compactados. Os ensaios triaxiais evidenciaram que o acréscimo de lodo eleva o desenvolvimento de poropressões, e consequentemente reduz a tensão desviadora máxima. Há tendências de decréscimo da coesão e elevação do ângulo de atrito (de 15 para 6 kPa e de 34° para 39° para a mistura M 4:1, respectivamente). O coeficiente de permeabilidade das misturas solo:lodo foram ainda menores que o do solo (em torno de 10^{-10} m/s), com potencial uso para coberturas e revestimentos de fundo de aterros sanitários.

Palavras-chave: Lodo, Estação de Tratamento de Água, Argila Laterítica, Geotecnia Ambiental.

ABSTRACT

The generation of water treatment sludge (WTS) is substantial and has an upward trend. Given the need for appropriated destination for this waste, this work aims to define the properties of soil:sludge mixtures in order to use WTS as a geotechnical material. The soil analyzed is a lateritic residual clay of diabase, with wide occurrence in São Paulo State (SP); the sludge was collected at Cubatão Water Treatment Plant (SP). Both materials were chemical, mineralogical and geotechnically characterized. The mixtures, prepared at three soil:sludge proportions (4:1, 3:1 and 2:1 by wet mass), were submitted to compaction, uniaxial compression, consolidation, triaxial compression and permeability tests in order to determine deformability, compressibility and resistance properties. The effect of previous drying was also evaluated by compaction and uniaxial compression tests. The addition of sludge to the soil reduced the clay fraction in 5% and increased the liquid and plasticity limits. In the compaction tests, WTS addition to the soil reduced the maximum dry unit weight and increased the optimum water content, but previous drying of the mixtures guaranteed a partial recovery of the soil parameters. The uniaxial compression strength of the mixtures is, in average, 40% lower than that of the soil. A nearly total recovery was observed for drying ratio equal or higher than 50%. In the consolidation tests, the initial void ratio of the mixtures was higher than that of the compacted soil, however WTS addition did not provoke a great increase in compressibility, and the low values of compression and recompression indexes are coherent with compacted soils. The triaxial compression tests showed higher porepressures for the mixtures, and consequently reduction of the maximum deviator stress. There is a tendency of reduction of the effective cohesion and an increase of the effective friction angle (from 15 down to 6 kPa and from 34 up to 39 kPa, for M 4:1, respectively). The permeability coefficients of the mixtures were lower than the soil (around 10^{-10} m/s), with potencial use as material covers and bottom liners of sanitary landfills.

Keywords: Water treatment sludge, Water treatment plant, Lateritic clay, Environmental Geotechnics.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	LODO DE ETA	5
2.1.1	COMPOSIÇÃO	7
2.1.2	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA	7
2.1.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA	8
2.1.4	COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO	10
2.2	MISTURAS DE LODO COM SOLO	14
2.3	APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS	16
2.3.1	ATERRO SANITÁRIO	16
2.3.2	REATERRO DE VALAS	19
2.3.3	OBRAS EM ATERRO	19
2.3.4	MUROS DE SOLO REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	LODO	21
3.1.1	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO LODO	22
3.1.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO	23
3.1.3	CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL DO LODO	24
3.2	SOLO	24
3.3	MISTURAS	27
3.4	PROGRAMA DE ENSAIOS	27
3.4.1	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	28
3.4.2	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	29
3.4.3	ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	29
3.4.4	ENSAIO DE ADENSAMENTO	29

3.4.5	ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL.....	30
3.4.6	ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	30
4	RESULTADOS.....	31
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	31
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MINERALÓGICA DO LODO.....	31
4.1.2	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO.....	31
4.1.3	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DAS MISTURAS	33
4.2	PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DOS MATERIAIS.....	35
4.2.1	COMPACTAÇÃO.....	35
4.2.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	40
4.2.3	ADENSAMENTO	45
4.2.4	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	47
4.2.5	PERMEABILIDADE	52
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES.....	56
6	RECOMENDAÇÕES DE ESTUDOS FUTUROS.....	58
	REFERÊNCIAS	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica do solo	32
Gráfico 2 – Carta de plasticidade com a indicação do solo	33
Gráfico 3 – Curvas granulométricas do lodo, solo e misturas solo:lodo	34
Gráfico 4 – Carta de plasticidade com indicação do solo e misturas solo:lodo	35
Gráfico 5 – Curvas de compactação do solo e misturas solo:lodo	36
Gráfico 6 – Curvas de compactação das misturas solo:lodo para diversos graus de secagem	37
Gráfico 7 – Variação dos parâmetros de compactação em função do teor de umidade pós-secagem das misturas	38
Gráfico 8 – Variação dos parâmetros de compactação em relação ao grau de secagem das misturas	39
Gráfico 9 – Correlações entre os parâmetros ótimos de compactação de Kuczynski (1950), Bernucci (1995), Villibor e Nogami (2009) e das amostras ensaiadas	40
Gráfico 10 – Ensaio de compressão simples para o solo e misturas	41
Gráfico 11 – Ensaio de compressão simples para o solo e a mistura 4:1 com diferentes graus de secagem	43
Gráfico 12 – Variações dos parâmetros do ensaio de compressão simples em função do grau de secagem para o solo e misturas:(a) resistência à compressão simples média; (b) deformação axial média na ruptura	44
Gráfico 13 – Curvas de adensamento do solo e das misturas (em função do índice de vazios e da deformação axial dos corpos de prova)	45
Gráfico 14 – Variação de C_c e C_r em função do teor de lodo (em massa seca)	46
Gráfico 15 – Resultados do ensaio triaxial CIU para o solo	49
Gráfico 16 - Resultados do ensaio triaxial CU para as misturas	49
Gráfico 17 – Variações do ângulo de atrito e da coesão das amostras	52
Gráfico 18 – Coeficiente de permeabilidade para a amostra de solo	53
Gráfico 19 – Coeficiente de permeabilidade para a amostra M 4:1	53
Gráfico 20 – Coeficiente de permeabilidade para a amostra M 3:1	54
Gráfico 21 – Coeficiente de permeabilidade para a amostra M 2:1	54

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Produção diária de lodo de ETA em diversas localidades	6
Tabela 2 – Variação das condutividades hidráulicas (k, em m/s)	15
Tabela 3 - Requisitos para cobertura de aterro sanitário.....	18
Tabela 4 – Caracterização geotécnica do lodo da ETA Cubatão (Lotes 1 e 2)	22
Tabela 5 – Caracterização química do lodo de Cubatão (Lotes 1 e 2)	24
Tabela 6 – Caracterização geotécnica do solo.....	25
Tabela 7 – Propriedades geotécnicas do solo	26
Tabela 8 – Caracterização química do solo	26
Tabela 9 – Proporções de materiais nas misturas analisadas (em massas úmida e seca) ..	27
Tabela 10 – Ensaios geotécnicos realizados	28
Tabela 11 – Graus de secagem.....	28
Tabela 12 – Caracterização do lodo de Cubatão (Lote 7)	31
Tabela 13 – Caracterização geotécnica do solo.....	32
Tabela 14 – Propriedades geotécnicas do solo.....	33
Tabela 15 – Caracterização geotécnica do solo e misturas solo:lodo	34
Tabela 16 – Parâmetros de compactação.....	35
Tabela 17 – Parâmetros obtidos no ensaio de compactação para o solo e misturas com diversos graus de secagem	36
Tabela 18 – Equações de correlação entre os parâmetros de compactação (teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca) e o grau de secagem (ξ) das misturas.....	39
Tabela 19 – Equações das correlações entre os parâmetros ótimos de compactação	40
Tabela 20 – Parâmetros de compressão axial	40
Tabela 21 – Parâmetros do ensaio de compressão simples para amostras de solo e da mistura 4:1 com diferentes graus de secagem.....	42
Tabela 22 – Parâmetros obtidos no ensaio de adensamento.....	46
Tabela 23 – Tensão de pré-adensamento induzida pela compactação (em kPa) do solo e misturas.....	47
Tabela 24 – Parâmetros de compactação dos corpos de prova utilizados no ensaio triaxial	48
Tabela 25 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e misturas	51
Tabela 26 – Parâmetros dos corpos de prova utilizados no ensaio de permeabilidade.....	52
Tabela 27 – Coeficientes de permeabilidade k_{20} do solo e misturas	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A produção do lodo é inerente ao processo de tratamento de água para abastecimento público. Segundo a ABNT NBR 12216:1992, o dimensionamento de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) deve levar em consideração o gerenciamento do resíduo desde o projeto de locação até sua disposição final.

De acordo com Silva (2017), a preocupação com a disposição do lodo se intensifica a partir de duas principais normativas, a ABNT NBR 10.004:2004 e a resolução CONAMA nº430/2011. A primeira define lodo proveniente de ETA como resíduo sólido e implica a necessidade de sua classificação como resíduo perigoso (classe I) ou não perigoso (classe II), a depender das características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade e das concentrações dos constituintes lixiviados. No caso de ser classe II, ainda é possível classificá-lo como inerte ou não inerte, a depender das concentrações dos constituintes solubilizados.

A resolução CONAMA nº430/2011, por sua vez, além de dispor sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, proíbe a alteração das características originais do corpo receptor, classificado segundo a resolução CONAMA nº357/2005. Além disso, especifica-se a carga máxima poluidora referente às substâncias que podem estar presentes nos efluentes, assim como valores de pH, temperatura, quantidade de óleos e graxas e DBO ideais aos efluentes a serem lançados (BRASIL, 2011). No caso de águas de classe especial, ou seja, aquelas destinadas ao consumo humano ou à preservação de ambientes naturais, é proibido o lançamento de qualquer efluente (BRASIL, 2005). Hoppen et al. (2005) destacam que, mesmo que a composição do lodo derive do processo erosivo do solo nos mananciais, o tratamento químico necessário para sua remoção nas ETAs demanda a destinação correta para não impactar negativamente o meio ambiente.

Considerando o aumento da demanda por água potável e a poluição dos mananciais (por assoreamento, lançamento inadequado de fertilizantes e esgoto etc.), a produção de lodo é crescente ao longo dos anos. Januário e Ferreira Filho (2007) analisaram dados de sete ETAs¹ da Região Metropolitana de São Paulo, e estimaram um aumento de 28,6% na produção de lodo até 2025 nessas estações. Com base nos dados disponibilizados pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), a qual é responsável por 240 ETAs, são produzidos 119 mil litros de água potável por segundo e 193

¹ ETAs Guaraú, ABV, Taiapuêba, Rio Grande, Casa Grande, Morro Grande e Baixo Cotia.

toneladas do resíduo por dia em massa seca². A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), responsável pela fiscalização do correto manejo do resíduo, tem exigido a destinação adequada do lodo de ETA, o que pode promover atitudes semelhantes nos respectivos órgãos fiscalizadores dos demais estados brasileiros.

Achon *et al.* (2013) valem-se de diversos estudos para atestar que o Brasil ainda é um país onde o destino predominante do lodo é o corpo d'água mais próximo. Com base em dados disponibilizados em 2009 pelo Ministério Público do Estado de Minas Gerais, atestou-se que nos 175 municípios avaliados, 87% das ETAs lançam o lodo em corpos d'água sem tratamento e apenas 3% possuem unidades de tratamento do resíduo (UTR). Nas UTRs, o lodo passa por um processo lento de filtração e posterior disposição em leitos de secagem para destinação final em aterros sanitários ou estações de tratamento de esgoto (SAAE, 2019).

Em países onde a destinação do lodo é estudada e avaliada há mais tempo, a principal alternativa tem sido os aterros sanitários (exclusivos ou não). No caso dos Estados Unidos, essa porcentagem é de 33%, seguida por aplicação no solo (25%) e descarga em estações de tratamento de esgoto (24%). Já na França, além da aplicação em aterro sanitário (13%), a maior porcentagem é utilizada em obras, como diques, substituição de matéria prima de materiais da construção civil e compostagem (52%). No Reino Unido, aplica-se o lodo no solo e na recuperação de áreas degradadas (9%), mas a maior porcentagem ainda é disposta em aterro sanitário (52%). (CORNWELL, MUTTER e VANDERMEYDEN, 2000; ADLER *et al.*, 2002; SIMPSON *et al.*, 2002 apud FERREIRA e MORITA, 2009).

A aplicação do lodo de ETA na agricultura mostra-se ineficiente por promover a indisponibilização do fósforo e fitotoxicação por alumínio (no caso de lodos com coagulante sulfato de alumínio) em solos mais ácidos (DAYTON e BASTA, 2001; GANDARA, BERTON e FERNANDES, 2010). Já no campo da construção civil, busca-se o aproveitamento em blocos cerâmicos não estruturais (MORITA *et al.*, 2002; OLIVEIRA, MACHADO e HOLANDA, 2004; TEIXEIRA, 2006; TORRES, HERNANDEZ e PAREDES, 2012) e na matriz do concreto (HOPPEN, 2006) pela substituição parcial de componentes. Um estudo mais recente considerou, ainda, a comercialização do lodo como insumo de tintas de parede (AMBIPAR, 2018). Na pavimentação, a adição de lodo no solo de base e subbase pode ser viabilizada com estabilizantes como cal, cimento ou betume (FADANELLI e WIECHETECK, 2010 e LUCENA *et al.*, 2014).

² Produção de lodo (em t/dia) estimada pela relação média entre os valores de produção de água potável (m³/s) e geração de lodo (t/dia) nas ETAs Guaraú, ABV, Taiaçupeba, Rio Grande, Casa Grande, Baixo Cotia, Alto Cotia e Cubatão.

A disposição em aterros sanitários tem sido estudada em três vertentes: análises ambientais de lixiviação e contaminação (GUERRA e ANGELIS, 2005), análise das propriedades do material para compor a cobertura diária do aterro (PRIM, 2011; RODRIGUEZ, 2011; TAKADA, 2013; SILVEIRA, KOGA e KURODA, 2013) e estudo da estabilização de taludes de maciços compostos por solo e lodo (WU, ZHOU e GALE, 2007).

Nota-se, no entanto, que a discussão sobre alternativas sustentáveis de aplicação do lodo de ETA, nacionalmente, é bastante recente (a partir dos anos 2000). Por um lado, foram identificados riscos ambientais resultantes do lançamento direto do resíduo, cuja produção é abundante e crescente. Por outro lado, há várias questões ainda em aberto, dadas a variabilidade das propriedades do resíduo e suas diversas possibilidades de uso. Justifica-se essa pesquisa científica, a qual busca verificar a efetividade do reuso de lodo de ETA misturado a um solo laterítico argiloso em obras geotécnicas.

Este trabalho dá continuidade ao projeto “Viabilização da utilização do lodo de ETA como material de cobertura de aterros sanitários e na construção de aterros em solos compactados”, aprovado no edital “PESQUISA EM PARCERIA PARA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA - ACORDO DE COOPERAÇÃO ENTRE FAPESP E SABESP” (Projeto FAPESP-SABESP 13/50448-8 e 17/24056-6), desenvolvido conjuntamente pela Escola Politécnica da USP, Instituto Tecnológica da Aeronáutica (ITA) e Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

As demais pesquisas que contemplam esse projeto determinaram as características mineralógicas, físico-químicas e geotécnicas e analisaram o efeito tixotrópico do resíduo, além da influência da adição de cal ou solo arenoso e a viabilidade de utilização do resíduo como cobertura diária de aterros sanitários (MONTALVAN, 2016; MONTALVAN e BOSCOV, 2016; SILVA, 2017; TSUGAWA, PEREIRA e BOSCOV, 2017; PEREIRA, TSUGAWA e BOSCOV, 2018; MONTALVAN e BOSCOV, 2018; SILVA e HEMSI, 2018; MONTALVAN e BOSCOV, 2019; FERREIRA et al., 2019).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é verificar a viabilidade técnica do reuso de lodo de ETA misturado a um solo laterítico argiloso em obras geotécnicas.

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Caracterizar geotecnicamente misturas de solo laterítico argiloso e lodo da ETA Cubatão em três traços diferentes;
- Analisar a influência da adição do lodo nas propriedades geotécnicas do solo, levando em consideração a secagem prévia das misturas;
- Verificar a viabilidade da utilização das misturas solo:lodo em obras geotécnicas.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. No primeiro, contextualizou-se a problemática que envolve o tema da pesquisa, com os respectivos objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo é composto pela revisão bibliográfica sobre os objetos desse estudo: lodo e as misturas, além das aplicações em obras geotécnicas. No terceiro, serão detalhadas as características dos materiais utilizados e os métodos adotados para aquisição dos parâmetros requeridos.

No quarto capítulo, apresentam-se os resultados obtidos confrontados com os respectivos valores de referência e, no quinto e último, destacam-se as considerações finais com propostas de estudos futuros e ressalvas da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LODO DE ETA

O atual sistema de tratamento de água consiste em diversas etapas nas quais a água recolhida dos mananciais ou represas é convertida em própria para o consumo humano. Esses processos são realizados em local específico denominado Estação de Tratamento de Água (ETA), gerido por empresas públicas ou privadas.

O ciclo de tratamento de água ocorre inicialmente com a captação e bombeamento da água bruta. A água é canalizada para estruturas de floculação, decantação e filtração, para retirada das partículas sólidas. A floculação ocorre a partir de mistura lenta da água; na decantação, a gravidade separa os flocos da água; e, na filtração, a água passa em tanques formados por pedras, areia e carvão antracito, os quais reterão as partículas em suspensão restantes da fase anterior.

Para aumentar a eficiência dessas etapas, a SABESP (2018) realiza três processos químicos antes da floculação: pré-cloração, pré-alkalinização e coagulação. O primeiro consiste na adição de cloro para retirar matéria orgânica e metais; o segundo, na adição de cal ou soda para ajuste do pH; e o terceiro, na adição de sulfato de alumínio, cloreto férrico ou outro coagulante com posterior agitação forte da água para desestabilizar eletricamente as partículas suspensas e torná-las mais fáceis de agregar.

Após a filtração, as últimas etapas às quais a água é submetida são: pós-alkalinização, desinfecção e fluoretação. Na primeira, tem-se a correção final do pH da água, para evitar a corrosão ou incrustação das tubulações; na desinfecção, adiciona-se pela última vez o cloro para garantir a isenção de bactérias e vírus; e, por fim, na fluoretação, adiciona-se flúor para prevenção de cáries dentárias na população.

A geração do lodo ocorre nos tanques decantadores e nos filtros, sendo removido durante a lavagem dos mesmos de forma manual, hidráulica ou com raspador mecânico (ABNT NBR 12216:1992). Segundo Cabral (2013), a quantidade de lodo advindo dos decantadores é de, aproximadamente, 60 a 95% do total de resíduo produzido pela ETA, sendo o restante oriundo do processo de filtração.

A Tabela 1 apresenta a produção diária de lodo obtida na literatura para algumas ETAs. A variação entre os valores das diferentes estações e em uma mesma ETA deve-se, principalmente, à quantidade de sólidos em suspensão totais (SST), turbidez, cor, coagulantes e aditivos (KATAYAMA, 2012). Nota-se a elevada quantidade de lodo seco produzido diariamente na ETA Taiaçupeba (18,2 toneladas), sendo também a de maior capacidade de geração de água potável dentre as ETAs analisadas.

Tabela 1 – Produção diária de lodo de ETA em diversas localidades

Localidade	t/dia (em peso seco)	Referência	Capacidade média
ETA Illawarra (Austrália)	0,184	Gharaibeh (2009)	2,43 m ³ /s
ETA Jersey (EUA)	3,6	Basim (1999)	2,72 m ³ /s
ETA Casa Grande (SP – Brasil)	4,4	Januário e Ferreira Filho (2007)	3,92 m ³ /s
ETA Cubatão (SP – Brasil)	2,5 a 5,0	Katayama <i>et al.</i> (2015)	4,20 m ³ /s (*)
ETA Taiaçupeba (SP – Brasil)	18,2	Januário e Ferreira Filho (2007)	9,60 m ³ /s

(*) Dado obtido de Ribeiro e Cordeiro (2005)

A alta variabilidade do teor de sólidos do lodo é dependente da qualidade de água, quantidade de sólidos suspensos retirados, equipamentos de agitação, método de desaguamento (remoção parcial da água) e tipo de coagulante adicionado (RAGHU et al., 1987). Por exemplo, a ETA Cubatão capta água de rio, enquanto a ETA Taiaçupeba utiliza água de represa.

Como o resíduo é retirado dos decantadores e dos filtros por lavagem, o lodo é um material praticamente em fase líquida, contendo 95% de seu volume em água (MONTALVAN, 2016). A fim de garantir a redução no custo de transporte, existem alguns processos de desaguamento que reduzem substancialmente o volume para uso posterior.

Segundo Basim (1999), para diversas ETAs nos Estados Unidos (EUA), o teor de sólidos do lodo é de 1 a 2% antes do desaguamento. Em processos como leitos de secagem e centrifugação, tanto para lodos de coagulantes de ferro como de alumínio, ocorre elevação do percentual de sólidos para, aproximadamente, 20 a 25% (CORNWELL, 2006). No entanto, processos de secagem ao ar ou em estufa são ainda bastante prolongados e custosos.

Gharaibeh (2009) analisou o método de desaguamento de lodos de coagulante férrico por meio de leito de secagem a fim de prever e otimizar o tempo e as áreas necessárias. O autor levou em consideração as condições meteorológicas, espessura da camada, área do leito e coeficiente de transferência de calor convectivo do material.

Dentre outras possíveis alternativas de desaguamento, Gruninger (1975) analisou alguns sistemas mecânicos presentes em três ETAs (Shoremont, Kodak e Sturgeon Point) no oeste do estado de Nova York (EUA), as quais utilizam alumínio como coagulante. O autor conclui que os filtros a vácuo (em Kodak e Sturgeon Point) e as centrífugas (em

Sturgeon Point) produziam concentrações de sólidos entre 20 a 30%, enquanto os filtros prensa (em Shoremont e Sturgeon Point) geravam lodo com teor de sólidos (TS) entre 40 e 50%.

O autor avaliou ainda a influência do TS inicial do lodo no processo de desaguamento. Para tanto, na ETA (Kodak) foi instalado um tanque de desaguamento preliminar (1,5 x 4,6 x 2,4 m), onde o TS inicial pode ser elevado, em média, de 0,3% para 3-6%. Considerando o desaguamento por centrífugas, o TS final do resíduo aumentou de 18% para 24-28%, para o lodo que passou previamente nesse tipo de tanque e teve seu TS inicial elevado de 1-2% para 3%.

Em trabalho mais recente, Avancini (2017) analisou o método de desaguamento por sistemas de confinamento do lodo de ETA em bolsas ou tubos em geotêxtil. A autora avaliou a influência do tipo e dosagem de aditivos durante o condicionamento químico no desempenho do sistema. Para os dois lodos analisados, nos ensaios em bolsa de pequena dimensão (que simula o procedimento de desaguamento), o teor de sólidos final do lodo foi da ordem de 10 a 15%. Com a adição de 2,0 g de polímero por quilo de lodo seco, esse valor passou para cerca de 20%. A autora observou perda de umidade maior com polímero para 24 h de ensaio (portanto, mais rápida), porém o valor final não se alterou muito com as diversas condições experimentais.

2.1.1 COMPOSIÇÃO

A composição dos lodos de ETA relaciona-se com aqueles materiais que são retirados da água bruta durante o tratamento. Fazem parte do resíduo: materiais inertes como argila e areia, materiais orgânicos em solução ou suspensão, microrganismos variados, sais de alumínio e ferro provenientes dos coagulantes, além de outros compostos químicos.

O lodo possui aspecto gelatinoso, alto teor de umidade e é altamente compressível, além de ser tixotrópico. A tixotropia é a redução da viscosidade a partir da agitação da amostra e aplicação de esforços de cisalhamento, a qual é recuperada quando a amostra está em repouso (RAGHU et al., 1987; WANG et al., 1992; XIA, 1994; O'KELLY, 2010; TSUWAGA, PEREIRA e BOSCOV, 2017).

Há, no entanto, variações significativas nos comportamentos mineralógico, físico-químico e geotécnico desse resíduo a depender do coagulante utilizado no processo de floculação, da fonte da água bruta e do nível de desaguamento (perda parcial de água) a qual ele foi submetido.

2.1.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Sendo o lodo composto basicamente por partículas de solo, produtos químicos, matéria orgânica e água, sua composição mineralógica está muito relacionada com as

partículas coloidais suspensas dos corpos d'água dos quais a ETA recebe a água bruta para tratamento.

Xia (1994) comenta que o mineral carbonático mais abundante é a calcita (CaCO_3), a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é encontrada em regiões mais áridas e os minerais secundários mais importantes são os filossilicatos. Ainda segundo Xia (1994), são também importantes constituintes os óxidos alofanos (mineraloide silicato de alumínio hidratado mal cristalizado), os quais podem ser compostos por Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 hidratados e possuir alto CTC e superfície específica. Filossilicatos, alofanos e aditivos químicos podem ter grande impacto nas propriedades dos resíduos de ETA.

Montalvan (2016) destaca que os sólidos do lodo são predominantemente partículas de solo. Nos resíduos analisados pelo autor, o quartzo esteve sempre presente (BASIM, 1999; ROQUE e CARVALHO, 2006; TEIXEIRA et al., 2011 e WATANABE et al., 2011). Santos et al. (2000), na caracterização de lodo da ETA São Leopoldo (RS), identificaram por difração de raios-X, além da presença de quartzo ou sílica (SiO_2), argilominerais do grupo das caulinitas ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), feldspato e traços de hematita (Fe_2O_3).

Oliveira et al. (2004), em análise ao lodo proveniente da ETA Campos dos Goytacazes (RJ), encontraram além da caulinita, óxidos de silício, alumínio e ferro, os quais compunham cerca de 80% do resíduo. Teixeira et al. (2006) identificaram no lodo da ETA Presidente Prudente (SP) caulinita e mica como os principais minerais presentes, além das fases montmorilonita, quartzo, óxido de titânio e gipsita, observadas em menores concentrações.

Segundo Xia (1994), a presença de argilominerais e outros coloides influencia a plasticidade, coesão, expansibilidade e contração, e capacidade de troca catiônica (CTC) do lodo. Os argilominerais normalmente não reagem quimicamente durante os processos de tratamento de água.

2.1.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

A caracterização física e química dos lodos de ETA compreende a determinação do teor de sólidos (orgânicos e inorgânicos), capacidade de troca catiônica (CTC), composição química (para determinação dos metais presentes) e pH. Por tratar-se de resíduos, adicionam-se os ensaios de lixiviação (NBR 10.005) e solubilização (NBR 10.006) utilizados para a classificação dos resíduos sólidos (NBR 10.004) segundo a ABNT.

Os sólidos inorgânicos (fixos) são aqueles provenientes dos minerais que compõem as frações argila, silte ou areia. Já os sólidos orgânicos (voláteis) indicam a presença de compostos orgânicos no resíduo e são obtidos por ensaio de perda ao fogo com a queima na mufla a 550°C por uma hora (SABESP, 1999).

Basim (1999) ressalta que as partículas orgânicas podem ser adsorvidas intensamente nas superfícies dos minerais e essa adsorção modifica as propriedades de ambos. Com alto teor de umidade, a matéria orgânica decomposta pode ser um sistema expansivo reversível. Com grau de secagem elevado, a reversibilidade cessa e pode ocorrer redução nos limites de Atterberg.

A CTC é uma propriedade que indica a quantidade de cátions trocáveis do solo, e é expressa em meq/100g (miliequivalentes por 100g de material seco) ou cmol_c/kg (centimoles de cátions por kg de material seco). Indica a presença de cargas negativas, atribuídas às partículas coloidais (argilominerais), com capacidade de retenção de água (moléculas polares) e cátions. De acordo com Hsieh e Raghu (1997), para lodos de ETAs norte-americanas com diferentes coagulantes, foram registrados valores entre 2,20 e 13,48 cmol_c/kg. Já Oliveira et al. (2004) registram para ETA Campos dos Goytacazes, CTC igual a 0,99 cmol_c/kg.

Os coagulantes utilizados nos processos de tratamento da água são, em geral, o alumínio, cloreto férrico, sulfato férrico e cal. Esses aditivos são utilizados para promover a agregação coloidal pela destruição das forças que estabilizam as partículas coloidais. A floculação ocorre com o choque entre as partículas coloidais desestabilizadas, unindo-se durante os processos de sedimentação e desaguamento (BASIM, 1999). São comumente encontrados na análise química, portanto, elementos como alumínio, ferro, cálcio e silício.

Teixeira et al. (2006) encontraram na composição do lodo de ETA Presidente Prudente (SP), a base de coagulante férrico, os seguintes metais pesados: chumbo, cromo, zinco, manganês, alumínio, ferro e cobre. Além desses, Santos et al. (2000) identificaram também a presença de titânio na ETA São Leopoldo (RS). Townsend et al. (2001) avaliaram quimicamente 28 lodos coletados dos leitos de secagem ou pilhas de estocagem de 26 ETAs no Estado da Flórida (EUA) e, apesar da grande variação entre os valores encontrados, todos possuíam concentração de arsênio muito acima dos limites de exposição direta estipulados pela norma local (0,8 e 3,7 mg/kg para regiões residenciais e industriais, respectivamente).

Em termos de pH, a variabilidade dos valores encontrados na literatura ocorre não apenas entre as ETAs analisadas, mas para lodos de uma mesma ETA em momentos diferentes. No entanto, em geral, como atestado por O'Kelly (2016) em compilação de alguns estudos, os valores de pH variam de 7 a 8. Lodos com pH mais elevado (meio básico, pH>7) propiciam a imobilização de metais pesados e a biodegradação (em condições adequadas de temperatura, nutrientes e água), e, por sua vez, um pH mais baixo (meio ácido, pH<7) permite a lixiviação de materiais pesados (HSIEH e RAGHU, 1997; USEPA, 1986 apud MONTALVAN, 2016).

Os ensaios ambientais se propõem a identificar a ocorrência da liberação de metais pesados que possam contaminar a área em que o lodo será disposto, como nos estudos sobre reuso do lodo em coberturas de aterro sanitário comentados a seguir. Raghu et al. (1987) concluíram que para o lodo da ETA Jersey (EUA) não foram encontradas no lixiviado quantidades acima do recomendado para metais pesados e matéria orgânica, habilitando o resíduo para uso em cobertura de aterro sanitário do ponto de vista ambiental.

Silveira, Koga e Kuroda (2013) analisaram lodos de coagulante de ferro e alumínio e atestaram que o extrato lixiviado apresentou parâmetros ainda aceitáveis pela ABNT NBR 10.004:2004. Já no extrato solubilizado, o manganês e fenóis totais ficaram acima do limite exigido, classificando os resíduos das ETAs Cafezal e Tibagi (PR) como classe II A – não inertes. Santos et al. (2000) obtiveram a mesma classificação para o lodo da ETA São Leopoldo (não inertes), mas sugerem que o material possa ser utilizado na construção civil por não apresentar características de periculosidade e não ser patogênico.

O estudo de Townsend et al. (2001) atestou concentrações de manganês e íons inorgânicos no lixiviado acima das normas de concentrações de água subterrânea da Flórida (EUA) em alguns dos 28 lodos analisados, além da concentração substancial de ferro e alumínio, já esperados devido ao uso dos coagulantes nos processos de tratamento de água. Não foram excedidos, no entanto, os limites correspondentes aos sólidos orgânicos, voláteis ou semivoláteis.

2.1.4 COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO

A caracterização geotécnica engloba os ensaios para obtenção dos limites de Atterberg, da curva granulométrica e da massa específica dos grãos. Além disso, o comportamento geotécnico é estimado pelos ensaios de compactação, adensamento, resistência ao cisalhamento e permeabilidade.

Xia (1994) comenta que o comportamento geotécnico do lodo de ETA depende não apenas dos sólidos, como também da quantidade e composição química da fase líquida, considerando-se as diferentes formas com que a água pode estar ligada aos sólidos do lodo de ETA (livre, no interior de flocos, capilar e adsorvida), a variação no teor de umidade causa alteração na estrutura de flocos, no tamanho das partículas, na concentração de íons e na formação de complexos. Portanto, quando a estrutura e teor de sólidos se alteram, ocorrem interações entre as fases sólida e líquida, como a cimentação, as quais afetam as propriedades geotécnicas.

Raghu et al. (1987) analisaram o lodo da ETA Jersey (EUA) na saída do filtro prensa para verificação de uso em cobertura de aterro. O resíduo, de coagulante alumínio, é composto pelas frações granulométricas areia e silte e apresenta massa específica dos

grãos igual a $1,9 \text{ g/cm}^3$. Não foi possível a determinação dos limites de Atterberg devido à baixa trabalhabilidade do resíduo. O teor de umidade ótimo foi estimado em 70% e massa específica aparente seca máxima em $0,82 \text{ g/cm}^3$ na energia normal. A permeabilidade (k) variou de $2,5 \times 10^{-6}$ a $2,0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ para índices de vazios (e) entre 1,43 a 1,76. A relação entre os parâmetros $\log k$ versus e é linear crescente.

Wang et al. (1992) analisaram três lodos norte-americanos, sendo um de coagulante férrico e dois de alumínio. O limite de liquidez (LL) para os lodos de coagulante alumínio foram 423 e 550%, enquanto o de cloreto férrico foi 108%, indicando a elevada compressibilidade dos resíduos, classificados como MH. O índice de compressão (Cc) para os lodos de coagulante alumínio foi de 5,29 a 6,69 e para o lodo de coagulante ferro foi de 1,99. Os parâmetros de resistência, por outro lado, foram bastante similares: a coesão efetiva dos três lodos ficou entre 6,89 e 8,27 kPa e o ângulo de atrito efetivo entre $42,3$ a $44,0^\circ$ para teores de sólidos entre 10 a 40%. Já em termos da relação umidade-densidade, o lodo de coagulante férrico exibiu a típica curva de compactação convexa (teor de umidade ótimo 45% e massa específica aparente seca máxima $1,13 \text{ g/cm}^3$), enquanto o lodo de alumínio não demonstrou curva no formato de sino, impedindo a obtenção dos parâmetros de compactação no ponto ótimo.

Wang et al. (1992) analisaram também a estabilidade de um talude de aterro sanitário com diferentes declividades e alturas hipotéticas a fim de verificar a viabilidade da disposição do lodo como material de cobertura. Considerando as propriedades de resistência do lodo (coesão, ângulo de atrito e resistência não drenada), buscou-se determinar o teor de sólidos mínimo necessário para garantir a estabilidade da estrutura. Concluiu-se que, no caso do lodo de coagulante férrico, seria necessária maior quantidade de sólidos do que para o de alumínio. Para altura do talude igual a 12,2 metros e declividade de 12,5%, o primeiro requereu teor de sólidos mínimo igual 47%, enquanto o segundo, apenas de 18 a 25%.

As características de lodos de ETAs com diferentes coagulantes também foram analisadas por O'Kelly (2016). O autor concluiu que há significativa diferença entre os limites de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) para lodos de coagulante férrico (LL = 110% e IP = 60%) e de coagulante de alumínio (LL = 200 a 600% e IP = 100 a 300%). O autor atribuiu a maior plasticidade e alta capacidade de retenção de água do segundo caso à presença do aluminato de cálcio hidratado e sulfato de alumínio hidratado.

Wang e Tseng (1993) investigaram a influência da estabilização de um lodo de coagulante de alumínio com cal cinza volante (*flyash*) na proporção de 60% de aditivo em massa seca. Inicialmente, as amostras de lodo foram retiradas do processo de desaguamento por centrífuga e caracterizadas geotecnicamente. As frações granulométricas do lodo correspondem a silte e argila, LL igual a 550% e LP igual a 239%,

além de massa específica dos grãos de $2,26 \text{ g/cm}^3$, sendo classificado como CH. As misturas de lodo-cal e lodo-*flyash* apresentaram LL igual a 272 e 305%, respectivamente.

Os autores analisaram ainda a variação do coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios através do ensaio de adensamento. Conclui-se que a permeabilidade do lodo estabilizado (com cal ou *flyash*) é consideravelmente maior do que o lodo não estabilizado. Segundo os autores, o aumento da permeabilidade com a adição dos estabilizantes ocorre devido à formação de uma estrutura mais floculada (mais aberta), a qual eleva o índice de vazios. Para o lodo não estabilizado, obtiveram-se índices de vazios entre 7 e 17 e coeficientes de permeabilidade variando entre $3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ e $8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Para índice de vazios igual a 7, a permeabilidade do lodo não estabilizado e estabilizado (com cal ou *flyash*) são, respectivamente, 4×10^{-6} e $2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Obteve-se, também, relação linear entre $\log k$ versus e para ambos os casos.

Xia (1994) analisou as características geotécnicas de 10 lodos de diferentes ETAs norte-americanas e para os valores de massa específica dos grãos (G_s), obteve um intervalo entre 1,87 a 2,71 ($2,51 \pm 0,27$, $n = 10$). O autor ressalta que, para os argilominerais, G_s varia de 2,70 a 2,85, com média 2,75. Portanto, os lodos estudados apresentaram G_s inferior ao dos argilominerais, provavelmente devido à presença de matéria orgânica (sugerida pelos valores elevados de perda ao fogo e compostos voláteis) e aditivos químicos.

O estudo de Xia (1994) contempla ainda resultados de compactação, resistência ao cisalhamento direto e à compressão simples e adensamento. As curvas de compactação indicaram massas específicas secas máximas entre $0,54$ e $1,46 \text{ g/cm}^3$ e teores de umidade ótimos entre 50 a 80% para energia normal. Observou-se alteração de propriedades de algumas das amostras previamente secas ao ar. Quatro dos 10 lodos ensaiados não apresentaram curvas de compactação usuais, mas apenas uma relação linear crescente entre a massa específica seca e teor de umidade de compactação. O autor atribui esse fato ao fenômeno da cimentação. Durante a secagem, a água é removida gradativamente dos espaços onde se encontra, havendo perda da interação entre as partículas nesses locais e o surgimento de novas forças intermoleculares, associadas à adsorção de íons (Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , etc.) antes dissolvidos na água, que causam o aumento no tamanho das partículas. As novas partículas, que não são separadas com a adição de água por ser um processo irreversível, possuem maiores massas específicas secas, modificando o formato usual da curva de compactação.

A resistência ao cisalhamento mostrou relação diretamente proporcional com o teor de sólidos e inversamente proporcional com a plasticidade. Os coeficientes de permeabilidade obtidos em ensaios de adensamento variaram de 7×10^{-6} a $9 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. As curvas de adensamento não apresentaram o comportamento típico de solos, aparentemente com elevado adensamento secundário, o que dificultou a determinação dos parâmetros. Os

valores estimados do índice de compressão variaram de 0,10 a 4,48, de não compressíveis a altamente compressíveis (XIA, 1994).

Segundo Wang, Hull e Jao (1992), as informações sobre resistência ao cisalhamento do lodo concentram-se majoritariamente na determinação da resistência não drenada através do ensaio de palheta (*vane test*). Alguns estudos obtiveram relações diretas entre a resistência não drenada e o teor de sólidos (NOVAK e CALKINS, 1975 e HUANG, 1979 *apud* WANG, HULL e JAO, 1992; SILVA e HEMSI, 2018). Wang, Hull e Jao (1992) determinaram a resistência ao cisalhamento por meio do ensaio de cone de laboratório e triaxial adensado não drenado (CU – *consolidated undrained*), e atestaram que o lodo possuía alto valor de ângulo de atrito interno efetivo (42°) e baixa resistência não drenada (1 kPa, que pode ser elevada a 20 kPa com o aumento do teor de sólidos de 13 para 25%).

Roque e Carvalho (2006) analisaram o lodo de uma ETA em Portugal. Foram utilizadas amostras em teor de umidade residual (3-4%), obtido por secagem em estufa a $50-60^\circ\text{C}$, para os ensaios geotécnicos, e em teor de umidade natural, retiradas diretamente do filtro de correia (*belt filter*), para os ensaios de lixiviação. A caracterização geotécnica constatou 21% de fração argilosa, 65%, siltosa e 14%, arenosa. O material foi classificado como MH, LL igual a 108% e LP, 82%.

No ensaio de compactação Proctor normal, Roque e Carvalho (2006) determinaram massa específica aparente seca máxima de $0,63\text{ g/cm}^3$ e teor de umidade ótimo de 84%. Além disso, o coeficiente de permeabilidade obtido com os parâmetros de Proctor normal foi igual a 10^{-7} m/s . O ensaio triaxial adensado não drenado (CU) resultou em coesão efetiva de 77 kPa e ângulo de atrito igual a 44° .

Nos ensaios de lixiviação, realizados para verificar a possibilidade de impacto ambiental, os autores concluíram que o resíduo pode ser usado como material geotécnico por suas propriedades e por não ser fonte de poluição.

Silva e Hems (2018) observaram diferenças significativas nos limites de Atterberg do lodo da ETA Cubatão (SP) coletados em março (LL = 156% e LP = 85%) e setembro de 2016 (LL = 228% e LP = 75%). Os autores atribuíram este fato à variação das concentrações de coagulante férrico. A curva de compactação do lodo de março mostrou-se altamente dependente do procedimento do ensaio, isto é, com ou sem secagem prévia. O lodo seco ao ar até a umidade higroscópica $w_i = 26\%$ e compactado por molhagem apresentou massa específica aparente seca máxima de $1,39\text{ g/cm}^3$ e teor de umidade ótimo de 38%. Já com secagem até $w_i = 100\%$ e compactação a partir do ramo úmido por secagem sucessiva, a curva de compactação não se apresentou em formato de sino e a massa específica aparente seca, correspondente ao teor de umidade de 38%, é igual a $1,10\text{ g/cm}^3$.

2.2 MISTURAS DE LODO COM SOLO

Devido aos altos teores de umidade, à elevada compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento, a utilização direta de lodo de ETA torna-se técnica e economicamente inviável (RAGHU et al., 1997). Misturas do lodo com solos abrem a possibilidade de amplo uso em obras geotécnicas. O lodo pode ser aproveitado em coleta direta dos filtros e decantadores ou após algum processo de desaguamento.

Wang, Hull e Jao (1992) realizaram ensaios de adensamento com uma mistura de solo:lodo na proporção 1:1,67 em massa seca para utilização como material de aterro para pavimentação ou diques. O solo utilizado foi uma areia argilosa (SC). O lodo provinha da ETA de Chesapeake (Virginia – EUA), onde era utilizado coagulante à base de alumínio. O índice de compressão (C_c) da mistura, igual a 4,04, corresponde a solos altamente compressíveis. A resistência não drenada da mistura solo:lodo (2,07 kPa) foi 28% menor que a do solo (2,90 kPa).

Raghu et al. (1997) estudaram a influência da adição de lodo no solo utilizando dois lodos de ETAs do Canadá. O solo ensaiado possuía massa específica dos grãos igual a 2,58 g/cm³, LL = 42%, LP = 28%, 86% de finos e foi classificado como CL. O lodo foi adicionado ao solo nas porcentagens de 10%, 30% e 50%, em massa seca, por meio de mistura em betoneira, variando-se assim o teor de sólidos (TS) das misturas. Observou-se que a adição de lodo reduziu a massa específica dos grãos e aumentou os limites de Atterberg. Para o traço intermediário e TS da mistura igual a 25%, a massa específica dos grãos média foi igual a 2,50 g/cm³, LL = 55%, LP = 38% e 78% de finos.

Nos ensaios de adensamento, Raghu et al. (1997) obtiveram índices de compressão muito similares entre as misturas, da ordem de 0,10. O coeficiente de adensamento elevou-se levemente com o aumento do acréscimo de lodo, com valores ainda próximos ao coeficiente de adensamento do solo ($3,4 \times 10^{-7}$ m²/s):. Para as três porcentagens de lodo (TS igual a 60%) foram obtidos os valores de $5,1 \times 10^{-7}$, $7,8 \times 10^{-7}$ e $8,3 \times 10^{-7}$ m²/s, respectivamente.

Aldeeb et al. (2003) analisaram a viabilidade de usar misturas de solo residual argiloso e lodo proveniente da ETA de Arlington (Texas - EUA) como cobertura de aterro sanitário. O lodo passava pelos processos de sedimentação, desaguamento e secagem, atingindo teor de sólidos final igual a 60%. A adição de solo ao lodo provocou aumento da massa específica dos grãos, da resistência à compressão simples, do ângulo de atrito e da coesão pelo ensaio de cisalhamento direto. Reduziram-se os limites de Atterberg e os teores de umidade. Na compactação, houve redução do teor de umidade ótimo e aumento da massa específica aparente seca. Os autores concluíram que a melhor combinação foi 20% de resíduo e 80% de solo natural, em massa seca e no teor de umidade ótimo.

Para lodos mais secos observa-se elevado potencial de uso, apesar de haver um custo de secagem intrinsecamente associado. Montalvan (2016) buscou viabilizar a utilização geotécnica de lodo saído de centrífugas (teor de sólidos entre 20-25%). A metodologia experimental compreendeu a caracterização e a determinação de propriedades geotécnicas de misturas de solo arenoso fino de Botucatu (SP) e lodo da ETA Cubatão em diversas proporções (3:1, 4:1 e 5:1, em massa úmida). Os resultados mostraram que, com a adição de lodo, o ângulo de atrito efetivo aumentou, de 34° (solo) a 37° (mistura 3:1), e a coesão diminuiu, de 22 kPa (solo) a 10 kPa (mistura 3:1). Por outro lado, o índice de compressão (C_c) aumentou, de 0,07 para o solo a 0,19 para a mistura 3:1, indicando que as misturas são mais compressíveis do que o solo. O índice de recompressão (C_r) não variou, mantendo-se igual a 0,02 mesmo com a adição de lodo.

Observou-se também que a secagem prévia da mistura resulta em aumento da massa específica seca máxima e diminuição do teor de umidade ótimo de compactação. Os parâmetros de compactação podem ser obtidos por correlação linear com o teor de umidade após a secagem (MONTALVAN e BOSCOV, 2016).

Em um trabalho mais recente, ainda utilizando solo arenoso proveniente de Botucatu (SP) e lodo da ETA Cubatão nas mesmas proporções, Montalvan e Boscov (2018) observam que os valores de condutividade hidráulica das misturas 5:1 e 4:1 são ligeiramente menores que a do solo, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Variação das condutividades hidráulicas (k , em m/s)

Amostra	k (m/s)	Tensão confinante (kPa)
M 5:1 e M 4:1	$0,4 \times 10^{-6}$ a $3,0 \times 10^{-6}$	30
	$0,9 \times 10^{-7}$ a $1,6 \times 10^{-7}$	60
Solo	$1,0 \times 10^{-6}$ a $7,0 \times 10^{-6}$	30
	$4,3 \times 10^{-7}$	60

Fonte: Adaptado de Montalvan e Boscov (2018)

A mistura 3:1, a de maior proporção de lodo, apresentou a condutividade hidráulica mais baixa, de $7,0 \times 10^{-9}$ m/s sob tensão confinante de 30 kPa e gradiente igual a 5. Neste caso, ao se elevar o gradiente para 10 e a tensão confinante para 60 kPa, a condutividade hidráulica da mistura 3:1 diminuiu até cessar a percolação, provavelmente devido à colmatação dos poros do solo e do filtro. Os autores apontam que a mistura 3:1, em massa úmida, tem potencial para utilização como material de revestimento de fundo (camada de impermeabilização) em aterros sanitários, uma vez que a permeabilidade é baixa e tende a diminuir com o tempo.

Gonçalves et al. (2016) também avaliaram a utilização de mistura de solo e lodo como material de barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. O lodo é proveniente da ETA Cafezal (Londrina – PR) e foi desaguado em leito de drenagem. A ETA em questão utiliza cloreto férrico hexahidratado como coagulante. Os solos argiloso (LL = 52% e IP = 38%) e arenoso (LL = 31% e IP = 15%) são do interior do estado do Paraná (Londrina e Mandaguaçu, respectivamente) e compuseram traços solo:lodo de 1:0,5 e 1:1 para o solo argiloso e 1:0,25 para o arenoso, todos em massa úmida. Os principais ensaios geotécnicos realizados foram compactação e permeabilidade.

A adição de lodo no solo arenoso reduziu a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$), de 1,86 g/cm³ (solo natural) para 1,80 g/cm³ (traço 1:1), e elevou o teor de umidade ótimo ($w_{ót}$), de 14,0% para 14,5%, respectivamente. No caso do solo argiloso, $\rho_{dm\acute{a}x}$ aumentou de 1,43 g/cm³ (solo natural) para 1,45 g/cm³ (traço 1:1), enquanto $w_{ót}$ diminuiu de 32,4% para 31,8%, respectivamente. O coeficiente de permeabilidade de todas as amostras, naturais ou misturas, apresentou-se na faixa de 10^{-10} e 10^{-9} m/s. Pelo critério de permeabilidade, há grande potencial de utilização do solo como parte das barreiras impermeabilizantes, contribuindo para impedir a percolação dos líquidos gerados no aterro sanitário para o subsolo.

2.3 APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS

Roque e Carvalho (2006) destacam diversas obras geotécnicas onde a aplicação do lodo pode ser possível e vantajosa: aterros sanitários (cobertura diária, intermediária ou de fundo), infraestruturas rodoviárias e viárias, aterro sobre solos moles, cobertura final de aterro sanitário e barragem de rejeitos. Embora os autores se refiram a lodo seco em estufa, portanto em forma de agregado, essas sugestões também são interessantes para misturas solo-lodo, que podem tornar o lodo *in natura* um material com propriedades geotécnicas adequadas.

Serão apresentadas a seguir algumas dessas alternativas de utilização do lodo de ETA a partir dos parâmetros mínimos requeridos a cada uma delas. Os parâmetros referem-se, de forma geral, às características geotécnicas, físico-químicas e geoambientais.

2.3.1 ATERRO SANITÁRIO

Os aterros sanitários são obras que geralmente provocam esgotamento de recursos naturais, uma vez que utilizam grandes volumes de solos originados de jazidas naturais para cobertura diária, revestimento de fundo e cobertura final. Estima-se que o volume de solo no aterro chegue a 20% do volume total (BENVENUTO e BOSCOV, 2013). A utilização das misturas solo:lodo para cobertura diária, que é uma camada sem função estrutural, cujo objetivo é impedir a proliferação de vetores, espalhamento dos resíduos no entorno e

redução de odores, é a ideia mais promissora e com maior facilidade de aceitação por parte do órgão ambiental regulador – CETESB – e pela opinião pública.

A redução da necessidade de áreas de empréstimo de solo natural para cobrimento dos resíduos sólidos urbanos poderia compensar economicamente o transporte do lodo ao aterro e impedir o descarte do mesmo em mananciais.

Nenhuma especificação técnica quantitativa é apresentada a respeito das propriedades geotécnicas das camadas de coberturas, nem mesmo as normas brasileiras relativas à implantação, projeto e operação de aterros sanitários. A ABNT NBR 13.896:1997 indica, apenas, que a cobertura final do aterro deve “minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não estar sujeita à erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir coeficiente de permeabilidade inferior ao do solo natural da área do aterro”.

Apesar de não serem mencionadas nesta norma, recomendações em relação às coberturas diárias, entende-se que o material deva ser não poluente, de trabalhabilidade adequada para espalhamento, que forme camada protetora em relação ao espalhamento de resíduos no entorno do aterro e ao acesso de vetores, que não constitua camada potencial de ruptura e que evite o aporte de líquido ao interior do maciço sanitário.

A Tabela 3 apresenta parâmetros geotécnicos definidos por distintos autores para cobertura de aterros sanitários. Destaca-se que, se a porcentagem passante na peneira #200 (0,075 mm) for maior que 50%, o solo já é considerado fino (silte ou argila) pelo Sistema de Classificação Unificada de Solos (ASTM D2487-11).

Tabela 3 - Requisitos para cobertura de aterro sanitário

Parâmetro	Referência				
	ROCCA et al (1993)	U.S. EPA (1993)	QASIM e CHIANG (1994)	ABNT NBR 13896/97	QIAN KOERNER e GRAY (2002)
SUCS (*)	CL, CH, SC ou OH	-	-	-	SC
% P #200 (**)	> 30%	-	> 40%	-	-
k (***)	$< 10^{-9}$ m/s	$< 10^{-7}$ m/s	$< 10^{-9}$ m/s	$< 5 \times 10^{-7}$ m/s	$< 10^{-9}$ m/s
LL (***)	> 30%	-	> 25%	-	-
IP (***)	> 15%	-	> 10%		< 50%

(*) Sistema Unificado de Classificação dos Solos;

(**) Porcentagem passante na peneira #200 (0,075 mm);

(***) k = coeficiente de permeabilidade, LL = limite de liquidez e IP = índice de plasticidade.

Fonte: Pimentel (2012)

No revestimento de fundo de aterros sanitários, é comum a utilização de camada de argila compactada (CCL – *compacted clay liner*), geralmente associada a geomembrana. Para que um solo argiloso seja considerado adequado para a impermeabilização de base de aterros, as seguintes características devem ser atendidas: resistência de cisalhamento e deformabilidade compatíveis com o peso de aterro a ser suportado, coeficiente de permeabilidade baixo (menor que 10^{-9} m/s) quando compactado, compatibilidade química em longo prazo com o lixiviado produzido na massa de resíduos, alta capacidade de adsorção e baixo coeficiente de difusão (ISSMGE, 2006).

A permeabilidade é, portanto, um parâmetro importante a ser considerado em qualquer revestimento (fundo ou cobertura final) do aterro sanitário, já que a baixa permeabilidade reduz as possibilidades de contaminação do aquífero e infiltração de água no maciço sanitário. Na cobertura diária, contudo, a baixa permeabilidade pode impedir o movimento do percolado em direção ao dreno de fundo, ocasionando a formação de bolsões ou “lençóis suspensos” de lixiviado. O aumento da fração fina está diretamente relacionado à redução da permeabilidade, dessa forma, a adição de finos inerentes ao lodo é favorável no caso dos revestimentos impermeabilizantes.

2.3.2 REATERRO DE VALAS

Outra opção para o uso das misturas solo:lodo é a utilização em reaterro de valas. Fortes (2009) mostra que, apesar das reações entre o lodo úmido e o solo serem complexas, a mistura entre os dois pode ser eficaz para a estabilidade do reaterro de valas.

Dependendo das solicitações a que será submetido o material na vala reaterrada, as misturas de solo e lodo podem ser materiais viáveis. Segundo DER/PR (2006), o solo para reaterro deve possuir CBR $\geq 2\%$, expansão $< 4\%$, possuir pouca ou nenhuma matéria orgânica e de qualidade superior ao terreno adjacente. Além disso, a compactação do material deve ser realizada no ponto ótimo da curva de compactação Proctor normal, com variação do teor de umidade aceitável de -2% a $+1\%$ e grau de compactação mínimo de 95%.

2.3.3 OBRAS EM ATERRO

As propriedades geotécnicas principais requeridas para projeto e análise de desempenho do lodo na construção de aterros compactados são compressibilidade, permeabilidade e resistência ao cisalhamento (Wang, Hull e Jao (1992). Gruninger (1975) destaca ainda a importância do teor de sólidos do lodo para que este possa ser facilmente manipulado por equipamentos de movimentação e escavação de terra. Em análise de lodos de quatro ETAs do estado de Nova Iorque (EUA) que utilizam alumínio como coagulante, este autor constatou que com teor de sólidos igual a 20% (em massa), a consistência do resíduo se assemelha à de uma argila mole. Já para teores entre 40 e 50% (em massa), a consistência observada no campo era similar à de uma argila muito dura.

Silva e Hemsí (2018), com o objetivo de quantificar o efeito do teor de sólidos na resistência não drenada, confirmaram experimentalmente para o lodo da ETA Cubatão a relação exponencial entre esses parâmetros sugerida por Wang et al. (1992). Ademais, adotando o valor de referência de resistência não-drenada (10 kPa) sugerido por Wang et al. (1992) para uso em obras de terraplenagem em termos de trabalhabilidade, os autores estimaram para o lodo da ETA Cubatão o valor mínimo necessário de teor de sólidos igual a 47%, correspondente a 112% de teor de umidade.

Misturas solo-lodo, no entanto, possivelmente terão menos problemas de espalhamento e compactação do que o resíduo somente, segundo indicam os resultados de Raghu et al. (1997), Montalvan e Boscov (2016), Wang, Hull e Jao (1992) e Aldeeb et al. (2003).

2.3.4 MUROS DE SOLO REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS

Segundo Gonçalves (2016), a recomendação mais comum internacionalmente para a construção de muros de solos reforçados com geossintéticos (MSRG) é a utilização de solos granulares (AASHTO, 2002; FHWA, 1998 e BS8006, 1995). No entanto, o autor destaca que a utilização de solos finos vem sendo bem-sucedida no Brasil desde 1984. A constatação de que os solos finos lateríticos, formados em clima tropical, possuem resistência mais elevada e menor expansibilidade em contato com a água do que solos de igual classificação geotécnica formados em clima temperado, é apresentada pelo autor como contraponto à limitação normativa internacional.

Nogami e Villibor (1995) mostram que os solos lateríticos podem apresentar bom comportamento geotécnico, com elevada resistência ao cisalhamento, baixa compressibilidade e baixa expansibilidade. Solos LG' (laterítico e argilosos), quando compactados, possuem elevado CBR sem imersão e baixa perda por imersão, baixa expansão, média a elevada contração e baixo coeficiente de permeabilidade. O sucesso de muros de solo reforçados com geossintéticos utilizando solos finos tropicais pode ser ampliado com misturas desses solos com lodo em proporções adequadas mantendo-se os parâmetros de resistência e deformabilidade.

Gonçalves (2016) analisou a influência da coesão e ângulo de atrito na estabilidade de um muro a partir da modelagem numérica para solos de diversos tipos (SC, SM, ML, MH e CL). No caso do solo CL (coesão de 15 kPa e ângulo de atrito de 28°), a altura limite foi de 7 metros para reforços com rigidez de 11 kN/m, característico de geotêxtil não tecido. Já para reforços com geotêxtil tecido (rigidez de 100 kN/m), a altura limite foi superior a 15 metros. Os ábacos apresentados por Ehrlich e Becker (2009) para dimensionamento de muros reforçados com geossintéticos contemplam a necessidade de ângulos de atrito entre 30 e 40°. Devido à redução da coesão e aumento do ângulo de atrito com o acréscimo de lodo ao solo, deve-se prezar pela otimização do traço da mistura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LODO

O lodo utilizado nesta pesquisa é proveniente da estação de tratamento de água ETA Cubatão, selecionado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e que vem sendo intensamente estudado no projeto de pesquisa FAPESP-SABESP 13/50448-8 e 17/24056-6 (MONTALVAN e BOSCOV, 2019; SILVA e HEMSI, 2018; MONTALVAN e BOSCOV, 2018; SILVA, 2017; TSUGAWA, PEREIRA e BOSCOV, 2017; PEREIRA, TSUGAWA e BOSCOV, 2018; MONTALVAN e BOSCOV, 2016; MONTALVAN, 2016), além de outros estudos que tiveram esse lodo como objeto de estudo para aplicação em blocos cerâmicos, análise da gestão operacional dos processos da ETA e estimativa de produção de lodo (MORITA et al., 2002; RIBEIRO e CORDEIRO, 2005; KATAYAMA et al., 2015).

A ETA Cubatão possui capacidade de produção de água potável de 4,2 m³/s. A geração do lodo ocorre durante a lavagem de sete decantadores e quatorze filtros. Os decantadores são lavados a cada 40 a 45 dias e os filtros, a cada 12 horas (Montalvan, 2016). A água de lavagem dos filtros é direcionada a um tanque de decantação, onde o lodo é adensado e posteriormente bombeado para o tanque de estocagem, onde está também o lodo proveniente dos decantadores. Neste tanque, ocorre adensamento por gravidade e, posteriormente, remoção pelo fundo do tanque e bombeamento para as máquinas desaguadoras.

A ETA Cubatão coleta água de mananciais situados na bacia hidrográfica da Baixada Santista, onde a ocupação é 20% urbana, 10% agrícola e 70% de floresta (SABESP, 2012). A estação utiliza cloreto férrico como coagulante (SILVA e HEMSI, 2018) e produz 2,5 a 5,0 toneladas/dia de lodo em massa seca (KATAYAMA et al., 2015) e 60 a 70 toneladas/dia em massa úmida (SILVA e HEMSI, 2018).

Morita et al. (2002) e Tsugawa et al. (2017) identificaram as fases cristalinas nesse resíduo sendo compostas por, essencialmente, mica, goethita, quartzo, calcita e caulinita. Quanto à presença de matéria orgânica, o lodo da ETA Cubatão possui entre 5,5 a 8,1%. Segundo Montalvan (2016), a fração de argila é igual a $4,4 \pm 1,1\%$; fração de silte, $64,5 \pm 4,3\%$; e, fração de areia, $31,0 \pm 5,0\%$. O teor de sólidos com o qual o resíduo foi recebido para estudo era de 18 a 20%.

A caracterização do lodo utilizado neste trabalho é bastante conhecida, apesar de variações inerentes à geração dos lodos de ETA. A coleta foi feita na saída das centrífugas da ETA Cubatão, com teor de sólidos entre 25 a 30% e teor de umidade entre 225 e 300% (SILVA e HEMSI, 2018). Montalvan e Boscov (2018) classificaram o lodo da ETA Cubatão

como MH (siltes inorgânicos, finos arenosos ou solos siltosos pela Classificação Unificada dos Solos).

Especificamente no tempo de elaboração dos ensaios apresentados, o lodo estava com teor de umidade de 270% e advém de um lote denominado “Lote 7”, de fevereiro de 2018. Pereira, Tsugawa e Boscov (2018) compilaram dados mineralógicos, químicos e geotécnicos dos Lotes 1 e 2, coletados em abril de 2015 e fevereiro de 2016, respectivamente. A caracterização geotécnica obtida pelas autoras está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização geotécnica do lodo da ETA Cubatão (Lotes 1 e 2)

PROPRIEDADE/ COMPOSIÇÃO	LOTE 1 (04/2015)	LOTE 2 (02/2016)
Argila	69,4%	68,0%
Silte	25,7%	18,0%
Areia fina	4,7%	14,0%
Areia média e grossa	0,2%	0,0%
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,85-2,95	2,97
Limite de liquidez (LL)	239%	170%
Limite de plasticidade (LP)	81%	71%
Índice de plasticidade (IP)	158%	99%

Fonte: Pereira, Tsugawa e Boscov (2018)

Nesta dissertação, a coleta e mistura do lodo seguiu metodologia estabelecida por Tsugawa et al. (2019) para que se pudesse obter uma amostra o mais representativa possível considerando as variabilidades de composição do lodo ao longo do tempo. O método estatístico baseia-se na teoria da amostragem e a comprovação da eficácia foi feita através da análise da variância.

3.1.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO LODO

A caracterização mineralógica do solo compreendeu ensaios de difração e fluorescência de raios X, respectivamente, para determinar a composição mineralógica e a composição química dos materiais. Também foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para identificar estruturas e componentes mineralógicos por imagem, associados a espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDS) para caracterizar pontualmente a composição das partículas da amostra. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP (LCT-EPUSP).

Pereira, Tsugawa e Boscov (2018) em análise dos dois diferentes lotes (1 e 2) do lodo da ETA Cubatão, verificaram a presença de quartzo, goetita, muscovita e caulinita.

3.1.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO

A caracterização química do lodo da ETA Cubatão refere-se aos ensaios de pH em H₂O; pH em KCl 1 mol L⁻¹; carbono orgânico (CO) e matéria orgânica (MO) por titulometria; cálcio (Ca) e magnésio (Mg) por extração com acetato de amônio e determinação em espectrofotômetro de absorção atômica; potássio (K) por extração com acetato de amônio e determinação em espectrofotômetro de emissão atômica; sódio (Na) por extração com acetato de amônio e determinação em fotômetro de chama; acidez potencial (H+Al) por extração com acetato de cálcio e determinação por titulometria; alumínio (Al) por extração com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹ e determinação por titulometria; fósforo (P) por extração com Mehlich 1 e determinação por colorimetria. As análises foram realizadas pelo Laboratório de Análise de Solos do Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da USP (LSO-ESALQ) seguindo os métodos da EMBRAPA (1997).

A Tabela 5 apresenta os resultados referentes à análise química do lodo de Cubatão (lotes 1 e 2) compilados por Pereira, Tsugawa e Boscov (2018).

Tabela 5 – Caracterização química do lodo de Cubatão (Lotes 1 e 2)

PROPRIEDADE/ COMPOSIÇÃO	PEREIRA, TSUGAWA E BOSCOV (2018)	
	LOTE 1 (04/2015)	LOTE 2 (02/2016)
Fe ₂ O ₃	46,0%	47,5%
SiO ₂	18,3%	18,6%
Al ₂ O ₃	8,9%	10,1%
Perda ao fogo (%)	22	19
Matéria orgânica (g/kg)	26	- (*)
CTC (cmol _c /kg)	25,52	- (*)
pH (em H ₂ O)	7,2	- (*)
pH (em KCl)	- (*)	- (*)
K Mehlich (cmol _c /kg)	- (*)	- (*)
Na Mehlich (cmol _c /kg)	- (*)	- (*)
Cálcio KCl (cmol _c /kg)	- (*)	- (*)
Magnésio KCl (cmol _c /kg)	- (*)	- (*)
H+Al Acetato de Cálcio (cmol _c /kg)	- (*)	- (*)

(*) Na análise química, não foram requeridos estes valores

Fonte: Pereira, Tsugawa e Boscov (2018)

3.1.3 CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL DO LODO

A caracterização geoambiental foi realizada pelos ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo. As normas que regem os ensaios são ABNT NBR 10.005:2004 e ABNT NBR 10.006:2004, respectivamente.

A primeira refere-se ao procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, fixando os requisitos exigíveis para posterior diferenciação dos resíduos de classe I (perigoso) dos de classe II (não-perigoso). Já a segunda busca a diferenciação dos resíduos de classe II A (não-inertes) dos de classe II B (inertes) por meio dos parâmetros obtidos para o extrato solubilizado de resíduos sólidos.

3.2 SOLO

Nesta pesquisa, foi estudado um solo argiloso laterítico residual derivado de diabásio, coletado no Instituto Agrônomo de Campinas, representativo da classe LG' (DNER CLA 259/96), de grande ocorrência no estado de São Paulo. Este solo já vem sendo pesquisado no Laboratório de Mecânica dos Solos Milton Vargas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LMS-EPUSP) há mais de 15 anos (OLIVEIRA, MENK e ROTTA, 1979; HEMSI, 2001; VELLO, 2001; TSUGAWA, 2004; VEGA, 2016; GABAS et al., 2016).

Segundo Gabas et al. (2016), este solo tem boas propriedades geotécnicas quando compactado, como alta resistência ao cisalhamento, baixa compressibilidade, baixa expansibilidade na presença de água e baixa condutividade hidráulica.

O solo é ainda denominado de Latossolo Roxo e sua cor avermelhada é devida à presença de óxidos de ferro e alumínio, característica de solos laterizados (OLIVEIRA, MENK e ROTTA, 1979). A coleta foi realizada no horizonte B, em profundidade de 15 a 20 cm. Devido à baixa profundidade, notou-se a presença de algumas raízes (VEGA, 2016). Alguns dos principais resultados de caracterização geotécnica deste solo estão apresentados na Tabela 6

Tabela 6 – Caracterização geotécnica do solo

PROPRIEDADE/ COMPOSIÇÃO	HEMSI (2001)	TSUGAWA (2004)	VEGA (2016)	GABAS et al. (2016)
Argila	49%	59% (*)	43%	59% (*)
Silte	30%	14% (*)	34%	14% (*)
Areia fina	15%	21% (*)	18%	27% (*)
Areia média e grossa	6%	6% (*)	5%	6% (*)
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,90	2,87	-	-
Limite de liquidez (LL)	45%	45%	43%	45%
Limite de plasticidade (LP)	30%	30%	-	30%
Índice de plasticidade (IP)	15%	15%	-	15%
Atividade de Skempton	0,31	0,25	-	0,25
Classificação SUCS	CL	ML	ML	-

(*) Valores obtidos conforme ASTM D422.

O comportamento geotécnico do solo está apresentado na Tabela 7, onde constam dados da literatura. Destaca-se que os resultados foram obtidos a partir de amostras de solo em umidade higroscópica, seco ao ar e à sombra, conforme ABNT NBR 6457:2016.

Tabela 7 – Propriedades geotécnicas do solo

PROPRIEDADE/ COMPOSIÇÃO	HEMSI (2001)	TSUGAWA (2004)	VEGA (2016)	GABAS et al. (2016)
Teor de umidade ótimo (%)	26,3	26,3	25,0	26,3
Massa específica seca máxima (g/cm ³)	1,59	1,57	1,59	1,57
Condutividade hidráulica (m/s) (*)	10 ⁻⁹	-	-	10 ⁻⁹

(*) Obtida em corpos de prova compactados no ponto ótimo da curva de compactação, a energia normal.

A caracterização química, obtida por ensaio de fluorescência de raio-X, está apresentada na Tabela 8. Hemsí (2001) utilizou apenas a fração do solo passante na peneira #40 (0,425 mm). Nota-se que as maiores porcentagens em massa são equivalentes aos óxidos de silício, alumínio e ferro.

Tabela 8 – Caracterização química do solo

PROPRIEDADE/ ELEMENTO	HEMSI (2001)	GABAS et al. (2016)
SiO ₂ (*)	27,5%	31,1%
Al ₂ O ₃ (*)	27,0%	23,9%
Fe ₂ O ₃ (*)	25,1%	24,4%
TiO ₂ (*)	2,04%	5,21%
P ₂ O ₅ (*)	0,25%	0,14%
MnO (*)	0,15%	0,14%
Perda ao fogo	10,7 a 15,1%	14,2%
Matéria orgânica (g/kg)	-	25
CTC (mmolc/kg)	-	56,6
pH (em água)	5,3	5,3
pH (em KCl)	4,6	-

(*) Porcentagem em massa

Segundo Nogami e Villibor (1994), na fração argila do solo laterítico, o argilomineral predominante é a caulinita e há elevada presença de óxidos e hidróxidos de ferro e hidróxidos de alumínio. Já na fração areia, encontram-se quartzo, minerais pesados, concentrações lateríticas e torrões não desagregados.

Os elementos químicos refletem na caracterização mineralógica a identificação de minerais como quartzo (SiO₂), caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄), gibbsita (Al (OH)₃) e hematita (Fe₂O₃) (HEMSI, 2001). Gabas et al. (2016) identificaram ainda ilmenita (óxido natural de

ferro e titânio) e magnetita (óxidos de ferro II e III – FeO e Fe₂O₃, respectivamente). Destaca-se, por fim, que o teor de matéria orgânica do lodo e do solo são praticamente iguais, isentando da necessidade de ensaios para obtenção desse parâmetro para as misturas. O valor de, aproximadamente, 25 g/kg é inferior ao de referência descrito pela IAC (2020) para solos argilosos, 31 a 60 g/kg.

3.3 MISTURAS

Os traços das misturas de solo e lodo foram estimados com base nas pesquisas anteriores. A ideia é que a adição gradual do lodo não altere de forma significativa as propriedades do solo, continuando este adequado para utilização em obras de terra. Foram adotadas as proporções 4:1, 3:1 e 2:1 de solo:lodo em massa úmida, estando o solo na umidade higroscópica e o lodo na umidade de coleta na saída da centrífuga.

A Tabela 9 apresenta as porcentagens de utilização de ambos os materiais em massas úmida e seca. Nota-se que a máxima fração de partículas sólidas provenientes do lodo adicionada na mistura é 12,2% (para M 2:1). A partir deste valor, a trabalhabilidade da mistura é comprometida devido ao elevado teor de umidade.

Tabela 9 – Proporções de materiais nas misturas analisadas (em massas úmida e seca)

Designação	Traço	Massa úmida (*)		Massa seca (**)	
		Solo	Lodo	Solo	Lodo
M 4:1	4:1	80,0%	20,0%	93,5%	6,5%
M 3:1	3:1	75,0%	25,0%	91,5%	8,5%
M 2:1	2:1	66,7%	33,3%	87,8%	12,2%

(*) Porcentagem/proporção de solo e lodo na mistura com teores de umidade iniciais: $w_{\text{solo}} = 3\%$ e $w_{\text{lodo}} = 270\%$

(**) Porcentagem/proporção de solo e lodo na mistura, considerando apenas suas fases sólidas

3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS

O objetivo principal deste trabalho é verificar a influência da adição do lodo nas propriedades geotécnicas do solo, considerando os traços estabelecidos (4:1, 3:1 e 2:1). Para tanto, foram realizados os ensaios na Tabela 10. O ensaio de compressão simples foi realizado em triplicata, conforme destacado. E a influência da secagem prévia das misturas foi estudada apenas por ensaios de compactação e compressão simples.

Tabela 10 – Ensaios geotécnicos realizados

Ensaio	Amostra				Secagem prévia
	Solo	M 4:1	M 3:1	M 2:1	
Caracterização	✓	✓	✓	✓	✗
Compactação	✓	✓	✓	✓	✓
Compressão simples (*)	✓	✓	✓	✓	✓
Adensamento	✓	✓	✓	✓	✗
Compressão triaxial	✓	✓	✓	✓	✗
Permeabilidade	✓	✓	✓	✓	✗
Resiliência	✓	✓	✓	✓	✗

Legenda: ✓ = Realizado; ✗ = Não realizado

(*) Ensaio realizado em triplicata

A análise da influência da secagem prévia das misturas nas curvas de compactação e compressão simples baseou-se em três níveis de secagem (inferior, intermediário e superior), conforme Tabela 11. Ressalta-se que o processo de secagem foi realizado de forma natural, ao ar, durante o tempo necessário para que os teores de umidade arbitrados fossem atingidos.

O grau de secagem (ξ) é definido conforme Equação (1). Quanto maior o grau de secagem, menor o teor de umidade da mistura pós-secagem.

$$\xi = \frac{w_{pós-secagem} - w_{mistura}}{w_{mistura}} \quad (1)$$

Onde: $w_{mistura}$: teor de umidade da mistura com $w_{solo} = 3\%$ e $w_{lodo} = 270\%$.

$w_{pós-secagem}$: teor de umidade da mistura após secagem.

Tabela 11 – Graus de secagem

Mistura	Grau de secagem		
	Inferior	Intermediário	Superior
M 4:1	14%	44%	75%
M 3:1	20%	38%	73%
M 2:1	12%	54%	68%

3.4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Os ensaios de caracterização geotécnica foram realizados no LMS-EPUSP e visaram determinar as propriedades físicas do material como teor de umidade (ABNT NBR 16097:2012), limites de Atterberg (ABNT NBR 6459:2017 e ABNT NBR 7180:2016), massa

específica dos grãos (ABNT NBR 6508:1984) e granulometria com uso de defloculante (ABNT NBR 7181:2017).

3.4.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

A realização do ensaio de compactação seguiu as normativas da ABNT NBR 7182:2016. Utilizou-se a energia Proctor Normal, com reuso do material.

3.4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de resistência à compressão simples (ou resistência à compressão não confinada) seguiram os procedimentos estabelecidos pela ABNT (NBR 12770:1992), em triplicata, com velocidade do carregamento de 1%/min.

Os corpos de prova (CPs) foram compactados em equipamento miniatura, seguindo a norma DNER-ME 228/94. O equipamento miniatura produz CPs compactados com diâmetro e altura de 50 mm. Na compactação foram aplicados 4 golpes de cada lado, segundo recomendação da norma para argilas e solos argilosos. Após vedação com filme de PVC, os CPs foram identificados e armazenados por um período mínimo de 24 horas, com o objetivo de garantir homogeneização da umidade.

3.4.4 ENSAIO DE ADENSAMENTO

O ensaio de adensamento, realizado a fim de verificar a compressibilidade das misturas em comparação com o solo, teve como normativas a ABNT NBR 12.007:1990 e a ASTM D2435M-11. Embora seja sabido que solos compactados adensam pouco, o ensaio foi realizado para verificar a variação da deformabilidade entre o solo puro e as misturas com solo.

Os corpos de prova possuíam altura e diâmetros iniciais iguais a 2,00 e 7,13 cm, respectivamente. As amostras consideradas foram, além do solo, as misturas M 4:1, M 3:1 e M 2:1 sem secagem prévia (na própria umidade da mistura).

A moldagem dos corpos de prova foi feita por compactação estática dentro do anel de adensamento com teores de umidade e massas específicas aparentes secas iguais aos obtidas no ponto ótimo pelo ensaio de compactação. A aplicação de carga se deu da seguinte maneira: 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280 e 2560 kPa, respectivamente, com posterior redução de forma equivalente. As tensões de pré-adensamento induzidas pela compactação foram obtidas pelos métodos de Casagrande (1936) e Pacheco e Silva (1970), a título apenas comparativo entre solo puro e misturas com os respectivos acréscimos de lodo.

3.4.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

A resistência ao cisalhamento do solo e das misturas foi determinada por meio do ensaio de compressão triaxial do tipo adensado isotropicamente e não drenado (Isotropically Consolidated Undrained – ICU), com medida de poropressão, seguindo procedimento da norma americana ASTM D4767-04.

A altura e diâmetro dos corpos de prova (CPs) foram, respectivamente, 76 e 38 mm (relação altura/diâmetro igual a 2). Estes foram moldados a partir de CPS compactados no teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima obtidos no ensaio de compactação.

O ensaio consiste em três etapas: saturação, adensamento e cisalhamento. A saturação foi alcançada utilizando contrapressão e os CPs foram considerados saturados quando o valor do parâmetro B de Skempton era igual ou maior que 0,95. Na etapa de adensamento, utilizaram-se três tensões confinantes: 50, 100 e 200 kPa. Por fim, no estágio de cisalhamento, utilizou-se taxa de carregamento igual a 1%/h até se obter deformação axial máxima de 15%.

3.4.6 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Para determinação do coeficiente de permeabilidade, utilizou-se a câmara do ensaio de compressão triaxial, respeitando-se as normas para ensaio em carga constante (ABNT NBR 13292:2014) e com parede flexível (ASTM D5084-16a). Os corpos de prova foram compactados a partir dos parâmetros de compactação determinados a energia Proctor normal (ABNT NBR 7182:2016). Os CPs possuíam diâmetro de 70 mm e relação altura/diâmetro igual a 1.

O gradiente hidráulico utilizado, conforme recomendado pela norma, foi igual a 10. Os CPs foram adensados conforme as três tensões de confinamento do ensaio triaxial (50, 100 e 200 kPa). Por fim, o critério de parada considerado foi a estabilização do coeficiente de permeabilidade em cada estágio.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item serão apresentados os resultados das caracterizações físico-química e mineralógica do lodo assim como a caracterização geotécnica do solo, tido como base comparativa em relação aos resultados das misturas. Também são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica das misturas.

4.1.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MINERALÓGICA DO LODO

Os resultados que caracterizam o lodo do lote 7, objeto de estudo deste trabalho, são apresentados na Tabela 12. O lodo foi coletado em fevereiro de 2019 e apresenta resultados similares aos obtidos por Pereira, Tsugawa e Boscov (2018). Conforme apresentado no item 3.1, as autoras analisaram o mesmo lodo em abril de 2015 e fevereiro de 2016.

Tabela 12 – Caracterização do lodo de Cubatão (Lote 7)

PROPRIEDADE / COMPOSIÇÃO	LOTE 7 (02/2018)
Fe ₂ O ₃	- (*)
SiO ₂	- (*)
Al ₂ O ₃	- (*)
Perda ao fogo (%)	- (*)
Matéria orgânica (g/kg)	24
CTC (cmol _e /kg)	32,15
pH (em H ₂ O)	7,0
pH (em KCl)	5,9
K Mehlich (cmol _e /kg)	0,15
Na Mehlich (cmol _e /kg)	0,40
Cálcio KCl (cmol _e /kg)	26,6
Magnésio KCl (cmol _e /kg)	4,5
H+Al Acetato de Cálcio (cmol _e /kg)	0,9

(*) Na análise química, não foram requeridos estes valores

4.1.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO

A Tabela 13 apresenta a caracterização geotécnica do solo, além dos dados obtidos durante a realização deste trabalho. Conforme o item 3.2, os valores obtidos são consistentes com aqueles apresentados anteriormente por Hemsí (2001), Tsugawa (2004), Veja (2016) e Gabas et al. (2016).

Tabela 13 – Caracterização geotécnica do solo

PROPRIEDADE / COMPOSIÇÃO	Valor
Argila	52%
Silte	22%
Areia fina	12%
Areia média e grossa	14%
Massa específica dos grãos (g/cm^3)	2,98
Limite de liquidez (LL)	45%
Limite de plasticidade (LP)	27%
Índice de plasticidade (IP)	18%
Atividade de Skempton	0,35
Classificação SUCS	CL-ML

(*) Valores obtidos conforme ASTM D422

Ainda em termos de caracterização geotécnica, apresentam-se a curva granulométrica (Gráfico 1) e a carta de plasticidade com a indicação da posição do solo na mesma (Gráfico 2).

Gráfico 1 – Curva granulométrica do solo

Gráfico 2 – Carta de plasticidade com a indicação do solo

Resultados referentes ao ensaio de compactação e permeabilidade são apresentados na Tabela 14. Destaca-se que os resultados foram obtidos a partir de amostras de solo em umidade higroscópica, seco ao ar e à sombra, conforme ABNT NBR 6457:2016.

Tabela 14 – Propriedades geotécnicas do solo

PROPRIEDADE/ COMPOSIÇÃO	Valor
Teor de umidade ótimo (%)	26,0
Massa específica seca máxima (g/cm ³)	1,57
Condutividade hidráulica (m/s) (*)	3×10^{-9} a $1,5 \times 10^{-8}$

(*) Obtida em corpos de prova compactados no ponto ótimo da curva de compactação.

4.1.3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DAS MISTURAS

Para as misturas foram determinadas a distribuição granulométrica (com uso de defloculante), os limites de Atterberg, massa específica e índices correlatos (Tabela 15). Nota-se que a adição do lodo no solo provoca inicialmente redução na fração correspondente à argila, e consequente redistribuição entre as frações de silte e areia fina. Esse fato está associado à formação de grumos devido a alguns componentes químicos (coagulantes e cal) do lodo. Apesar da granulometria do lodo ser essencialmente composta por finos (~98,2%), as partículas aglutinadas se refletem em grãos de diâmetros superiores nas misturas (Gráfico 3).

Tabela 15 – Caracterização geotécnica do solo e misturas solo:lodo

PARÂMETRO	AMOSTRA				
	SOLO	LODO	M 4:1	M 3:1	M 2:1
Argila ($<0,002$ mm)	52,0%	78,1%	44,7%	47,9%	44,7%
Silte ($0,002-0,06$ mm)	21,8%	20,1%	23,2%	20,1%	22,4%
Areia fina ($0,06-0,2$ mm)	12,1%	1,2%	19,4%	19,2%	20,6%
Areia média ($0,2-0,6$ mm)	11,2%	0,4%	10,2%	9,8%	9,6%
Areia grossa ($0,6-2$ mm)	3,0%	0,2%	2,6%	3,0%	2,7%
Massa específica dos grãos (g/cm^3)	2,98	2,94	2,98	2,98	2,98
Limite de liquidez (LL)	45	237	46	50	63
Limite de plasticidade (LP)	27	99	28	35	36
Índice de plasticidade (IP)	18	138	18	15	27
Atividade de Skempton	0,35	1,77	0,40	0,31	0,60
Classificação SUCS	CL-ML	MH	ML	ML-MH	MH

Gráfico 3 – Curvas granulométricas do lodo, solo e misturas solo:lodo

A inserção do lodo, como pode ser observada na Tabela 15, tende a aumentar o limite de liquidez e o limite de plasticidade, e a tornar o solo mais compressível, como mostra o Gráfico 4.

Gráfico 4 – Carta de plasticidade com indicação do solo e misturas solo:lodo

4.2 PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DOS MATERIAIS

Neste item serão apresentados os resultados obtidos para os parâmetros geotécnicos das misturas de solo e lodo.

4.2.1 COMPACTAÇÃO

Os resultados referentes à amostra de solo com umidade higroscópica e às respectivas misturas nos traços 4:1, 3:1 e 2:1 estão apresentados na Tabela 16 e no Gráfico 5. Nota-se que a massa específica aparente seca ($\rho_{d,m\acute{a}x}$) é reduzida, assim como o teor de umidade ótimo ($w_{\acute{o}timo}$) é aumentado, conforme se eleva a porcentagem de lodo no solo.

Tabela 16 – Parâmetros de compactação

Parâmetro	Solo	M 4:1	M 3:1	M 2:1
$\rho_{d,m\acute{a}x}(g/cm^3)$	1,57	1,51	1,47	1,36
$w_{\acute{o}timo}(\%)$	26	29,3	30,1	35,7

Gráfico 5 – Curvas de compactação do solo e misturas solo:lodo

Analizou-se também a influência da secagem prévia das misturas na curva de compactação (Tabela 17 e Gráfico 6), definindo-se para isso o parâmetro grau de secagem (Equação 1). Nota-se certa recuperação dos parâmetros de compactação para os valores do solo natural conforme o aumento do grau de secagem.

Tabela 17 – Parâmetros obtidos no ensaio de compactação para o solo e misturas com diversos graus de secagem

Amostra	Densidade aparente seca máxima, $\rho_{d,máx}$ (g/cm³)	Teor de umidade ótimo, $w_{ótimo}$ (%)	Grau de Secagem. ξ (%)	Teor de umidade pós- secagem (%) (***)
Solo	1,57	26,0	- (*)	3,0
M 4:1	1,51	29,3	0 (**)	19,8
	1,53	28,0	14	18,5
	1,56	26,7	44	11,5
	1,57	26,5	75	5,0
M 3:1	1,47	30,1	0 (**)	24,3
	1,51	28,9	20	20,2
	1,51	27,7	38	15,4
	1,54	28,0	73	6,6
M 2:1	1,36	35,7	0 (**)	34,0
	1,40	34,5	12	30,0
	1,52	28,9	54	15,8
	1,52	28,4	68	11,2

(*) O ensaio de compactação foi realizado na amostra em umidade higroscópica (~3%)

(**) Não houve secagem da amostra, o ensaio foi realizado imediatamente após a mistura

(***) Teor de umidade pós secagem e imediatamente antes do ensaio de compactação

Gráfico 6 – Curvas de compactação das misturas solo:lodo para diversos graus de secagem

A relação entre os teores de umidade pós-secagem e os parâmetros de compactação no ponto ótimo pode ser observada no Gráfico 7 e no Gráfico 8, respectivamente. É possível perceber que a massa específica aparente seca máxima é inversamente proporcional e o teor de umidade ótimo é diretamente proporcional ao teor de umidade pós-secagem.

Gráfico 7 – Variação dos parâmetros de compactação em função do teor de umidade pós-secagem das misturas

Com os resultados apresentados no Gráfico 7, é possível estimar os parâmetros de compactação para qualquer teor de umidade pós-secagem de uma mistura solo:lodo entre traços de massa úmida de 4:1 a 2:1. A validade da estimativa limita-se à utilização do solo especificado neste estudo em umidade higroscópica e do lodo da ETA Cubatão em, aproximadamente, 270%. Seria interessante avaliar, em prosseguimento da pesquisa, a validade dessas relações para diferentes teores de umidade do solo e do lodo.

No Gráfico 8, observa-se novamente a tendência de recuperação dos parâmetros das misturas em direção aos valores do solo natural conforme o aumento do grau de secagem. Tanto a massa específica aparente seca máxima quanto o teor de umidade ótimo das misturas tendem ao valor correspondente aos do solo. Destaca-se ainda a influência acentuada do processo de secagem na mistura M 2:1, dada a maior inclinação da reta. Na Tabela 18 apresentam-se as equações correspondentes às três misturas considerando os parâmetros de compactação em função do grau de secagem (ξ).

Gráfico 8 – Variação dos parâmetros de compactação em relação ao grau de secagem das misturas

Tabela 18 – Equações de correlação entre os parâmetros de compactação (teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca) e o grau de secagem (ξ) das misturas

Amostra	$\rho_{d, \text{máx}} = f(\xi)$	R^2	$w_{\text{ótimo}} = f(\xi)$	R^2
M 4:1	$\rho_{d, \text{máx}} = 0,0007 \xi + 1,5183$	0,94	$w_{\text{ótimo}} = -0,0363 \xi + 28,825$	0,86
M 3:1	$\rho_{d, \text{máx}} = 0,0009 \xi + 1,4798$	0,86	$w_{\text{ótimo}} = -0,0284 \xi + 29,605$	0,67
M 2:1	$\rho_{d, \text{máx}} = 0,0024 \xi + 1,3678$	0,96	$w_{\text{ótimo}} = -0,1144 \xi + 35,707$	0,98

A relação entre os valores de massa específica aparente seca e teor de umidade ótimo das misturas foi comparada a três regressões consagradas na literatura: Kuczynski (1950), Bernucci (1995) e Villibor e Nogami (2009).

A primeira refere-se a uma hipérbole obtida considerando mais de mil ensaios de compactação executados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em solos diversos provenientes de várias partes do Brasil (MASSAD, 2016). A segunda é uma regressão linear com base em 65 resultados de solos lateríticos arenosos LA, areno-argilosos LA' e argilosos LG' compactados em mini-MCV sob energia normal. Já a regressão linear estabelecida por Villibor e Nogami (2009) foi realizada com base em 36 amostras de jazidas no Estado de São Paulo. Os solos do tipo arenoso fino laterítico (SAFL) são utilizados como bases de pavimento e foram compactados em mini-MCV.

A Tabela 19 apresenta as equações dos três autores em conjunto com a regressão obtida neste trabalho para o solo e as misturas solo:lodo, M 4:1, M 3:1 e M 2:1. A partir do Gráfico 9, percebe-se que a linha dos pontos ótimos das amostras ensaiadas (solo e misturas) exhibe inclinação e posição similares à regressão linear proposta por Bernucci (1995), abaixo daquela estimada por Villibor e Nogami (2009) e acima da hipérbole de Kuczynski (1950).

Tabela 19 – Equações das correlações entre os parâmetros ótimos de compactação

AUTOR(A)	EQUAÇÃO	R ²
Kuczynski (1950)	$\rho_{d,m\acute{a}x} = \frac{2,537}{1 + 0,026w_{\acute{o}tim}} \pm 0,05$	-
Bernucci (1995)	$\rho_{d,m\acute{a}x} = 2,262 - 0,026 w_{\acute{o}timo}$	0,922
Villibor e Nogami (2009)	$\rho_{d,m\acute{a}x} = 2,448 - 0,030 w_{\acute{o}timo}$	0,842
A autora (2019)	$\rho_{d,m\acute{a}x} = 2,120 - 0,021 w_{\acute{o}timo}$	0,975

Gráfico 9 – Correlações entre os parâmetros ótimos de compactação de Kuczynski (1950), Bernucci (1995), Villibor e Nogami (2009) e das amostras ensaiadas

4.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A adição de lodo no solo provoca redução significativa da resistência à compressão simples (RCS) e maior deformação axial na ruptura, conforme Tabela 20 e Gráfico 10. A perda de resistência não drenada pode estar relacionada ao aumento do índice de vazios e do teor de umidade, assim como à adição de finos não plásticos.

Tabela 20 – Parâmetros de compressão axial

Parâmetro	Solo	M 4:1	M 3:1	M 2:1
RCS média (kPa)	396 ± 9	219 ± 3	268 ± 4	184 ± 2
Def. axial média (%)	4,9 ± 0,4	6,7 ± 0,7	8,1 ± 0,8	9,7 ± 0,4

Gráfico 10 – Ensaios de compressão simples para o solo e misturas

A análise do efeito da secagem prévia para cada mistura foi realizada para três graus de secagem, conforme a Tabela 21. Todas as amostras foram compactadas nos pontos ótimos, obtidos por suas respectivas curvas de compactação. Os resultados, em triplicata, são apresentados no Gráfico 11.

Tabela 21 – Parâmetros do ensaio de compressão simples para amostras de solo e da mistura 4:1 com diferentes graus de secagem

Amostra	RCS (kPa) (*)		Deformação na ruptura (%)	Grau de secagem, ξ (%)	Teor de umidade inicial, w_i (%) (***)
Solo	405	396 ± 9	5,3	- (**)	25,7
	394		4,5		
	388		4,8		
M 4:1	217	219 ± 3	6,0	0	28,8
	223		6,9		
	218		7,3		
	284	278 ± 7	6,5	14	28,4
	279		6,0		
	271		6,0		
	301	302 ± 5	4,3	44	26,9
	308		3,8		
	298		4,2		
	271	275 ± 10	5,7	75	27,5
	268		5,3		
	286		5,7		
M 3:1	267	268 ± 4	9,0	0	30,4
	264		8,0		
	273		7,4		
	236	236 ± 3	10,7	16	29,0
	232		9,6		
	239		11,5		
	187	187 ± 1	11,8	49	29,5
	186		10,3		
	187		11,0		
	288	284 ± 5	6,5	82	26,8
M 2:1	278		6,2		
	287		6,6		
	185	184 ± 2	9,7	0	36,9
	185		10,1		
	180		9,4		
	207	209 ± 3	12,9	20	34,8
	208		13,6		
	213		10,4		
	225	222 ± 4	11,9	46	30,0
	216		13,8		
	223		15,3		
	267	267 ± 3	10,6	79	28,6
	263		11,7		
	271		8,8		

(*) RCS = Resistência à compressão simples

(**) O ensaio de compactação foi realizado na amostra em umidade higroscópica (~3%)

(***) Imediatamente antes do ensaio de compressão simples

Gráfico 11 – Ensaios de compressão simples para o solo e a mistura 4:1 com diferentes graus de secagem

Conforme o aumento do grau de secagem das misturas, espera-se o aumento da resistência à compressão simples (RCS) e redução da deformação na ruptura. Na prática (Gráfico 12), observou-se que a mistura M 4:1 apresentou $RCS = 219 \pm 3$ kPa (45% menos do que o solo, em média), e máxima recuperação para o grau de secagem intermediário ($\xi =$

44%), $RCS = 302 \pm 5$ kPa, que é 23% menor do que o solo e 37% maior do que o valor sem secagem prévia.

A mistura M 2:1, com maior teor de lodo, apresentou crescimento linear de RCS em função de ξ ($R^2 = 0.96$). A RCS de 184 ± 3 kPa sem secagem prévia (53% menor do que a do solo) aumentou até 267 ± 4 kPa for $\xi = 79\%$ (32% menor do que a do solo e 45% maior do que sem secagem prévia).

A M 3:1, por outro lado, apresentou decréscimo de RCS, do valor inicial 268 ± 5 kPa (32% menor do que o solo) para 187 ± 1 kPa (52% menor do que o solo e 30% menor do que sem secagem prévia) para $\xi = 49\%$. Para $\xi = 82\%$, a RCS atingiu 284 ± 6 kPa (6% acima do que sem secagem prévia). Este comportamento inesperado pode estar associado à microestrutura formada pelos flocos nesta proporção.

Para alto valor de ξ , as três misturas atingiram um valor semelhante de RCS, 275 ± 10 kPa (30% menor do que o solo). As misturas se mostraram mais dúcteis do que o solo. (Gráfico 12). A mistura M4:1 mostrou decréscimo de deformação axial na ruptura em função do aumento do grau de secagem, aproximando-se do comportamento do solo. As misturas M 2:1 e M 3:1, aquelas com maiores teores de lodo, romperam a maiores deformações para os graus de secagem baixo e intermediário. A redução pouco pronunciada só ocorreu para alto grau de secagem. A dispersão nas triplicatas, contudo, foram grandes para essas misturas.

Gráfico 12 – Variações dos parâmetros do ensaio de compressão simples em função do grau de secagem para o solo e misturas: (a) resistência à compressão simples média; (b) deformação axial média na ruptura

A relação altura/diâmetro (H/D) recomendada pela norma de compressão simples é 2, no entanto, em atendimento à norma de compactação em miniatura, os CPs tinham relação H/D igual a 1. Segundo Güneyli e Rüßen (2016), a resistência à compressão simples para

corpos de prova com H/D igual a 2 seria 69% do valor obtido para H/D igual a 1, para solos coesivos. Um único ensaio comparando as duas relações geométricas com o solo resultou em RCS 66% menor para H/D igual a 2, ou seja, um valor muito próximo ao da referência, conforme Equação (2).

$$RCS \left(\frac{H}{D} = 2 \right) = 0,66 * RCS \left(\frac{H}{D} = 1 \right) \quad (2)$$

4.2.3 ADENSAMENTO

Apresentam-se no Gráfico 13 e na Tabela 22 os resultados obtidos no ensaio de adensamento. Inicialmente, há tendência de elevação dos índices de vazios iniciais com o acréscimo de lodo (de 0,85 no caso de solo puro para 1,04, 1,07 e 1,22 para as misturas 4:1, 3:1 e 2:1, respectivamente), denotando maior porosidade das misturas quando comparadas ao solo. Os valores de índice de compressão (C_c) e recompressão (C_r) são baixos, de 0,19 a 0,37 e de 0,034 a 0,049, respectivamente.

Gráfico 13 – Curvas de adensamento do solo e das misturas (em função do índice de vazios e da deformação axial dos corpos de prova)

Em linhas gerais o que se observa é o aumento das deformações finais conforme o acréscimo de lodo, o que é compatível com o crescente índice de vazios iniciais das misturas, já que solos mais porosos tendem a ser mais deformáveis. No Gráfico 13 normalizado, à direita, essa leitura se torna ainda mais clara, onde a mistura com maior porcentagem de lodo M 2:1 é também aquela que apresentou maiores deformações.

Tabela 22 – Parâmetros obtidos no ensaio de adensamento

PARÂMETRO	AMOSTRA			
	SOLO	M 4:1	M 3:1	M 2:1
Índice de vazios inicial (e_0)	0,85	1,04	1,07	1,22
Índice de compressão (C_c)	0,19	0,23	0,28	0,37
Índice de recompressão (C_r)	0,036	0,042	0,034	0,049
Massa específica seca (g/cm^3)	1,608	1,462	1,438	1,344
Teor de umidade após compactação	25,3%	29,8%	30,7%	35,7%
Grau de compactação (*)	102%	97%	98%	99%

(*) Os corpos de prova foram compactados na energia Proctor normal e atenderam às especificações de grau de compactação maior ou igual a 95% e desvio de umidade de 5%.

A compactação dos CPs foi realizada de forma estática dentro do anel de adensamento, fazendo com que o CP de solo apresentasse massa específica seca maior do que o máximo obtido pela energia Proctor normal ($\rho_{d,máx}$). Ademais, o cálculo do coeficiente de adensamento (C_v) não foi possível uma vez que o adensamento primário ocorreu nos primeiros instantes, sem possibilidade de registro do tempo.

As variações dos índices de compressão e recompressão em função da quantidade de lodo adicionada ao solo encontram-se no Gráfico 14. Neste caso, considerou-se a massa seca de lodo sobre o total de massa seca da mistura.

Gráfico 14 – Variação de C_c e C_r em função do teor de lodo (em massa seca)

A compressibilidade do solo e das misturas, nas condições que foram ensaiadas, é bastante inferior à de argilas moles, para as quais os valores de C_r e C_c são acima de 0,2 e 1,4, respectivamente (SAYÃO, 1980; ORTIGÃO, 1980 e RIBEIRO, 1992 apud NETTO, 2006). Os valores de C_c das amostras analisadas neste trabalho ainda se refletiram menores que aqueles encontrados por Albuquerque et al. (2006), $C_c = 0,55$ a $0,59$ em análise de um solo laterítico da região de Campinas por meio de amostras indeformadas retiradas de profundidades entre 1,5 e 3,5 m com massa específica aparente seca igual entre 1,0 e 1,2 g/cm³.

Os baixos valores encontrados para os índices de compressão (C_c) recompressão (C_r), tanto do solo como das misturas, estão de acordo com a expectativa para materiais compactados. O intuito desses ensaios foi analisar o efeito do lodo na deformabilidade do solo, pois não há realmente expectativa que ocorram grandes deslocamentos por adensamento com esses materiais.

A pouca variação de C_r indica que a adição de lodo altera pouco a rigidez do solo na recompressão. Já o índice de compressão (C_c) sofreu certa elevação com o aumento da porcentagem de lodo na mistura (0,19 para o solo e 0,37 para a mistura M 2:1), resultando, no entanto, ainda baixo.

Na Tabela 23 são apresentadas as tensões de pré-adensamento induzidas pela compactação do solo e misturas pelos métodos de Casagrande (1936) e Pacheco Silva (1970). Destaca-se a maior sensibilidade do método de Casagrande à manipulação do operador. O acréscimo de lodo ao solo eleva a tensão de pré-adensamento, a exceção da mistura M 4:1, o que indica que as misturas só se tornam mais deformáveis a um valor maior de tensão aplicada. A justificativa pode estar alinhada à possível cimentação e floculação das partículas e ao processo de aglutinação das partículas.

Tabela 23 – Tensão de pré-adensamento induzida pela compactação (em kPa) do solo e misturas

AMOSTRA	CASAGRANDE (1936)	PACHECO SILVA (1970)
Solo	155	132
M 4:1	114	101
M 3:1	180	187
M 2:1	200	194

4.2.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Para a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência ao cisalhamento, inicialmente compactou-se um corpo de prova (CP) no ponto ótimo da energia

Proctor normal e, a partir deste, foram moldados três corpos de prova menores em dimensões adequadas para o ensaio triaxial.

Apresentam-se na Tabela 24 os dados de moldagem dos corpos de prova ensaiados. Observa-se que o grau de compactação mínimo foi de 97% e a variação máxima em relação ao teor de umidade ótimo foi 0,5%.

Tabela 24 – Parâmetros de compactação dos corpos de prova utilizados no ensaio triaxial

AMOSTRA	PARÂMETROS					
	e_i (*)	e_f (*)	w (%)	γ_d (g/cm ³)	Δw_1 (%)	GC (%) (**)
Solo	0,867	0,981	25,5	1,55	-0,5	98%
M 4:1	0,998	0,981	29,5	1,48	+0,2	98%
M 3:1	1,063	1,055	29,8	1,43	-0,3	97%
M 2:1	1,231	1,193	36,0	1,33	+0,3	98%

(*) e = índices de vazios inicial e final (pré e pós adensamento)

(**) GC = grau de compactação

Os resultados do ensaio triaxial para o solo e as misturas são apresentados, respectivamente, nos Gráficos 15 e 16. Além das variações da tensão desviadora e da poropressão em função da deformação axial, têm-se as trajetórias de tensões efetivas para cada tensão confinante. Posteriormente, calcularam-se os parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito, segundo Equações (2) e (3). Considerou-se como critério de ruptura o máximo valor da relação entre tensão efetiva maior e tensão efetiva menor (σ'_1/σ'_3).

$$\varphi' = \arcsin (\tan \alpha')$$

(2)

$$c' = \frac{\alpha'}{\cos \varphi'}$$

(3)

Onde: φ' : ângulo de atrito efetivo (°);

c' : coesão efetiva (kPa);

α : inclinação da reta que tangencia os pontos de ruptura (°).

Gráfico 15 – Resultados do ensaio triaxial CIU para o solo

Gráfico 16 - Resultados do ensaio triaxial CU para as misturas

O acréscimo de lodo eleva o desenvolvimento de poropressões para tensões confinantes mais elevadas, e consequentemente reduz a tensão desviadora máxima. Os CPs encontravam-se saturados por contrapressão. Quando a tensão confinante (σ_3) é maior do que a tensão de pré-adensamento induzida pela compactação (σ_a), a poropressão dentro do CP aumenta com a deformação. Para σ_3 pouco menor do que σ_a (baixas razões de sobreadensamento), a poropressão aumenta menos do que no caso normalmente adensado e pode diminuir com a deformação. Para σ_3 muito menor do que σ_a (altas razões de sobreadensamento), a poropressão diminui com a deformação e pode se tornar negativa.

O efeito da compactação no solo e nas misturas foi diferente. Portanto, o desenvolvimento de poropressões pode estar associado às diferentes condições de pré-adensamento das amostras, apesar de todas terem sido compactadas dinamicamente por energia Proctor normal.

Os parâmetros de coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ') efetivos foram calculados a partir da trajetória de tensões e são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e misturas

Amostra	Teor de lodo em massa seca (%)	α' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo	0,0	30	15	34
M 4:1	6,5	32	6	39
M 3:1	8,5	31	10	38
M 2:1	12,2	30	9	36

Há tendência de decréscimo da coesão e elevação do ângulo de atrito com a adição de lodo no solo (Gráfico 17). Os valores de c' do solo são reduzidos (de 15 kPa para até 6 kPa no caso de M 4:1). Os valores de ϕ' , por outro lado, foram elevados em até ~5° (de 34° para até 39° novamente para M 4:1). Esses comportamentos podem estar associados à estrutura interna das amostras, uma vez que a adição do lodo ocasiona elevação do poder aglomerante das partículas, conforme descrito no ensaio de distribuição granulométrica, onde a inserção de lodo provocou redução da fração percentual correspondente à argila.

Gráfico 17 – Variações do ângulo de atrito e da coesão das amostras

4.2.5 PERMEABILIDADE

Apresentam-se na Tabela 26 os dados de moldagem dos corpos de prova ensaiados. Em relação à compactação nos pontos ótimos, as taxas de variação máxima adotadas foram de 1% e 5% para o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima, respectivamente.

Tabela 26 – Parâmetros dos corpos de prova utilizados no ensaio de permeabilidade

AMOSTRA	PARÂMETROS				
	e (*)	w (%)	γ_d (g/cm ³)	Δw_1 (%)	GC (%) (**)
Solo	0,970	25,0	1,510	-1,0	96%
M 4:1	0,966	29,0	1,516	-0,3	100%
M 3:1	1,117	29,6	1,408	-0,5	96%
M 2:1	1,150	35,5	1,386	-0,2	102%

(*) e = índice de vazios inicial

(**) GC = grau de compactação

Os resultados do ensaio de permeabilidade para a amostra de solo e as misturas de solo e lodo estão apresentados nos Gráficos 18 a 21. Todas as amostras possuem esperada redução do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) conforme o aumento da tensão confinante efetiva.

Gráfico 18 – Coeficiente de permeabilidade para a amostra de solo

Gráfico 19 – Coeficiente de permeabilidade para a amostra M 4:1

Gráfico 20 – Coeficiente de permeabilidade para a amostra M 3:1

Gráfico 21 – Coeficiente de permeabilidade para a amostra M 2:1

A partir da estabilização do coeficiente de permeabilidade no tempo, a amostra de solo apresentou k_{20} próximo à 10^{-8} m/s, enquanto as misturas estão em torno de 10^{-10} m/s, caracterizando-as como significativamente menos permeáveis (Tabela 27). Uma vez que todas as amostras possuíam índice de vazios semelhantes (máxima variação igual a 18% - de 0,97 para solo puro e 1,15 para a mistura M 2:1), atribui-se a menor permeabilidade das misturas à maior compressibilidade e deformabilidade aliado ao fato de o lodo utilizado nesta pesquisa ser intrinsecamente um material com elevado teor de finos (aproximadamente, 98,2%).

Tabela 27 – Coeficientes de permeabilidade k_{20} do solo e misturas

Amostra	Tensão confinante - σ' (kPa)	Gradiente hidráulico - i	k_{20} (m/s)
Solo	50	10	$1,5 \times 10^{-8}$
	100		$7,0 \times 10^{-9}$
	200		$3,0 \times 10^{-9}$
M 4:1	50	10	$4,5 \times 10^{-10}$
	100		$2,0 \times 10^{-10}$
	200		$1,2 \times 10^{-10}$
M 3:1	50	10	$1,1 \times 10^{-9}$
	100		$4,0 \times 10^{-10}$
	200		$3,5 \times 10^{-10}$
M 2:1	50	10	$2,0 \times 10^{-10}$
	100		$1,5 \times 10^{-10}$
	200		$1,0 \times 10^{-10}$

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

O objetivo deste estudo foi avaliar a possibilidade de uso de lodo de estação de tratamento de água (ETA) em obras geotécnicas a partir de misturas solo:lodo. Utilizaram-se amostras de lodo da ETA Cubatão (SP) e argila laterítica residual de diabásio, também proveniente do estado de São Paulo. As misturas foram simuladas em três traços, 4:1, 3:1 e 2:1, para definição das propriedades químicas, mineralógicas e geotécnicas.

Com base nos resultados obtidos, seguem as seguintes conclusões:

1. Nos ensaios de caracterização geotécnica, a inserção de lodo no solo argiloso provocou redução na fração argila em até 5%, e consequente redistribuição nas frações silte e areia fina. Isso ocorre devido à existência de componentes químicos no lodo que aglomeram as partículas minerais, tais como coagulante e cal, mesmo que a curva granulométrica com uso de defloculante acuse altíssimo teor de finos (~98%). A adição do lodo resultou também no aumento dos limites de liquidez e plasticidade, tornando o solo mais compressível.
2. Os ensaios de compactação mostraram redução da massa específica aparente seca máxima e aumento do teor de umidade ótimo com a adição de lodo. Comparando as amostras de solo e a mistura com maior teor de lodo (M 2:1), o primeiro parâmetro reduziu-se de 1,57 para 1,36 g/cm³ e o segundo elevou-se de 26 para 35,7%. Com a secagem prévia das misturas, observou-se recuperação dos parâmetros. No caso da mistura M 2:1, ao secar a mistura em 68% da umidade inicial, a massa específica aparente seca elevou-se para 1,52 g/cm³ e o teor de umidade ótimo reduziu-se para 28,4%. Obtiveram-se correções lineares da massa específica aparente seca máxima e do teor de umidade ótimo em função do grau de secagem das misturas. As equações das correlações foram obtidas para misturas preparadas com o solo em umidade higroscópica e do lodo com teor de umidade de, aproximadamente, 270%.
3. Os parâmetros de resistência à compressão simples das misturas solo:lodo são inferiores aos da amostra de solo. Enquanto a RCS média do solo é de, aproximadamente 400 kPa, as misturas M 4:1, M 3:1 e M 2:1 apresentam, respectivamente, 219, 268 e 184 kPa. As misturas apresentaram deformação axial na ruptura 1-5% maior do que o solo. A secagem prévia recuperou parcialmente o valor da RCS do solo. Deve-se lembrar que a RCS é uma medida da resistência não drenada do solo, portanto o aumento de resistência drenada com a secagem prévia pode não ser captada por este tipo de ensaio, principalmente no caso do aumento de resistência se dar na parcela de atrito.

4. Nos ensaios de adensamento, observou-se a elevação do índice de vazios inicial dos corpos de prova com a adição de lodo, coerente com a observação de menor massa específica seca máxima nos ensaios de compactação. Os baixos valores de índice de compressão e recompressão encontrados (de 0,19 a 0,37 e de 0,034 a 0,049, respectivamente) denotam baixa compressibilidade do material, compatível com o comportamento esperado de solos compactados, a qual é pouco alterada com o acréscimo de lodo.
5. Os ensaios triaxiais evidenciaram que o acréscimo de lodo eleva as poropressões, e consequentemente reduz a tensão desviadora máxima, porém sem alterar significativamente a resistência ao cisalhamento. O desenvolvimento das poropressões está relacionado à condição de pré-adensamento induzida pela compactação. Há tendência de decréscimo da coesão (de 15 para 6 kPa na mistura M 4:1) e elevação do ângulo de atrito com a adição de lodo no solo (de 34° para 39° para M 4:1). Esse comportamento pode estar associado à estrutura interna das amostras, uma vez que a adição do lodo ocasiona floculação das partículas.
6. Todas as amostras apresentaram esperada redução do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) conforme aumento da tensão confinante efetiva. O k_{20} das misturas solo:lodo é em torno de 10^{-10} m/s e do solo, 10^{-8} m/s.

A análise global dos resultados indica que as misturas solo-lodo testadas podem ser utilizadas em alguns tipos de obras geotécnicas. A aceitação pelo órgão ambiental deve ser mais fácil na aplicação como cobertura final e revestimento de fundo de aterros sanitários, por já ser área reservada e com distância segura dos habitantes das cidades.

Destaca-se que a tomada de decisão para incorporação do lodo de ETA em qualquer obra geotécnica deve englobar não apenas as análises técnicas, como também econômicas e ambientais. A busca por alternativas sustentáveis para reaproveitamento de resíduos inerentes ao processo de tratamento de água é urgente. Acontecimentos recentes³ sobre poluição de mananciais reforçam a necessidade de avaliações técnicas, fiscalização eficaz e investimento maciço para permitir o acesso ininterrupto de água à população, a qual é vital para sobrevivência do ser humano.

³ HAIDAR, D. Principais mananciais de água que abastecem o Rio de Janeiro estão poluídos, alerta especialista. Disponível em: <https://glo.bo/2TYCkzE>. Acesso em: 25 jan. 2020.

6 RECOMENDAÇÕES DE ESTUDOS FUTUROS

- Avaliar a validade das estimativas dos parâmetros de compactação a partir do teor de umidade pós-secagem das misturas para materiais com umidades iniciais diferentes das analisadas neste trabalho. Verificar a ampliação da utilização das correlações encontradas para outras misturas de solo:lodo.
- Avaliar o efeito da secagem prévia das misturas na resistência ao cisalhamento determinada por ensaios de compressão triaxial;
- Avaliar a utilização de misturas solo e lodo em bases de pavimento. Realizar ensaios para obtenção de módulo de resiliência e coeficiente de expansibilidade, considerando também a influência da secagem prévia;
- Avaliar as misturas apresentadas neste trabalho a partir da perspectiva ambiental (ensaios de lixiviação e solubilização), a fim de garantir total confiabilidade em obras onde metais pesados possam ser carregados, como em aterros sanitários;
- A análise das propriedades geotécnicas atestou potencial de utilização das misturas, no entanto, o uso do material na prática deve ser precedido de ensaios pilotos ou aterros experimentais.

REFERÊNCIAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. *Standard Specifications for Highway Bridges*. 17th Ed. Washington, D. C., EUA, 2002. 829p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6457 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, 2016.

_____*NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 2017.

_____*NBR 6508 – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 1984.

_____*NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 2016.

_____*NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 2017.

_____*NBR 7182 – Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 2016.

_____*NBR 10.004 – Resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004.

_____*NBR 10.005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido*. Rio de Janeiro, 2004.

_____*NBR 10.006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004.

_____*NBR 12.007 – Solo - Ensaio de adensamento unidimensional - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1990.

_____*NBR 12.216 – Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público*. Rio de Janeiro, 1992.

_____*NBR 12.770 – Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1992.

_____*NBR 13.292 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante*. Rio de Janeiro, 2014.

_____*NBR 13.896 – Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro, 1997.

_____*NBR 14.545 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável.* Rio de Janeiro, 2015.

_____*NBR 16.097 – Solo – Determinação do teor de umidade.* Rio de Janeiro, 2012.

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, p. 115-122, 2013.

ALBUQUERQUE, P. J. R.; MIGUEL, M. G.; MARQUE, R.; RODRIGUEZ, T. G.; CARVALHO, D. *Estudo da resistência e colapsibilidade de um solo laterítico de Campinas.* 08/2006, XIII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Vol. 1, pp.267-272, Curitiba, PR, Brasil, 2006

ALDEEB, A. A.; QASIM, S. R.; PUPPALA, A. J.; ANDERSON, C. F. (2003) *Physical and engineering properties of treatment plant residuals and disposal.* Journal AWWA. 95:8.

AMBIPAR – Soluções completas para perguntas simples. (2018) *Projeto de reutilização do Lodo da ETA para produção de cargas para Tintas Acrílicas.* 24º Prêmio FIESP de Mérito Ambiental (Categoria Empresa de Pequeno e Médio Porte). Gedi – Desenvolvimento e inovação.

ASTM - American Society for Testing and Materials. *D2435 / D2435M-11, Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading,* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.

_____*ASTM D2487-11, Unified Soil Classification System,* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.

_____*ASTM D4767-04, Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils,* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004, www.astm.org.

_____*ASTM D5084-16a, Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter,* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.

AVANCINI, L. L. S. *Análise do desaguamento do lodo de estações de tratamento de água em sistemas de confinamento em geotêxtil.* Dissertação de mestrado. Curso de Engenharia

de Infraestrutura Aeronáutica, Área de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutico. São José dos Campos, 2017. 135f.

BASIM, S. C. *Physical and geotechnical characterization of water treatment plant residuals*. 104 p. Doctoral Thesis. New Jersey Institute of Technology, New Jersey, 1999.

BECKER, D. E., CROOKS, J. H. A., BEEN, K., e JEFFERIES, M. G. (1987). *Work as a Criterion for Determining In Situ and Yield Stresses in Clays*. Canadian Geotechnical Journal, 24 (4), November.

BENVENUTO, C.; BOSCOV, M.E.G. (2013). *A Importância da Geotecnia no Projeto, Licenciamento e Operação de Aterros Sanitários*. Palestra, ITA/NRSP-ABMS, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

BERNUCCI, L. L. B. (1987) *Expansão e Contração de Solos Tropicais Compactados e suas Aplicações às Obras Viárias. Classificação de Solos Tropicais com Base na Expansão e Contração*. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

BERNUCCI, L. L. B. (1995) – *Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego*. 237 pp. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 357: Classificação dos corpos de água*. Brasília - DF, 2005, 23 p.

_____. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 430: Complementa e altera resolução nº 357*. Brasília – DF, 2011, 8p.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. *Resolução CONAMA nº 430*. In: Resoluções (2011). Website: <http://www.mma.gov.br>, last visit: Dec 8, 2018.

BS – British Standards Institution, (1995) *BS8006. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fill*.

CABRAL, V. A. L. *Avaliação da incorporação de lodo de ETA UFV na manufatura de tijolos de solo-cimento*. Viçosa, MG, 2013. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa.

CARMO, C. A. T. *A avaliação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos de dois solos compactados e a sua estimativa a partir de ensaios rotineiros*. São Carlos, 1998. 131 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

CASAGRANDE, A. *The determination of pre-consolidation load and its practical significance*, Discussion D-34, Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge, 1936. Vol. III, pp 60-64.

COELHO, R. V.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; FONTENELE, H. B.; TEIXEIRA, R. S. (2015). *Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária*. D.O.I. 10.5216/reec.V10i2.33134. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil. Vol.10 - nº 2, 11-22.

CORNWELL, D. A.; MUTTER, R. N.; VANDERMEYDEN, C. *Commercial application and marketing of water plant residuals*. American Water Works Association, 2000.

CORNWELL, D. A. *Water Treatment Residuals Engineering*. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 2006.

DAYTON, E. A.; BASTA, N. T. *Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute*. Water Environment Research, EUA, v. 73, n. 1, p. 52-57, 2001.

DELGADO, J. V. C. *Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

DER/PR - Departamento de Estradas e Rodagem do Estado do Paraná. 2006. *ET-DE-H00/004. Reaterro*. Curitiba, Paraná, 2006.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNER-ME 228/1994 - *Solos - compactação em equipamento miniature*.

_____. DNER-CLA 259/1996 *Classificação de Solos Tropicais para Finalidades Rodoviárias Utilizando Corpos-de-Prova Compactados em Equipamento Miniatura*. Disponível em: <https://bit.ly/2CP3NeJ>. Acessado em: 18/04/2018.

_____. DNIT - *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro. 3ª Ed., 2006.

_____. DNIT 134/2010 – ME. *Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Brasília, 2010.

_____. DNIT 172/2016 – ME. *Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio*. Brasília, 2016.

EHRlich, M. E BECKER, L. *Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução*. São Paulo. Oficina de Textos, 2009. ISBN 978-85-86238-94-9.

EMPRAPIA. *Manual de métodos de análise de solos*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Emprapa Solos, 1997.

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, F. de A. *Análise do Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos utilizando o Programa SisPavBR*. Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2013.

FERREIRA, P. e MORITA, D. M. *Tratamento, disposição e usos benéficos de lodos de estações de tratamento de água*. Revista Brasileira de Direito Ambiental, v. 17, p. 103-124, 2009.

FERREIRA, K.S.; MONTALVAN, E.L.T.; SAWATANI, T.F.; BOSCOV, M.E.G.: *Influência da Secagem nos Parâmetros de Resistência à Compressão Simples de Misturas Compactadas de Solos Lateríticos com Lodo de ETA*. IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2019), VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (2019), São Carlos, São Paulo, IGS-Brasil/ABMS (2019).

FHWA – Federal Highway Administration (1998) *Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes design and construction guidelines*. FHWA-SA-96-071. Elias, V.; Christopher, B. R. Washington D.C. September, 371p.

FORTES, R.M., et al. (2009). *Study of dry sludge stabilization from water treatment plant (WTP) in Taiaçupeba to use as compacted soil in earthwork ditches*. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. 8th International Conference (BCR2A'09), Proceedings.

GABAS, S. G.; SARKIS, J. E. S.; BOSCOV, M. E. G. (2016). *Heavy metal diffusion and retention in a mineral barrier of compacted lateritic soil*. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v. 4, pp. 9-22.

GANDARA, G. G.; BERTON, R. S.; FERNANDES, K. F. M. *Aproveitamento de lodo de estações de tratamento de água no cultivo do milho*. In: 4 Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica, 2010, Campinas. 4 CIIC - Anais. Campinas: IAC, 2010. v. 1.

GHARAIBEH, A. M. (2009) *Drying of potable water treatment plant residual*. Doctor of Philosophy thesis. School of Civil, Mining and Environmental Engineering. Faculty of Engineering. University of Wollongong. Disponível em: <http://ro.uow.edu.au/theses/3199>. Acesso em: 20 mar. 2019.

GONÇALVES, J. F. *Estudo numérico do comportamento de muros de solo reforçado com geossintéticos*. São Paulo, 2016. 158 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

GONÇALVES, F.; SOUZA, C. H. U.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R. S. (2016) Incremento de lodo de eta em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. DOI: 10.4322/dae.2016.018. Revista DAE – Departamento de Águas e Esgoto.

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: SIMPÓSIO INTERAMERICANO DE BIOSÓLIDOS, 7, Campinas, 2010.

GRUNINGER, R. M. *Disposal of Waste Alum Sludge from Water Treatment Plants*. Journal (Water Pollution Control Federation), Vol. 47, No. 3, Part I (Mar., 1975), pp. 543-552. Water Environment Federation. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/25038662>. Acesso em: 20 mar. 2019.

GUERRA, R.C. *Classificação e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário*. 2005. 88 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Instituto de Biociências de Rio Claro.

GUERRA, R. C.; ANGELIS, D.F.D. *Classificação e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário*. Arq. Inst. Biol., São Paulo, v.72, n.1, p.87-91, jan./mar., 2005.

GÜNEYLI, H. e RÜŞEN, T (2016) *Effect of length-to-diameter ratio on the unconfined compressive strength of cohesive soil specimens*. Bull Eng Geol Environ 75:793-806. DOI 10.1007/s10064-015-0835-5.

HE, P.; WONG, J. W. C. *Management of sewage sludge in urban areas*. In: 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 (UNHABITAT), 2008. p. 246-263.

HEMSI, P. S. (2001) *Um estudo da adsorção de poluentes em um latossolo Paulista considerando a carga variável e o ponto de carga*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. (2005) *Codisposição de lodo centrifugado de estação de tratamento de água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental*. Cerâmica. v. 51, n. 318.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F., JOUKOSKI, A e TRINDADE, E. M. *Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento portland para reduzir o impacto ambiental*. Quím. Nova, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 79-84, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v29n1/27861.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2019.

HSIEH, H. N. e RAGHU, D. *Criteria Development for Water Treatment Plant Residuals Monofills*. American Water Works Association, 1997.

HUANG, J. C. (1979) *Sludge characterization and dewatering*. Thesis presented to the University of Missouri, at Columbia, Mo., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

IAC – Instituto Agrônomo (2020) *Informações sobre interpretação de análise de solo*. Disponível em: encurtador.com.br/ftHK2. Acesso em: 10 mar. 20.

ISSMGE – International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2006. *Report of the ISSMFE Technical Committee TC-5 on Environmental Geotechnics*. CD-ROM.

JANUÁRIO, G. F.; FERREIRA FILHO S. S. *Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo*. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 117-126, abr./jun. 2007.

KATAYAMA, V. T. *Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica*. São Paulo, 2012. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

KATAYAMA, V. T.; MONTES, C. P.; FERRAZ, T. H. e MORITA, D. M. *Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica*. Eng. Sanit. Ambient. [online]. 2015, vol.20, n.4, pp.559-569. ISSN 1413-4152. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522015020040105046>.

KUCZINSKI, L (1950) *Estudo estatístico de correlação entre as características de compactação dos solos brasileiros*. São Paulo: IPT. Relatório final de bolsa de estudos. Seção de Solos do Instituto de Pesquisa Tecnológicas.

LUCENA, L. C. DE F. L.; JUCA, J. F. T.; SOARES, J. B.; MARINHO FILHO, P. G. T. *Use of wastewater sludge for base and subbase of road pavements*. Transportation Research Part D: Transport and Environment. V. 33. 2014.

MASSAD, F. *Mecânica dos solos experimental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. ISBN 978-85-7975-200-1.

MONTALVAN, E. L. T. *Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP*. São Paulo, 2016. 133 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

MONTALVAN, E.L.T.; BOSCOV, M.E.G. (2016) *Geotechnical Characterization of a Soil-Water Treatment Sludge Mixture*. In: Geo-Chicago 2016, Proceedings, pp. 418-427.

MONTALVAN, E. L. T; BOSCOV, M. E. G. (2018). *Comportamento geotécnico de misturas de areia argilosa laterítica com lodo da Estação de Tratamento de Água do município de Cubatão*. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Anais, Salvador.

MONTALVAN, E. L. T., BOSCOV, M. E. G. (2019) *Geotechnical Parameters of Mixtures of a Tropical Soil with Water Treatment Sludge*. In: Zhan L., Chen Y., Bouazza A. (eds) Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics Volume 1. ICEG 2018. Environmental Science and Engineering. Springer, Singapore.

MONTALVAN, E. L. T (2019) *Geotechnical behavior and properties of mixtures of water treatment sludge with residual lateritic soils from the state of São Paulo*. Qualificação da Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, Brasil.

MOTTA, L. M. G. *Noções de Mecânica dos Pavimentos*. Laboratório de Geotecnia - Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2003.

MORITA, D. M.; SAMPAIO, A. O.; MIKI, M. K.; DAVID, A. C. *Incorporação de lodos de estações de tratamento de água em blocos cerâmicos*. Revista Saneas. V. 1, n. 14, 2002.

NETTO, Y. A. *Estudo experimental das características de compressibilidade e adensamento de uma argila mole*. 2006. 106 f.: il.; 30 cm Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo: Villibor, 1995.

NOVAK, J. T. e CALKINS, D. C. (1975) *Sludge dewatering and its physical properties*. Water Tech./Quality J. AWWA, 67 (1), 42-45.

O'KELLY, B. C. (2010) *Landfill disposal of alum water treatment residues: some pertinent geoengineering properties*. Residuals Science and Technology 7(2): 95–113, Disponível em: <http://dpi-journals.com/index.php/JRST/article/view/1371>. Acesso em: 20 mar. 2019.

O'KELLY, B. C. (2016) *Geotechnics of municipal sludges and residues for landfilling*. Geotechnical Research, 2016, 3(4), 148–179 Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1680/jgere.16.00013>. Acesso em: 20 mar. 2019.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q. e HOLANDA, J. N. F. *Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha*. Cerâmica. v. 50, 2004.

OLIVEIRA, J.B., MENK, J.R.F. & ROTTA, C.L. 1979. *Levantamento pedológico semi-detalhado dos solos do estado de São Paulo - quadrícula de Campinas*. IBGE, Rio de Janeiro.

ORTIGÃO, J. A. R., *Contribuição ao Estudo de Propriedades Geotécnicas de um Depósito de Argila Mole da Baixada Fluminense*, 1975, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1975.

PACHECO SILVA, F., (1970). *Uma Nova Construção Gráfica para a Determinação da Pressão de Pré-adensamento de uma Amostra de solo*. IV Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos. II (1): 219 a 223, 1970.

PEREIRA, K. F. S.; TSUGAWA, J. K.; BOSCOV, M. E. G. (2018). *Caracterização geotécnica de misturas de lodo de estação de tratamento de água (ETA) com cal*. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Anais, Salvador.

PIMENTEL, F. J. G. (2012). *Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de esgoto em camada de cobertura de aterro sanitário*. Tese de mestrado, p61, Universidade Federal de Santa Catarina.

PREUSSLER, E. S.; PINTO, S. (1982) Proposição de método para projeto de reforço de pavimentos flexíveis, considerando a resiliência. In: 17ª Reunião Anual de Pavimentação, Anais..., Brasília.

PRIM, E. C. C. (2011) – *Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto sanitário como material de cobertura de aterro sanitário*. 285 pp. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental.

PRIMAVESI, A. *Manejo Ecológico do Solo: a agricultura em regiões tropicais*. 8º ed., São Paulo: Nobel, 1985. 541p.

QASIM, S. R. e CHIANG, W. *Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment*. Lancaster, Pa: Technomic Pub. Co, 1994.

QIAN, X., KOERNER, R.M. and GRAY, D.H. (2002) *Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction*. Prentice Hall, New Jersey.

RAGHU, D.; HSIEH, H.; NEILAN T.; YIH, C. *Water treatment plant sludge as landfill liner*. Geotechnical Practice for Waste Disposal. Anais... ASCE, 1987.

RAGHU, D., HSIEH, H., BASIM, S.C., e MORGAN, M., *Physical Characterization of Water Treatment Plant Residual and Topsoil Mixtures*, Testing Soil Mixed with Waste or Recycled Materials, ASTM STP 1275, Mark A. Wasemiller, Keith B. Hoddinott, Eds., American Society for Testing and Materials, 1997.

RAIJ, B. V. *Fertilidade do Solo e Adubação*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 343p.

RIBEIRO, R. E. Y. e CORDEIRO, J. S. (2005) *Gestão Operacional em Estações de Tratamento de Água de Ciclo Completo – Estudo de Caso da ETA Cubatão*. 23º Congresso

Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande/MS.

RIBEIRO, L. F. M., *Ensaio de Laboratório para Determinação das Características Geotécnicas da Argila Mole de Sergipe*. 1992. 202f. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio. 1992

ROCCA, A. C. C.; IACOVONE, A. M. M.; BARROTTI, A. J. *Resíduos sólidos industriais*. 2 ed. São Paulo, SP: CETESB, 1993.

RODRIGUEZ, T. T.; TEIXEIRA, R. S.; FERNANDEZ, F.; OLIVEIRA JUNIOR, O. R.; MARTINS, F. B.; KOMORIN, E. T.; DANZIGUER, D. H. *Estudo da compactação de lodo de ETA para uso em aterros sanitários*. VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO. Anais.... Belo Horizonte, 2011.

ROQUE, A. J. e CARVALHO, M. *Possibility of using the drinking water sludge as geotechnical material*. Proceedings of the 5th International Congress on Environmental Geotechnics. Anais....2006.

SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Guanhães. 2019. *Unidade de Tratamento de Resíduos*. Disponível em: < <https://bit.ly/2HJZdSe>>. Acesso em: 27 mar. 2019.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (1999) *Norma Técnica Interna SABESP NTS 013 SÓLIDOS Método de Ensaio*. São Paulo Junho - 1999 Revisão 1.

_____. *Relatório Anual de Qualidade da Água*. 2012. Município de Cubatão. Governo do Estado de São Paulo. Disponível em: <<https://bit.ly/2TTIdAD>> Acesso em: 31 jan. 2019.

_____. *Tratamento de água*. Disponível em: <<https://bit.ly/18EClaA>> Acesso em: 08 fev. 2018.

SANT'ANNA, G. L.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; FERNANDES, D. C. M. *Comportamento resiliente de um solo argiloso da região de Viçosa-MG no estado natural e estabilizado com cimento e alcatrão fracionado*. SIF – Sociedade de Investigações Florestais. Viçosa-MG, v.27, n.3, p.269-278, 2003.

SANTOS, I. S. S. DOS; RAMIRES, M. V. V.; KAZMIERCZAK, C. S.; SILVA, H. C.; KERN, A. P.; CAMARGO, S. A. *Caracterização e identificação do resíduo: lodo da estação de*

tratamento de água do município de São Leopoldo. In: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 27 ABES, 2000.

SAYÃO, A. S. F. J., *Ensaio de Laboratório na Argila Mole da Escavação Experimental de Sarapuí*. 1980. 202f. Tese de Mestrado, PUC-Rio. 1980.

SILVA, A. S. *Avaliação de misturas de lodo de ETA e cal visando sua aplicação como cobertura diária em aterros sanitários*. 2017. 87f. Dissertação de mestrado em Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

SILVA, A. S.; HEMSI, P. S. (2018). *Efeito do teor de sólidos na resistência ao cisalhamento de um lodo de ETA visando seu uso em cobertura diária de aterros sanitários*. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano (COBRAMSEG). Anais. Salvador, BA.

SILVEIRA, C.; KOGA, D. S. e KURODA, E. K. (2013) *Estudo da Viabilidade de Disposição Final dos Lodos de ETAs em Aterros Sanitários*. IX Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 9, n. 11, 2013, pp. 251-265.

TAKADA, C. R. da S.; SERRA, J. C. V.; MAFRA, W. A.; BORBA, K. C. de A. (2013) *Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água no Município de Palmas – TO*. Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 10, n. 2, p. 157-165, mar./abr. 2013.

TEIXEIRA, S. R.; DE SOUZA, S. A.; DE SOUZA, N. R.; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. *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, p. 215-220, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v52n323/32092.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2019.

TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; SOUZA, A. E.; ALESSIO, P.; SOUZA, S. A.; SOUZA, N. R. *The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials*. Applied Clay Science. V. 53, n. 4, 2011.

TORRES, P.; HERNANDEZ, D.; PAREDES, D. *Productive use of sludge from a drinking water treatment plant for manufacturing ceramic bricks*. Rev. ing. constr., Santiago, v. 27, n. 3, p. 145-154, Dec. 2012. Disponível em: <https://goo.gl/E6jWj9>. Acesso em: 20 mar. 2019.

TOWNSEND, T. G.; JANG, Y.; JAIN, P.; TOLAYMAT, T. (2001) *Characterization of Drinking Water Sludges for Beneficial Reuse and Disposal*. Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management. Florida Department of Environmental Protection.

TSUGAWA, J. K. *Solubilização e difusão reversa de cátions metálicos de uma argila laterítica em meio ácido*. São Paulo, 2004. 160 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações.

TSUGAWA, J. K.; PEREIRA, K. F. S.; BOSCOV, M. E. G. (2017). *Thixotropy of sludge from Cubatão Water Treatment Plant, Brazil*. Geotechnical Frontiers 2017, Proceedings, pp. 842-851, Orlando.

TSUGAWA, J. K.; SABINO, E. F. S.; MONTE, R.; BOSCOV, M. E. G. (2019) *Importance of composing representative samples according to the Theory of Sampling (TOS) for the reuse of water treatment sludge*. Conference Paper. IN: The XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Proceedings. Cancun, Mexico. Part 4. 2450-2457 p. DOI: 10.3233/STAL190314.

USEPA – US Environmental Protection Agency. *Hazardous Waste Management System*. Washington D. C., 1986.

_____. *Criteria for solid waste disposal facilities*. U.S. Government Printing Office, 1993.

VEGA, B. J. J. *Cinética de adsorção de Pb e Cd em solo argiloso laterítico*. São Paulo, 2016. 123 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

VELLO, K. L. (2001) *Difusão de metais em solo laterítico compactado*. Iniciação Científica. 25 f. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. São Paulo.

VILLIBOR, D. F. (1981) *Pavimentos econômicos: novas considerações*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, Brasil.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. (2009) *Pavimentos econômicos – tecnologia do uso dos solos finos lateríticos*. São Paulo: Editora Arte & Ciência.

WANG, M. C. e TSENG, W. (1993) *Permeability behavior of a water treatment sludge*. Journal of Geotechnical Engineering. V. 119 n. 10. October, 1993. ISSN 0733-9410/93/0010-1672.

WANG, M. C.; HULL, J. Q.; JAO, M.; DEMPSEY, B. A.; CORNWELL, D. A. *Engineering behavior of water treatment sludge*. Journal of Environmental Engineering, v. 118, n. 6, p. 848–864, 1992.

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.

WATANABE, Y.; KOMINE, H.; YASUHARA, K.; MURAKAMI, S. *Batch Leaching Test Focusing on Clod Size of Drinking Water Sludge and Applicability to Long-Term Prediction Using Column Leaching Test*. Geo-Frontiers. Advances in Geotechnical Engineering. Anais....ASCE, 2011.

WU, T. H.; ZHOU, S. Z. e GALE, S. M. (2007) *Embankment on sludge: predicted and observed performances*. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(5): 545-563, <https://doi.org/10.1139/t07-004>.

XIA, Z. *Geotechnical characterization of water treatment plant residuals*. Master Dissertation – New Jersey Institute of Technology. New Jersey, 1994.