**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS E GEOTÉCNICA**

ALINE ROQUE DA SILVA

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS DE AREIA ARGILOSA
LATERÍTICA E LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA
TAIAÇUPEBA, MUNICÍPIO DE SUZANO, SÃO PAULO**

**SÃO PAULO
2021**

ALINE ROQUE DA SILVA

Versão Corrigida

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS DE AREIA ARGILOSA
LATERÍTICA E LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA
TAIAÇUPEBA, MUNICÍPIO DE SUZANO, SÃO PAULO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo a ser utilizada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Geotécnica

Orientadora: Professora Dra. Maria Eugenia Gimenez Boscov

**SÃO PAULO
2021**

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.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 05 de setembro de 2021

Aline Roque da Silva

Assinatura do autor

Maria Eugenia Gimenez Amor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

da Silva, Aline Roque
COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS DE AREIA
ARGILOSA LATERÍTICA E LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA
TAIAÇUPEBA, MUNICÍPIO DE SUZANO, SÃO PAULO / A. R. da Silva – versão
corr. -- São Paulo, 2021.
174 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1.reuso de resíduos 2.lodo de ETA 3.solo laterítico 4.mistura solo-lodo
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t.

DEDICATÓRIA

Às que vieram antes de mim.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Eliane pelo amor incondicional, carinho e suporte ao longo de toda a minha jornada de vida.

Ao meu grande amor, Flávio, companheiro de todas as horas, melhor amigo e referência profissional.

Aos meus irmãos, Lucas e Renan, meus primeiros e maiores exemplos.

À minha sogra, Dora, pelo enorme apoio e carinho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento dessa pesquisa (processos nº 2019/17183-7 e nº 2013/50448-8).

À minha orientadora Maria Eugenia, pelo trabalho e leitura atenta na revisão dos textos.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Geotecnia, cujos ensinamentos foram fundamentais para minha formação.

À Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues e ao António Albuquerque, pelas primorosas sugestões na banca de qualificação.

Aos meus colegas de pós-graduação, almoços e cafés, pelo aprendizado diário e mútuo, os quais levarei eternizados na pessoa que me tornei. Ao amigo Edy Montalvan que, além de tudo, caminhou comigo lado a lado nessa pesquisa.

Aos queridos técnicos Antônio e Valdinéia, sempre dispostos a ajudar. À Wandréa que, com seu reconhecido profissionalismo e eficiência, me deu todo o suporte ao longo desses anos. Aos demais técnicos da Universidade de São Paulo (secretários(as), faxineiros(as), seguranças, cozinheiros(as), administradores, bibliotecários (as)) que são a base da universidade.

Aos funcionários da ETA Taiaçupeba e do Aterro Sanitário de Botucatu pelo fornecimento dos materiais utilizados nessa pesquisa.

Aos amigos e amigas que me acompanharam de longe, mas sempre perto.

Muito obrigada!

RESUMO

O lodo, resíduo do tratamento de água bruta, tem sido geralmente descartado em cursos d'água ou encaminhado para aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto. Os padrões ambientais cada vez mais rígidos têm levado à procura de alternativas de destinação final ambientalmente adequadas. Uma das opções promissoras é a reutilização do lodo *in natura* misturado a solos em obras geotécnicas, como revestimento de fundo e cobertura final de aterros sanitários e industriais, bases e sub-bases de pavimentos, reaterro de estruturas de contenção, preenchimento de valas e aterros em geral. Este trabalho avalia o comportamento geotécnico de misturas de uma areia argilosa laterítica seca até umidade higroscópica (~1%) (município de Botucatu, SP), representativa de um grupo de solos de larga ocorrência no estado, com o lodo da ETA Taiaçupeba *in natura* (município de Suzano, SP), em três proporções de solo e lodo (5:1, 4:1, e 3:1). Realizaram-se as caracterizações química, mineralógica e geotécnica do solo, do lodo e das misturas, assim como a caracterização ambiental do lodo e ensaios de compactação, permeabilidade, adensamento, resistência ao cisalhamento e resiliência com o solo e as misturas compactados. Avaliou-se também o efeito da secagem prévia das misturas nos parâmetros de compactação. O LETA Taiaçupeba é composto por material amorfo e pelos minerais quartzo, gibbsita e caulinita; quimicamente, destacam-se o alumínio, ferro e silício como elementos maiores e grande quantidade de matéria orgânica. A adição de lodo não alterou significativamente a granulometria do solo, uma vez que a fração de sólidos adicionados foi pequena, porém a massa específica dos sólidos diminuiu e os limites de consistência aumentaram com o aumento do teor de lodo. O incremento de lodo levou à redução da massa específica seca máxima e ao aumento do teor de umidade ótimo de compactação. Com a secagem prévia das misturas, observou-se comportamento inverso, que levou à recuperação dos parâmetros ótimos do solo. Comparadas ao solo, as misturas apresentaram índices de compressão de 2,3 a 3,1 vezes maiores, ângulos de atrito efetivos de 1º a 4º maiores e coesões efetivas de 9 a 16 kPa menores. As pressões neutras desenvolvidas durante o cisalhamento tendem a ser maiores quanto maior o teor de lodo, causando redução das tensões axiais máximas e o aumento das deformações na ruptura em solicitações não drenadas. A condutividade hidráulica das misturas foi de aproximadamente 10 a 100 vezes menor que a do solo. A caracterização ambiental mostrou que o LETA

Taiapuêba é um resíduo classe II-A, não perigoso e não inerte, devido à solubilização de manganês e fenois. Os resultados indicam que as misturas são potencialmente viáveis para diversos usos geotécnicos, devendo ser feita uma análise caso a caso.

Palavras-chave: reuso de resíduos, lodo de ETA, solo laterítico, mistura solo-lodo.

ABSTRACT

The water treatment sludge (WTS), a residue from the treatment of raw water, has generally been discarded in water courses or sent to landfills and sewage treatment plants. The increasingly strict environmental standards have led to the search for environmentally appropriate destination alternatives. A promising option is the reuse of sludge mixed with soils in geotechnical works such as bottom and final cover of sanitary and industrial landfills, pavement bases and sub-bases, backfill of containment structures, trenches backfill, and landfills in general. This work evaluates the geotechnical behavior of mixtures of a lateritic clay sand dried to the hygroscopic water content ($\sim 1\%$) (Botucatu city, São Paulo State), representative of a group of soils of high occurrence in the state, with a sludge from the Taiaçupeba WTP (Suzano city, São Paulo State) at as-collected water content, in three proportions of soil and sludge (5:1, 4:1, and 3:1). The chemical, mineralogical and geotechnical characterization of the soil, sludge and mixtures was carried out, as well as the environmental characterization of the WTS. Compacted samples of soil and mixtures were submitted to compaction, permeability, consolidation, shear strength and resilience tests. The effect of prior drying of the mixtures on the compaction parameters was also evaluated. WTS Taiaçupeba is composed of amorphous matter and quartz, gibbsite and kaolinite; chemically, the major elements are aluminum, iron and silicon. A large organic matter content was also identified. The addition of sludge did not significantly change the grading curve of the soil, since the added solids fraction was small; however, the specific gravity of the grains decreased the consistency limits increased with the increase of sludge content. Increasing sludge content led to a progressive reduction in the maximum dry density and an increase in the optimum moisture content of the compacted soil. With the previous drying of the mixtures, an inverse behavior was observed, which led to the recovery of the optimal parameters of the soil. Compared to the soil, the mixtures showed compression indices 2.3 to 3.1 times higher, while the effective friction angle was 1° to 4° higher and the effective cohesion, 9 to 16 kPa lower. Increasing sludge content led to the development of increasing neutral pressures during shearing, causing reduction of the maximum axial stresses and increase of deformations at failure under undrained solicitations. The hydraulic conductivity of the mixtures was 10 to 100 times lower than that of the soil. The environmental

characterization classified WTS Taiaçupeba as a non-hazardous non-inert waste. The results indicate that the mixtures are potentially viable for several geotechnical applications, and a case-by-case analysis should be carried out.

Keywords: waste reuse, water treatment sludge, laterite soil, soil-sludge mixture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Economia Circular vs. Economia Linear.....	19
Figura 2 – Tipos de tratamento de água no Brasil.....	21
Figura 3 – Destinação dos lodos de ETA no Brasil.	21
Figura 4 - Sistema de tratamento de água.	22
Figura 5 – Condições da água em um floco nos LETAs.	36
Figura 6 – Condições da água nos LETAs e energias necessárias para remoção. ...	37
Figura 7 – Valores de pH de LETA na bibliografia entre 1991 e 2018.	40
Figura 8 – Variação da massa específica dos sólidos com a temperatura (°C).	45
Figura 9 – Distribuição granulométrica com diferentes teores de umidade iniciais. ..	47
Figura 10 – Variação na granulometria e teor de matéria orgânica ao longo dos meses e a variação do nível de água do rio no local de coleta.....	48
Figura 11 – Curvas granulométricas de diversos LETAs.	49
Figura 12 – Massa específica dos sólidos em função do teor de sólidos voláteis para diversos LETAs.	50
Figura 13 - Curva de compactação de um lodo férrico.....	51
Figura 14 - Curva de compactação do lodo de alumínio 1.	51
Figura 15 - Curva de compactação do lodo de alumínio 2.	52
Figura 16 – Curvas de compactação de LETAs obtidas por umedecimento com padrão parabólico.....	52
Figura 17 – Curvas de compactação de LETAs obtidas por secagem com padrão crescente.....	53
Figura 18 – Curvas de compactação do LETA WQD (Polímero) por umedecimento e secagem.....	53
Figura 19 – Curvas de compactação do LETA HWD (Alumínio) por umedecimento e secagem.....	53
Figura 20 – Curvas de compactação de LETAs de SFA.	54
Figura 21 – Ensaio de adensamento de três LETAs.	55
Figura 22 – Ensaio de adensamento – Curvas deslocamento em função do tempo – LETA JCD.	56
Figura 23 – Determinação da tensão de pré-adensamento, Índice de Compressão (C_c) e Índice de Expansão (<i>Swell Index</i> , C_s) – LETA JCD.....	57

Figura 24 –Compressão unidimensional na célula edométrica e no consolidômetro - adensamento primário.	58
Figura 25 - Compressão isotrópica na célula triaxial - (adensamento primário).	58
Figura 26 - Tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal do LETA JCD (w=27%).	62
Figura 27 – Envoltória de resistência do LETA JCD (w=27%).	62
Figura 28 – Resistência ao cisalhamento em função do teor de sólidos.	63
Figura 29 – Tensão desviadora em função da deformação axial – Ensaios Triaxiais UU das amostras 2a e 2b.	64
Figura 30 – Resistência ao cisalhamento não-drenada em função do teor de umidade.	64
Figura 31 – Resistência não-drenada em função do teor de sólidos.	65
Figura 32 – Permeabilidade em função do índice de vazios para lodo <i>in natura</i>	67
Figura 33 – Condutividade hidráulica em função da tensão efetiva de 3 LETAs.	67
Figura 34 – Condutividade hidráulica em função do índice de vazios de 3 LETAs... ..	68
Figura 35 – Coleta de amostra da Areia Argilosa de Botucatu.	69
Figura 36 – Difratograma de raios-X da areia argilosa de Botucatu.	70
Figura 37 – Fases cristalinas identificadas na DRX da areia argilosa de Botucatu. .	70
Figura 38 – Micrografias da areia argilosa de Botucatu.	71
Figura 39 – Resultados do ensaio triaxial CAU com o solo: curvas tensão em função da deformação e pressão neutra em função da deformação.	74
Figura 40 - Comparação do comportamento resiliente de misturas de solo arenoso e lodo de ETA.	79
Figura 41 – ETA Taiaçupeba, Suzano (São Paulo).	86
Figura 42 – Areia argilosa laterítica de Botucatu (São Paulo).	88
Figura 43 – LETA Taiaçupeba: A) <i>in natura</i> ; B) no início da secagem ao ar; C) em processo de secagem ao ar sem homogeneização; D) em processo de secagem ao ar com homogeneização periódica; E) seco ao ar e destorroado.	89
Figura 44 – Misturas homogeneizadas manualmente.	93
Figura 45 – Compactação sendo executada.	96
Figura 46 – Prensa de adensamento: A) vista frontal; B) vista lateral.	97
Figura 47: Ensaio de Compressão Triaxial: A) corpo de prova compactado da mistura 5:1: divisão para moldagem de corpos de prova para ensaio; B) montagem do corpo	

de prova para o ensaio; C) célula triaxial montada para iniciar o ensaio; D) equipamento do ensaio.	98
Figura 48 – Equipamento <i>Tri-Flex2</i> com ensaios em andamento.	100
Figura 49 – Equipamento utilizado no ensaio do Módulo de Resiliência.....	102
Figura 50 – Difratoograma de Raios-X do LETA Taiaçupeba: A) Difratoograma; B) Fases cristalinas identificadas.	103
Figura 51 – Difratoograma de Raios-X do LETA Taiaçupeba após tratamento com H ₂ O ₂ : A) Difratoograma; B) Fases cristalinas identificadas.	104
Figura 52 – Micrografias do LETA Taiaçupeba com aumentos: A) 3.000x; B) 100.000x; C) 12.000x; D) 20.000x; E)14.000x; F)120.000x.	106
Figura 53 – Micrografias do LETA Taiaçupeba após oxidação da matéria orgânica com aumentos: A) 2.000x; B)10.000x; C)8.000x; D)10.000.	107
Figura 54 – Espectro de análise química pontual (EDS) da Figura 52E (LETA Taiaçupeba): A) Região A; B) Região B.	108
Figura 55– Espectro de análise química pontual (EDS) da Figura 53B (LETA Taiaçupeba após oxidação da matéria orgânica): A) Região A; B) Região B; C) Região C.	109
Figura 56 – Teor de umidade do LETA Taiaçupeba.....	116
Figura 57 – Limites de Liquidez do LETA Taiaçupeba.	117
Figura 58 – Distribuições granulométricas do LETA Taiaçupeba: A) sem o uso de defloculante; B) uso de hexametáfosfato de sódio; C) uso de fosfato trissódico; D) uso de pirofosfato de sódio; E) uso de tripolifosfato de sódio; F) granulometria por laser.	118
Figura 59 – A) Solução com 40g de lodo + fosfato trissódico 4%; B) Solução com 10g de lodo + hexametáfosfato de sódio 9,14%.	121
Figura 60 – Distribuição granulométrica da areia argilosa lateríticade Botucatu.	123
Figura 61 – Curvas granulométricas do solo e das misturas.....	124
Figura 62 – Carta de Plasticidade – Solo e misturas.....	125
Figura 63 – Ensaio de compactação do solo.....	126
Figura 64 – Curvas de compactação do solo e das misturas.	126
Figura 65 – Curvas de compactação da mistura 5:1 obtidas em três graus de secagem.	127
Figura 66 – Curvas de compactação da mistura 4:1 obtidas em três graus de secagem.	127

Figura 67 – Curvas de compactação da mistura 3:1 obtidas em três graus de secagem.	127
Figura 68 – Efeito da secagem: teor de umidade ótimo em função do teor de umidade inicial.....	128
Figura 69 – Efeito da secagem: massa específica seca máxima em função do teor de umidade inicial.....	128
Figura 70 – Ajuste linear dos pontos ótimos da mistura 3:1 sem e com três graus de secagem prévia.	129
Figura 71 – Variação no parâmetro Teor de Umidade de Compactação.....	130
Figura 72 – Variação no parâmetro Grau de Compactação.	130
Figura 73 – Ensaios de adensamento do solo e das misturas: A) índice de vazios em função da tensão aplicada; B) deformação axial em função da tensão aplicada....	131
Figura 74 – Modelo linear generalizado C_c em função de LL - solo e misturas.....	133
Figura 75 – Modelo linear generalizado C_r em função de LL - solo e misturas.....	133
Figura 76 – Curvas altura do corpo de prova (cm) em função do tempo (min), dos carregamentos de 2560 kPa e 40 kPa da mistura 3:1.	134
Figura 77 – Tensão em função da deformação e pressão neutra em função da deformação – Solo.....	136
Figura 78 – Tensão em função da deformação e pressão neutra em função da deformação –.....	136
Figura 79 – Tensão em função da deformação e pressão neutra em função da deformação – Mistura 4:1.	137
Figura 80 – Tensão em função da deformação e pressão neutra em função da deformação – Mistura 3:1.	138
Figura 81 – Corpos de prova do solo após rompimento e secagem em estufa, sob as tensões confinantes indicadas.	139
Figura 82 – Trajetórias de tensões – Solo.	140
Figura 83 – Trajetórias de tensões – Mistura 5:1.....	140
Figura 84 – Trajetórias de tensões – Mistura 4:1.....	141
Figura 85 – Trajetórias de tensões – Mistura 3:1.....	141
Figura 86 – Envoltória de resistência única para solo e misturas.	142
Figura 87 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão simples.	143
Figura 88 – RCS – Influência do teor de lodo nas tensões máximas.	144
Figura 89 – RCS – Influência do teor de lodo nas deformações.....	145

Figura 90 – Condutividade hidráulica do solo.....	146
Figura 91 – Condutividade hidráulica da Mistura 5:1.	147
Figura 93 – Condutividade hidráulica da Mistura 4:1.	147
Figura 94 – Condutividade hidráulica da Mistura 3:1.	148
Figura 95 – Comportamento resiliente da areia argilosa de Botucatu.....	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de diferentes LETAs.....	28
Tabela 2 – Composição química de diferentes LETAs.....	29
Tabela 3 – Composição mineralógica de diferentes LETAs.	30
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de lixiviação - parâmetros inorgânicos de LETAs.	32
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de solubilização - parâmetros inorgânicos de LETAs	32
Tabela 6 - Composição típica quanto a elementos potencialmente tóxicos de LETAs.	34
Tabela 7 – Resultados de análises quantitativas de elementos potencialmente tóxicos.	34
Tabela 8 - Caracterização geotécnica de LETAs que utilizam SFA como coagulante.	42
Tabela 9 - Caracterização geotécnica de LETAs que utilizam cloreto férrico como coagulante.....	42
Tabela 10 - Características geotécnicas de LETAs que utilizam PACl como coagulante.....	42
Tabela 11 - Distribuição granulométrica e classificação de LETAs de New Jersey (EUA).	43
Tabela 12 – Limites de Atterberg de LETAs <i>in natura</i> e com secagem prévia.	46
Tabela 13 – Variações sazonais nas características do LETA Hitachi (Japão).....	47
Tabela 14 – Caracterização geotécnica de diversos LETAs.	49
Tabela 15 – Parâmetros efetivos de resistência de diversos LETAs.....	59
Tabela 16 – Parâmetros de resistência por cisalhamento direto.....	60
Tabela 17 – Parâmetros de resistência de diversos LETAs por cisalhamento direto.	61
Tabela 18 – Resultados da FRX da Areia Argilosa de Botucatu.	71
Tabela 19 – Resultados de análises químicas da Areia Argilosa de Botucatu.	72
Tabela 20 – Resultados da caracterização geotécnica de solos e misturas de solo e LETA.	76
Tabela 21 – Parâmetros de resistência de misturas de solo e lodo.	77

Tabela 22 – Faixas granulométricas de materiais utilizados em bases de pavimentos.	82
Tabela 23 – Parâmetros geotécnicos de solos utilizados em barragens.	83
Tabela 24: Ângulos do detector e cristais utilizados na FRX.	91
Tabela 25 – Ensaios e normas.	93
Tabela 26 – Análises granulométricas realizadas com o LETA Taiaçupeba.	94
Tabela 27 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência. .	102
Tabela 28 – Resultados da FRX do LETA Taiaçupeba antes e após tratamento com H ₂ O ₂	110
Tabela 29 – Resultados de análises químicas do LETA Taiaçupeba.	111
Tabela 30 – Teor de constituintes lixiviados.	113
Tabela 31: Teor de constituintes solubilizados.	113
Tabela 32 – Caracterização geoténica do LETA, solo e misturas.	115
Tabela 33 – Parâmetros ótimos das compactações por secagem das misturas. ...	128
Tabela 34 - Índices de compressão e recompressão do solo e das misturas.	131
Tabela 35 – Parâmetros de resistência do solo e das misturas.	142
Tabela 36 – Tensões axiais máximas e deformações correspondentes nos ensaios de compressão simples.	144
Tabela 37: Condutividades hidráulicas do solo e das misturas.	146

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACBP LAB	Laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABV	Alto da Boa Vista
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
CAU	<i>Anisotropically Consolidated Undrained</i> (Adensado Anisotropicamente Não-Drenado)
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CIU	<i>Isotropically Consolidated Undrained</i> (Adensado Isotropicamente Não-Drenado)
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CU	<i>Consolidated Undrained</i> (Adensado Não-Drenado)
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DRX	Difratometria de Raios-X
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (Espectroscopia por Energia Dispersiva)
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EP	Escola Politécnica
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FRX	Fluorescência de Raios-X
GC	Grau de compactação
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICDD	<i>International Centre for Diffraction Data</i>
ICSD	<i>Inorganic Crystal Structure Database</i>

IP	Índice de Plasticidade
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
ITA	Instituto Tecnológico da Aeronáutica
LCT-EPUSP	Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
LETA	Lodo de Estações de Tratamento de Água
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LMS-EPUSP	Laboratório de Mecânica dos Solos Milton Vargas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
LSO-ESALQ	Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PAC	<i>Aluminum Polychloride</i> (Policloreto de Alumínio)
PACI	<i>Polyaluminium Chloride</i> (Cloreto de Polialumínio)
PF	Perda ao fogo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RCS	Resistência à compressão simples
RSA	Razão de sobreadensamento
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SFA	Sulfato de Alumínio
ST	Sólidos Totais
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
SV	Sólidos Voláteis
TCLP	<i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
USP	Universidade de São Paulo
UU	<i>Unconsolidated Undrained</i> (Não-Adensado Não-Drenado)
ZAVC	<i>Zero Air Voids Curve</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Ag	Prata
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio (Alumina)
Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Caulinita
Al ₄ SiO ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Caulinita
Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O	Sulfato de Alumínio Octadecahidratado
Al ₂ (SO ₄) ₃ .7H ₂ O	Sulfato de alumina Heptahidratado
Al(OH) ₃	Hidróxido de Alumínio (Gibbsita)
As	Arsênio
As ₂ O ₃	Trióxido de Arsênio
Au	Ouro
B	Boro
B ₂ O ₃	Trióxido de Boro
Ba	Bário
BaO	Óxido de Bário
°C	Graus Celsius
C	Carbono
c'	Intercepto de Coesão Efetivo (kPa)
c	Intercepto de Coesão (kPa)
C _c	Índice de Compressão
C _r	Índice de Recompressão
C _s	Índice de Expansão (<i>Swell Index</i>)
C _α	Índice de Adensamento Secundário
C _v	Coeficiente de Adensamento (m ² /ano)
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio e cal
Cd	Cádmio
CdO	Óxido de Cadmio
Ce	Cério
Cl	Cloro
ClO ₂	Dióxido de Cloro

cmol.kg^{-1}	Centimol por kg
$\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$	Centimol de cátions por kg
Co	Cobalto
Co_3O_4	Tetraóxido de Cobalto
Cr	Cromo
Cr_2O_3	Óxido de Cromo (III)
Cu	Cobre
e	Índice de vazios
F	Flúor/Fluoreto
Fe	Ferro
Fe_2O_3	Óxido de Ferro III (Hematita)
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	Sulfato Férrico
Fe_3O_4	Óxido de Ferro II, III (Magnetita)
$\text{FeCl}_3.6\text{H}_2\text{O}$	Cloreto Férrico
FeO	Óxido de Ferro II
$\text{FeO}(\text{OH})$	Hidróxido de Óxido de Ferro (Goethita)
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Hidróxido de Ferro II
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	Hidróxido de Ferro III
$\text{Fe}(\text{SO}_4)_3+\text{FeCl}_3+7\text{H}_2\text{O}$	Sulfato Ferroso Clorado
$\text{FeSO}_4.7\text{H}_2\text{O}$	Sulfato Ferroso
g	Grama
Ga	Gálio
H	Hidrogênio
H_2O_2	Peróxido de Hidrogênio
Hg	Mercúrio
k	Condutividade hidráulica / Coeficiente de permeabilidade (m.s^{-1})
K	Potássio
K_2O	Óxido de Potássio
$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Muscovita
kg	quilograma
KMnO_4	Permanganato de Potássio
kPa	Quilopascal

L	Litro
Li	Lítio
meq/100g	Miliequivalentes por 100g
mg	Miligramas
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de Magnésio
mmol.kg ⁻¹	Milimol por kg
mmol _c .kg ⁻¹	Milimol de cátions por kg
Mn	Manganês
MnO	Óxido de Manganês
MnO ₂	Dióxido de Manganês
N	Nitrogênio
Na	Sódio
Na ₂ O	Óxido de Sódio
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
NiO	Óxido de Níquel II
Nm	Nanômetro
NO ₃ ⁻	Nitrato
O	Oxigênio
O ₃	Ozônio
P	Fósforo
φ'	Ângulo de Atrito Interno Efetivo (°)
φ	Ângulo de Atrito Interno (°)
ρ	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)
ρ _d	Massa específica aparente seca (kg.m ⁻³)
ρ _{d,máx.}	Massa específica aparente seca máxima (kg.m ⁻³)
ρ _s	Massa específica dos sólidos (g.cm ⁻³)
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
Pb	Chumbo
PbO	Monóxido de chumbo
Pb ₄ SO ₄ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	Leadhillita
ppb	Parte por bilhão

ppm	Parte por milhão
Pt	Platina
Rb	Rubídio
σ_3	Tensão principal menor (kPa)
σ_1	Tensão principal maior (kPa)
σ_d	Tensão desviadora (kPa)
σ'_v	Tensão Vertical Efetiva (kPa)
s	Teor de sólidos (%)
S	Enxofre
Sb ₂ O ₃	Trióxido de Antimônio
Se	Selênio
Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de Silício
sót.	Teor de sólidos ótimo (%)
SO ₄	Sulfato
Sr	Estrôncio
Su	Resistência Não-Drenada (kPa)
Ti	Titânio
TiO ₂	Óxido de Titânio (Rutilo/Anatásio)
V	Vanádio
V ₂ O ₅	Pentóxido de Vanádio
w	Teor de umidade (%)
wót.	Teor de umidade ótimo (%)
γ_d	Peso específico aparente seco (kN.m ⁻³)
$\gamma_{d,máx.}$	Peso específico aparente seco máximo (kN.m ⁻³)
Zn	Zinco
ZnO	Óxido de Zinco
Zr	Zircônio
ZrO	Óxido de Zircônio

SUMÁRIO

1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	Economia Circular	19
3.2	Tratamento de Água Bruta.....	20
3.2.1	Tratamento de Água Convencional ou de Ciclo Completo	22
3.3	Lodos de ETAs.....	25
3.3.1	Caracterização Mineralógica	25
3.3.2	Caracterização Ambiental	31
3.3.3	Caracterização Físico-Química	35
3.3.4	Caracterização Geotécnica.....	41
3.3.5	Comportamento Geotécnico.....	50
3.4	Areia Argilosa Laterítica de Botucatu (SP).....	68
3.4.1	Caracterização Física, Química e Mineralógica	69
3.4.2	Caracterização Geotécnica.....	72
3.4.3	Comportamento Geotécnico.....	73
3.5	Misturas de Solos e Lodos de ETAs	75
3.5.1	Caracterização Geotécnica.....	75
3.5.2	Comportamento Geotécnico.....	76
3.6	Parâmetros Geotécnicos Adotados em Obras	79
3.6.1	Aterros Sanitários.....	79
3.6.2	Bases de Pavimentos.....	81
3.6.3	Barragens.....	82
4	MATERIAIS E MÉTODOS	85
4.1	Descrição dos Materiais	85
4.1.1	LETA Taiaçupeba	85
4.1.2	Solo.....	87
4.2	Caracterização Química e Mineralógica.....	88
4.2.1	LETA Taiaçupeba	88
4.2.2	Solo.....	91
4.3	Caracterização Ambiental	92

4.4	Caracterização Geotécnica	92
4.5	Propriedades Geotécnicas do Solo e das Misturas	95
4.5.1	Compactação	95
4.5.2	Deformabilidade	96
4.5.3	Resistência ao cisalhamento.....	97
4.5.4	Permeabilidade.....	99
4.5.5	Resiliência	100
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	103
5.1	Caracterização Físico, Química e Mineralógica do LETA Taiaçupeba.....	103
5.2	Caracterização Físico, Química e Mineralógica do Solo	112
5.3	Caracterização Ambiental do LETA Taiaçupeba	112
5.4	Caracterização Geotécnica do Solo, do Lodo e das Misturas	115
5.4.1	Caracterização Geotécnica do LETA Taiaçupeba	115
5.4.2	Caracterização Geotécnica da Areia Argilosa Laterítica de Botucatu	122
5.4.3	Caracterização Geotécnica das Misturas.....	123
5.5	Ensaio Geotécnicos com o Solo e as Misturas	125
5.5.1	Compactação	125
5.5.2	Deformabilidade	130
5.5.3	Resistência ao cisalhamento.....	134
5.5.4	Permeabilidade.....	145
5.5.5	Resiliência	149
5.6	Uso em Obras Geotécnicas.....	149
5.6.1	Aterros Sanitários	149
5.6.2	Bases de Pavimentos	150
5.6.3	Barragens.....	150
6	CONCLUSÕES	153
7	RECOMENDAÇÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA.....	157
	REFERÊNCIAS	159
	ANEXO A.....	173

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

No processo de tratamento da água bruta em estações de tratamento de água (ETAs) convencionais, especificamente na lavagem dos decantadores e filtros, é gerado o resíduo conhecido como lodo de ETA, ou LETA. As características dos LETAs variam com a natureza da água bruta e com os processos e produtos químicos aplicados no tratamento. Os LETAs são normalmente compostos por materiais húmicos e minerais precipitados da água bruta em conjunto com compostos químicos incorporados no processo de tratamento, como sais de alumínio e ferro e polímeros, oriundos dos coagulantes e auxiliares de coagulação, e alcalinizantes ou acidificantes, utilizados no controle do pH. Os LETAs se apresentam em forma de suspensão aquosa – alto teor de umidade e baixo teor de sólidos – com características que variam tanto entre diferentes locais, quanto num mesmo local, devido às variações sazonais.

Diariamente são gerados grandes volumes de lodo: de acordo com Richter (2001), a porcentagem de lodo geralmente é da ordem de 0,2 a 5,0% do volume tratado, do qual entre 60 e 95% acumulados nos decantadores e o restante nos floculadores e filtros. A estimativa é que, com o aumento da demanda por água potável e poluição dos mananciais, a geração de lodo seja crescente ao longo dos anos. De acordo com a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), só no estado são produzidos 119 mil litros de água potável por segundo (SABESP, 2019), resultando em cerca de 193 toneladas de resíduo por dia em base seca¹.

No Brasil, apesar de não existir regulamentação específica para o tratamento, manejo e disposição desses resíduos, os LETAs são classificados como resíduos sólidos classe II-A (não perigosos e não inertes) pela Norma Brasileira (NBR) 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2004a), exigindo, portanto, a destinação ambientalmente adequada exigida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (BRASIL, 2010). O artigo 47 da PNRS proíbe a destinação ou disposição final de resíduos sólidos ou rejeitos em corpos hídricos.

Apesar da existência de algum avanço legislativo sobre o tema, não se observa ainda o mesmo avanço nas práticas comumente empregadas de destinação. Os LETAs têm sido geralmente descartados em corpos d'água sem nenhum tratamento

¹ 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 (JANUÁRIO & FERREIRA FILHO, 2007).

prévio ou encaminhados para aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto (ETEs). O despejo em corpos d'água causa o aumento gradativo da turbidez da água e consequente assoreamento, além da possível contaminação devido à presença de metais, produtos químicos e patógenos. Este tipo de destinação pode tornar o processo de tratamento da água gradativamente mais difícil, gerando também impactos econômicos. Quanto ao aterramento, os LETAs possuem propriedades geotécnicas, em geral, indesejáveis (alto teor de umidade, alta compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento). Soma-se a isso a crescente dificuldade de encontrar áreas disponíveis em regiões urbanizadas para constituir os aterros sanitários e os altos custos com transporte do material, devido ao grande volume gerado (ROQUE, MONTALVAN & BOSCOV, 2019). A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada em 2010, pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), indicou que apenas 27,7% dos municípios destinavam os resíduos sólidos para aterros sanitários (IBGE, 2010), índice que poderia ser ainda mais comprometido, caso a destinação dos LETAs fosse os aterros sanitários. As porcentagens da massa total de resíduos sólidos urbanos no país com destinação final adequada, isto é, em aterros sanitários, nos anos de 2010 e 2019 foram 56,8% e 59,5%, respectivamente (ABRELPE, 2020), o que indica que o quadro desenhado pela PNSB de 2010 não mudou significativamente. No caso da destinação de LETAs em ETEs, a introdução de um material de composição e teor de sólidos diferentes do esgoto sanitário pode comprometer a capacidade das estações e/ou afetar o processo de tratamento do esgoto (ROQUE, MONTALVAN & BOSCOV, 2019).

Dentre as alternativas de destinação final ambientalmente adequadas do LETA, destacam-se:

- o reuso em obras geotécnicas, como revestimento de fundo e cobertura final de aterros sanitários e industriais, como bases e sub-bases de pavimentos, em reaterro de estruturas de contenção, em preenchimento de valas e em aterros em geral (MONTALVAN et al., 2019; FERREIRA et al., 2019; MONTALVAN & BOSCOV, 2018; SILVA & HEMSI, 2018; TSUGAWA et al., 2018; O'KELLY, 2016; ROQUE & CARVALHO, 2006; BASIM, 1999; HSIEH & RAGHU, 1997; XIA, 1994; WANG et al., 1992; WANG, HULL & JAO, 1992);
- o reuso em materiais de construção civil, como tijolos, fabricação de elementos cerâmicos, blocos de concreto, elementos cimentícios e de cimento (BUSELATTO

et al., 2019; EL-DIDAMONY, KHALIL & HEIKAL, 2019; GODOY et al., 2019; WOLFF, SCHWABE & CONCEIÇÃO, 2014; PINHEIRO, ESTEVÃO & SOUZA, 2014; RODRIGUES & HOLANDA, 2013; CABRAL, 2013);

- Em tratamento de esgotos, como coagulantes ou a partir da recuperação e reuso de coagulantes ou como removedores de poluentes e elementos potencialmente tóxicos (SUMAN, AHMAD & INAMULHAQ, 2018; ABO-EL-ENEIN, SHEBL & ABO-EL-DAHAB, 2017; AHMAD et al., 2016; NAIR & AHAMMED, 2014; YANG et al., 2014; BABATUNDE & ZHAO, 2007; YANG et al., 2006 a).

Como o teor de sólidos dos LETAs é muito baixo e altamente variável – dependente da qualidade de água, quantidade de sólidos suspensos removidos da água bruta, dos equipamentos de agitação utilizados, do método de desaguamento empregado (remoção parcial da água) e do coagulante adicionado (RAGHU et al., 1987) – muitos dos estudos citados partem do princípio do desaguamento do material – seja visando o controle de umidade para posterior utilização, seja visando a redução do seu volume para transporte e acomodação – e/ou a mistura com outros materiais, como solo, argila e cimento. Existem diversos métodos de desaguamento, mecânicos e não mecânicos, dentre eles: bolsas geotêxteis, centrífugas, filtros a vácuo, filtros prensa, lagoas de lodo, leitos de secagem e prensa desidratadora. Entretanto, o desaguamento normalmente é custoso e demorado.

Esta pesquisa se propõe a investigar a utilização do LETA em obras geotécnicas. A pesquisa se enquadra nas áreas prioritárias Resíduos Sólidos e Preservação Ambiental das Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável definidas pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações para o período de 2020-2023 e nos objetivos Água Limpa e Saneamento e Cidades e Comunidades Sustentáveis dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU). O reaproveitamento do resíduo produzido no tratamento de água bruta faz com que o processo transponha o modelo linear insustentável do sistema econômico vigente (FROSCH & GALLOPOULOS, 1989) em direção a um sistema econômico cíclico sustentável. Paralelamente ao apelo de preservação ambiental associado à reutilização do resíduo, a proposta contribui para a preservação das jazidas naturais de solo, uma vez que visa diminuir o volume requerido desse recurso nas obras.

O 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 a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP)” (Processos 13/50448-8, 17/24056-6 e 19/17183-7), desenvolvido conjuntamente pela Escola Politécnica (EP) da Universidade de São Paulo (USP), Instituto Tecnológica da Aeronáutica (ITA) e Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo 310801/2017-6).

2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é verificar a viabilidade de reuso do lodo proveniente da ETA Taiaçupeba, município de Suzano (São Paulo), com a umidade em que é coletado na ETA (chamada neste trabalho de umidade *in natura*), misturado a um solo laterítico areno-argiloso em obras geotécnicas, a partir da definição do máximo teor de lodo a ser adicionado ao solo sem que haja alterações significativas em suas propriedades geotécnicas.

Os objetivos específicos do trabalho são: contribuir para o conhecimento de questões ainda em aberto, como a variabilidade das propriedades dos LETAs; caracterizar o lodo química, mineralógica e geotecnicamente; caracterizar geotecnicamente o solo e três misturas com diferentes proporções do solo laterítico e do LETA; analisar a influência da adição do lodo nas propriedades geotécnicas de um solo (deformabilidade, resistência ao cisalhamento, permeabilidade e resiliência) e verificar a viabilidade de utilização das misturas em obras geotécnicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Economia Circular

A economia circular pode ser vista como uma alternativa à abordagem atual de economia linear e unidirecional, na qual os recursos são extraídos, usados para um objetivo dentro da cadeia produtiva e descartados ao longo do processo industrial ou ao final do ciclo de vida do produto pelo consumidor. De acordo com MacArthur (2020): “Uma economia circular é baseada nos princípios de eliminação de resíduos e poluição, manutenção de produtos e materiais em uso e regeneração de sistemas naturais”. Nesta proposição, os recursos naturais são inicialmente obtidos do ambiente, e, depois, o que seria descartado passa a ser reinserido em um novo ciclo de produção, recebendo agregação de valor (Motta, 2018; Ellen MacArthur Foundation, 2015). Ou seja, o que era considerado resíduo passa a ser matéria-prima de outro processo, tal que o fluxo de materiais passa a ser mantido continuamente num ciclo industrial fechado (Figura 1).

Figura 1 – Economia Circular vs. Economia Linear.

Fonte: Lazzarotto (2018).

Mesmo com o aumento de ecoeficiência, a disponibilidade de muitos recursos não-renováveis, como metais e combustíveis fósseis, não é suficiente para atender à demanda humana atual, além da capacidade regenerativa de recursos renováveis, como florestas e água, ser inferior às taxas de extração (Berndtsson, 2015; Braungart & McDonough, 2008). Daí a importância do fechamento das cadeias produtivas.

De acordo com a Ellen MacArthur Foundation (2017), a economia circular proporciona oportunidades de inovação e criação de valor no Brasil, tendo como princípios:

- preservar e aprimorar o capital natural controlando os fluxos de recursos renováveis;
- otimizar o rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais em uso no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico;
- estimular a efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o princípio.

A proposta deste trabalho se insere na economia circular ao propor o reaproveitamento dos resíduos sólidos resultantes do tratamento de água bruta na indústria da construção civil em obras geotécnicas. Ou seja, os LETAs passam de resíduo a matéria-prima em outro processo.

3.2 Tratamento de Água Bruta

No Brasil, o tratamento de água é dividido em duas categorias: convencional e não-convencional. O tratamento convencional abrange os processos de floculação associado a coagulação, decantação, filtração e desinfecção, podendo ocorrer também, as etapas de correção de pH e fluoretação. O tratamento não-convencional não engloba todas as etapas descritas, sendo mais simples. Alguns dos processos considerados não-convencionais são: tratamento em estação de tratamento de água compacta, pressurizada ou não; filtração direta; clarificação de contato; dessalinização e simples desinfecção (PÁDUA & HELLER, 2010).

De acordo com o IBGE (2017), do total de 5.570 municípios brasileiros, 5.517 (99,1%) contavam com serviço de abastecimento de água por rede geral de distribuição, dos quais 4.873 (87,5%) empregavam algum tipo de tratamento, com

ETAs ou Unidades de Tratamento Simplificado (Figura 2)². Ainda, do total de municípios, 1.825 (32,8%) reportaram geração de lodo no processo de tratamento de água, sendo a destinação apresentada na Figura 3³.

Figura 2 – Tipos de tratamento de água no Brasil.

Fonte: IBGE (2017) ; imagem elaborada pela autora.

Figura 3 – Destinação dos lodos de ETA no Brasil.

Fonte: IBGE (2017) ; imagem elaborada pela autora.

² Na PNSB, cada município podia apontar mais de uma resposta para o tipo de tratamento de água empregado.

³ Na PNSB, cada município podia apontar mais de uma resposta para a destinação do lodo gerado.

3.2.1 Tratamento de Água Convencional ou de Ciclo Completo

De acordo com a SABESP (2020), no estado de São Paulo o tratamento passa por nove processos, conforme esquematizado na Figura 4.

Figura 4 - Sistema de tratamento de água.

Fonte: SABESP (2020).

O processo se inicia com a captação e bombeamento da água bruta dos corpos d'água para a ETA (1), onde passa por um processo de filtração. Em seguida, ocorrem três processos químicos: a oxidação, pré-alcalinização e a coagulação (2). A água é então encaminhada para estruturas de floculação (3), decantação (4) e filtração (5). Ao final, a água é submetida à pós-alcalinização, desinfecção e fluoretação (6). A água tratada é então armazenada em reservatórios de distribuição (7) e posteriormente destinada aos reservatórios de bairros (8). A água passa por adutoras e, em seguida, pelas redes de distribuição, chegando às residências, onde será armazenada nas caixas d'água (9).

Nas ETAs, o processo se inicia com a oxidação, por aeração ou química, e pré-alcalinização, que têm por objetivo conjunto reduzir a concentração de contaminantes que não são normalmente removidos de modo satisfatório durante o tratamento e aumentar o potencial hidrogeniônico (pH) (PÁDUA & HELLER, 2010). A oxidação química se dá por adição de cloro (Cl), ozônio (O₃), dióxido de cloro (ClO₂), permanganato de potássio (KMnO₄) ou peróxido de hidrogênio (H₂O₂), que tornam alguns metais insolúveis, principalmente o ferro e o manganês, formando precipitados, que serão posteriormente removidos em decantadores ou filtros (PÁDUA & HELLER,

2010). Além dos contaminantes inorgânicos, a oxidação e a pré-alkalinização facilitam a remoção de contaminantes orgânicos, como as substâncias húmicas, responsáveis pela cor da água bruta.

A coagulação (2) envolve a adição de coagulantes químicos (cargas positivas) com a finalidade de reduzir as forças que mantêm separadas as partículas em suspensão (cargas negativas), e é seguida pela etapa de floculação, que promove a colisão entre as partículas previamente desestabilizadas, formando partículas de maior tamanho. A coagulação consiste na mistura rápida do coagulante com a água, enquanto a floculação se dá por agitação lenta do material para formação dos flocos (RICHTER, 2009).

Na coagulação ocorrem fenômenos químicos e físicos (CABRAL, 2013). Os químicos decorrem da reação do coagulante com a água e a consequente formação de espécies hidrolisadas com carga positiva e do precipitado de hidróxido do metal (ferro ou alumínio) amorfo (ou não-cristalino). Esses fenômenos são dependentes da concentração do metal e do pH da mistura. Os fenômenos físicos decorrem da floculação, que promove o transporte das espécies químicas recém-formadas, para que haja o contato com as impurezas presentes na água e a desestabilização eletrostática ou o arraste de partículas (hidróxido precipitado).

Os principais coagulantes utilizados são cloreto de polialumínio (*polyaluminum chloride* – “PACl”), policloreto de alumínio (*aluminum polychloride* – “PAC”), cal (CaO), sulfato de alumínio (SFA, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), cloreto férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), sulfato ferroso clorado ($\text{Fe}(\text{SO}_4)_3 + \text{FeCl}_3 + 7\text{H}_2\text{O}$), sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) e sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Em alguns casos específicos, empregam-se polímeros como auxiliares na coagulação visando aumentar a duração da filtração, reduzir os gastos com produtos químicos, diminuir o volume de lodo gerado e aumentar a eficiência de remoção de cor, turbidez e carbono orgânico da água (PÁDUA & HELLER, 2010). Os polímeros não afetam o pH, nem a alcalinidade da água (RICHTER, 2009). Deve-se ressaltar, contudo, que dosagens muito elevadas podem comprometer o desempenho dos filtros, reduzindo a duração da carreira de filtração e produzindo resultado inverso ao desejado (PÁDUA & HELLER, 2010).

Em seguida, ocorre a etapa de decantação (4), que é o processo físico de separação de partículas em suspensão da água, por atuação das forças gravitacionais

separando partículas de densidade superior à da água, depositando-as no fundo dos decantadores e formando o lodo.

A água segue para a etapa de filtração (5), que é o processo físico-químico e – no caso dos filtros lentos, também biológico – utilizado para a separação de impurezas em suspensão da água, mediante sua passagem por meio poroso (RICHTER, 2009). Dentre os materiais mais utilizados na composição dos filtros se encontram as areias, o antracito e o carvão ativado granular (RICHTER, 2009). A filtração rápida em meio granular é o resultado da ação de três mecanismos: transporte, aderência e desprendimento. Segundo Pádua & Heller (2010), o transporte de partículas é um fenômeno físico, afetado principalmente pelos parâmetros que governam a transferência de massa, tais como tamanho dos grãos do meio filtrante, taxa de filtração, temperatura da água, densidade e tamanho das partículas suspensas no afluente. A aderência é um fenômeno físico-químico, influenciado pelo tipo e dosagem de coagulante aplicado no pré-tratamento e pelas características da água e do meio filtrante e consiste na retenção das partículas suspensas por agregação ao filtro (PÁDUA & HELLER, 2010). O mecanismo de desprendimento é o resultado da superação das forças de aderência pelas forças de cisalhamento do escoamento, e faz com que as partículas migrem para a camada subsequente do meio filtrante, viabilizando a filtração (BRAGA, 2005).

Ao final, a água é submetida às etapas de pós-alkalinização, desinfecção e fluoretação (6). Na primeira, tem-se a correção do pH da água, com cal, com objetivo de formar uma película na superfície interna dos tubos condutores de água que os protegem contra a corrosão. A desinfecção tem o objetivo de eliminar os micro-organismos patogênicos, tais como bactérias, protozoários, vírus e vermes, presentes na água. O mecanismo de desinfecção depende de diversos fatores, tais como tempo de contato com a água, dosagem, tipo de agente químico, intensidade e natureza do agente físico utilizado como desinfetante e tipos de organismos (PÁDUA & HELLER, 2010). O cloro é o desinfetante mais utilizado, pois é eficiente, economicamente viável e de fácil disponibilidade. Entretanto, existem outros agentes químicos como ozônio, iodo e prata. Por fim, na fluoretação, adiciona-se flúor para proteção contra a decomposição do esmalte dos dentes e consequente formação de cáries. A água tratada é então armazenada em reservatórios de distribuição.

Ao longo de todo este processo é gerada uma quantidade considerável de resíduos, sendo os principais: a água de lavagem dos filtros, lodos dos decantadores e rejeito de limpeza dos tanques de produtos químicos, que juntos compõem os LETAs. Segundo Ferreira Filho (1997), em volume, as maiores quantidades de resíduo gerado provêm da lavagem dos filtros. Já em massa, as maiores quantidades provêm dos decantadores. Yuzhu (1996) afirma que a quantidade de lodo originária da lavagem dos filtros está entre 5-40% e a quantidade gerada nos decantadores entre 60-95% da quantidade total de resíduos produzidos, em massa.

3.3 Lodos de ETAs

3.3.1 Caracterização Mineralógica

A Difractometria de Raios-X (DRX), a Fluorescência de Raios-X (FRX) e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) são as principais técnicas de caracterização mineralógica utilizadas.

Na DRX, cada espécie mineral é caracterizada por um arranjo sistemático atômico (ou de íons) específico, com planos cristalinos característicos que podem difratar raios-X. A difração dos raios-X pelos átomos em um plano cristalino produz padrões característicos quando registrados (ângulos e intensidades). Esses padrões de difração são usados como impressão digital na identificação de espécies minerais, produzindo uma série de pontos ou linhas, chamadas bandas (TAN, 2011).

A FRX consiste na incidência de um feixe de raios-X em uma amostra, fazendo com que seus elétrons sejam ejetados das camadas próximas do núcleo (TRINDADE, 2016). As vacâncias criadas são preenchidas por elétrons das camadas mais externas, emitindo raios-X (fluorescentes ou secundários), cujas energias correspondem à diferença entre as energias dos níveis e subníveis das transições. Cada tipo de átomo tem um espectro de raios-X característico e único que é utilizado como comparativo para a identificação. A intensidade da FRX de certo comprimento de onda se relaciona à concentração do elemento que o emitiu. A análise por FRX é semiquantitativa e fornece a composição química expressa na forma de óxidos dos elementos.

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um dos mais versáteis instrumentos para se obter informações sobre a morfologia dos minerais. Quando possuem detectores que captam raios-X característicos por dispersão de energia (Espectroscopia por Energia Dispersiva - EDS), são chamados MEV-EDS, e fornecem informações também sobre os elementos químicos que os compõem. O MEV produz imagens com aparência tridimensional, resultado direto da grande profundidade de campo e permite o exame em aumentos sucessivos, com grande profundidade de foco, aliando as informações da imagem eletrônica e da imagem óptica (DEDAVID, GOMES & MACHADO, 2007). Segundo os autores, a principal razão de sua utilização é a alta resolução obtida na observação das amostras.

A composição química obtida por FRX e a perda ao fogo de diversos LETAs do mundo se encontram nas Tabelas 1 e 2. A grande maioria dos autores obteve como principais componentes alumínio, ferro e silício – elementos entre os mais abundantes na crosta terrestre, além do ferro e do alumínio serem dos mais utilizados como coagulantes – nas formas Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 . Richter (2001) afirma que nos LETAs de SFA, o teor de Al_2O_3 varia entre 15 e 40%, enquanto nos LETAs férricos, o teor de ferro varia entre 4,6 e 20,6%. Já para O'Kelly (2016), os compostos mais abundantes nos LETAs de SFA são: mais de 30% em peso de SiO_2 , 10-56% em peso de Al_2O_3 e aproximadamente 5% em peso de Fe_2O_3 , enquanto para os lodos férricos são: mais de 30% em peso de Fe_2O_3 , 10-20% em peso de Al_2O_3 e uma quantidade variável de SiO_2 . Em lodos brasileiros, o teor de Al_2O_3 foi associado à caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), o teor de Fe_2O_3 à hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), e o SiO_2 , ao quartzo, presentes entre os sólidos suspensos na água bruta. O teor de Al_2O_3 também foi relacionado à utilização de SFA ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) no tratamento da água e o de Fe_2O_3 ao uso de coagulantes férricos (ROQUE, MONTALVAN & BOSCOV, 2019).

As perdas ao fogo realizadas em diferentes etapas, tempos de exposição e temperaturas, resultaram em perdas de massa entre 7,41% e 57,73%. De acordo com os autores, a perda de massa ao fogo se relaciona à decomposição de matéria orgânica. Em investigações mais aprofundadas, Tartari et al. (2011), Rodríguez et al. (2010) e Oliveira, Machado & Holanda (2004) atribuíram a perda de massa à perda de umidade, perto dos 54°C; à desidratação dos hidróxidos existentes, tais como gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), próximo dos 264°C; à decomposição de

matéria orgânica e à descarbonatação de carbonatos, próximo dos 305°C; e à desidroxilação de filossilicatos e argilominerais (como a caulinita, levando a formação de metacaulinita), próximo dos 477°C.

Uma síntese de composições mineralógicas encontradas na bibliografia se encontra na Tabela 3. De maneira geral, todos os trabalhos apresentados indicaram composição mineralógica semelhante. Destacam-se as presenças do quartzo e da caulinita, e em segundo lugar, da hematita, goethita e gibbsita. Deve-se atentar para o fato de que muitos dados são nacionais e, portanto, mostram composição coerente com a composição mineralógica de solos tropicais. As composições mineralógicas e orgânicas dos LETAs são determinadas pela fonte da água bruta das quais derivam, tipos e extensões de processos de tratamento empregados, quantidades de íons, sólidos em suspensão e materiais coloidais removidos e os tipos de produtos químicos adicionados nos processos de tratamento e desidratação (O'KELLY, 2016).

A presença de material amorfo foi relatada por vários autores (RAMIREZ et al., 2018; SUMAN, AHMAD & INAMULHAQ, 2018; ABO-EL-ENEIN, SHEBL & ABO-EL-DAHAB, 2017; AHMAD, AHMAD & ALAM, 2016 a; DELGADO, 2016; CABRAL, 2013; RODRÍGUEZ et al., 2010; PAIXÃO et al., 2008; BARROSO, 2007; YANG et al., 2006 a, 2006 b; REIS, 2006; TEIXEIRA et al., 2006). Nas DRX, observou-se a ausência de picos de difração característicos de nitidez e a presença de bandas largas com baixas intensidades, indicando partículas mal ordenadas e não cristalinas. Na MEV, os autores relataram complexa morfologia, com partículas sem forma definida ou forma distinta, que sugerem a ausência da fase cristalina. Fazem parte do material amorfo compostos húmicos e óxidos e hidróxidos de alumínio e/ou ferro. De acordo com Tan (2011), no contexto dos solos, os compostos húmicos são a fração formada durante a decomposição de plantas e animais com ou sem a assistência de microrganismos. Os óxidos e hidróxidos são os produtos da reação dos sais utilizados como coagulantes e auxiliares de coagulação com a água, formando espécies hidrolisadas com carga positiva e precipitados do metal (ferro ou alumínio) amorfo (ou não-cristalino), como: $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Hidróxido de Alumínio), Al_2O_3 (Óxido de Alumínio), FeO (Óxido de Ferro II), Fe_2O_3 (Óxido de Ferro III), $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de Ferro II) e $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Hidróxido de Ferro III).

Tabela 1 – Composição química de diferentes LETAs.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)			(8)	(9)	(10)		(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	A (%)	B (%)	C (%)	(%)	(%)	A (%)	B (%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Al ₂ O ₃	21,50	26,70	28,84	24,20	16,76	22,21	27,16	23,89	12,91	8,89	14,38	29,80	28,60	31,10	17,70	30,10	26,33	31,18	24,00	31,60
Fe ₂ O ₃	11,30	12,40	9,92	17,50	5,52	5,65	11,51	20,60	4,05	46,00	5,20	7,00	9,00	6,60	8,76	12,30	24,00	10,21	4,90	18,60
SiO ₂	28,40	52,20	54,10	27,30	67,75	36,51	7,77	8,02	74,62	18,30	52,78	12,60	12,00	15,60	66,20	37,50	26,84	29,59	44,00	24,10
MnO	-	0,30	0,37	0,10	0,09	-	0,50	0,69	0,03	0,21	0,08	-	-	0,20	0,13	0,30	1,11	0,14	-	-
MgO	0,30	1,50	0,64	0,20	3,33	1,34	0,13	0,15	<0,01	0,44	3,08	0,32	0,32	0,10	0,96	0,40	0,32	-	1,10	-
CaO	0,50	0,50	3,10	0,20	2,37	2,66	0,66	0,49	2,00	1,59	4,39	0,11	0,15	0,30	0,57	0,20	0,14	0,34	1,20	-
Na ₂ O	0,10	-	0,30	0,10	-	1,35	0,04	0,02	<0,02	0,10	-	<0,10	<0,10	-	0,32	0,20	0,03	-	1,30	-
K ₂ O	0,30	4,20	0,75	0,10	3,03	0,49	0,18	0,18	0,40	1,00	3,62	0,28	0,20	0,20	1,16	0,90	0,34	1,27	1,60	0,30
TiO ₂	-	2,20	1,28	2,35	0,51	-	0,23	0,24	0,80	0,42	0,61	0,32	0,30	0,30	0,86	1,00	1,26	1,04	0,40	2,20
P ₂ O ₅	-	-	-	0,30	-	0,08	0,42	0,43	0,04	0,25	0,17	0,75	0,90	0,30	0,33	-	0,31	-	0,44	-
SO ₃	1,00	-	0,54	0,40	-	-	-	-	-	-	-	1,30	1,30	0,80	-	-	-	1,61	-	2,80
ZnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-	-	<0,10	-	-	-	0,02	-	-
MnO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CuO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Outros	-	-	0,04	0,30	-	-	-	-	-	-	-	0,21	0,21	<0,70	-	-	-	0,10	-	-
PF	35,32	-	-	27,10	-	28,10	51,31	45,12	7,41	22,00	8,96	47,20	46,80	44,49	-	17,10	19,32	24,50	9,0 - 26,1	20,40

Nota: PF – Perda ao fogo.

Fontes: (1) Buselatto et al. (2019); (2) Godoy et al. (2019); (3) El-Didamony, Khalin & Heikal (2019); (4) Ramirez et al. (2018); (5) Suman, Ahmad & InaMulhaq (2018); (6) Abo-El-Enein, Shebl & Dahab (2017); (7) Muchimbane (2016); (8) Montalvan (2016); (9) Ahmad, Ahmad & Alam (2016 b); (10) Delgado (2016); (11) Andrade et al. (2016); (12) Gastaldini et al. (2015); (13) Wolff, Schwabe & Conceição (2014); (14) Pinheiro, Estevão & Souza (2014); (15) Rodrigues & Holanda (2013); (16) Watanabe et al (2011); (17) Tartari et al. (2011).

Tabela 2 – Composição química de diferentes LETAs.

	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)				(26)	(27)	(28)		(29)	(30)	(31)		
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	(%)	(%)	A (%)	B (%)	(%)	(%)	HWD (%)	JCD (%)	WQD (%)
Al ₂ O ₃	26,30	19,90	17,57	15,28	27,36	8,60	20,19	23,75	21,10	25,50	27,80	13,07	31,71	23,62	20,80	26,40	22,30	15,18	8,66	25,43
Fe ₂ O ₃	6,60	6,29	5,18	21,01	6,99	73,00	6,23	11,60	11,70	17,10	16,00	4,15	12,79	8,39	7,59	13,50	6,60	14,04	6,61	5,47
SiO ₂	49,20	52,18	29,63	53,36	40,61	12,60	14,49	32,00	28,40	19,60	24,20	16,55	35,92	14,10	12,75	27,80	34,80	9,98	7,41	8,09
MnO	-	-	0,15	0,73	-	0,50	-	0,175	0,06	0,46	0,44	0,22	0,09	-	-	-	0,17	-	-	-
MgO	1,00	1,38	2,15	-	1,89	-	-	0,98	0,41	0,39	0,21	0,15	0,37	0,15	0,42	0,23	0,69	0,85	0,54	0,25
CaO	0,80	1,68	11,85	1,20	2,62	5,2	0,13	0,47	0,08	0,25	0,09	0,43	0,10	0,33	0,36	0,05	0,40	8,07	39,64	1,92
Na ₂ O	0,60	0,97	6,09	-	1,05	-	-	0,24	0,17	0,10	0,10	0,04	0,06	<0,02	0,10	0,13	0,23	-	-	-
K ₂ O	3,20	2,90	2,85	5,41	1,28	-	0,14	2,65	2,60	1,50	2,10	0,06	0,58	0,11	0,27	0,27	0,57	-	-	-
TiO ₂	-	-	0,56	1,38	-	-	0,39	1,1	0,96	0,79	0,85	0,19	1,10	0,35	0,68	0,95	0,94	0,52	0,33	0,03
P ₂ O ₅	-	-	0,94	0,83	-	-	0,53	0,44	0,29	0,52	0,38	0,26	0,35	0,34	0,69	-	-	1,13	0,22	0,96
SO ₃	0,10	-	0,34	-	-	-	-	0,81	1,20	0,76	0,54	-	-	-	-	-	-	2,30	0,73	2,41
ZnO	-	-	-	-	-	-	-	0,02	0,009	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-	0,09	0,04	0,05
MnO ₂	-	-	-	-	-	-	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,83	0,50	5,77
CuO	-	-	-	-	-	0,10	-	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-	1,39	0,03	0,05
Outros	-	-	5,26	-	<1,00	-	-	0,51	0,16	0,66	0,26	15,09	-	3,60	5,23	-	2,90	1,05	0,44	0,07
PF	-	-	22,70	-	17,20	18,00	57,73	25,8	32,8	32,4	26,9	49,79	16,93	49,01	51,12	24,50	27,99	-	-	-

Nota: PF – Perda ao fogo.

Fontes: (18)Yen, Tseng & Lin (2011); (19)Chen, Mab & Dai (2010); (20)Rodríguez et al. (2010); (21)Chiang et al. (2009); (22)Zou, Xu e Li (2009); (23)Paixão et al. (2008); (24)Vieira, Margem & Monteiro (2008); (25)Reis (2006); (26)Hoppen et al. (2005); (27)Oliveira, Machado & Holanda (2004); (28)Portella et al. (2003); (29)Dias et al. (2002) apud Barroso (2007); (30)Santos et al. (2000); (31)Basim (1999).

Tabela 3 – Composição mineralógica de diferentes LETAs.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Quartzo - SiO_2	P	P	P	P	P	P	P	-	P	-	P	P	P	P	P	P	-	P	-	P	P	P	P	P	P
Caulinita - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	-	P	-	P	-	-	P	P	P	P	P	P	P	P	P	-	P	P	P	P	P	P	-	-	-
Gibbsita - $\text{Al}(\text{OH})_3$	-	-	-	-	-	-	-	P	-	-	P	P	P	-	-	-	P	P	-	-	P	-	-	-	-
Goethita - $\text{FeO}(\text{OH})$	-	-	-	P	-	-	P	-	-	-	P	P	P	-	-	-	P	-	-	-	P	-	-	-	-
Hematita - Fe_2O_3	-	-	P	-	-	-	-	-	P	P	-	-	-	-	P	-	P	-	P	P	P	P	-	-	-
Muscovita - $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-	-	-	-	-	-	P	P	-	-	-	-	-	-	-	P	-	-	-	-	P	-	-	-	-
Magnetita - Fe_3O_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P	-	-	-	-	-
Rutilo/Anatásio - TiO_2	-	-	-	P	-	-	-	P	-	P	-	-	P	-	-	P	-	-	-	-	P	-	-	-	-
Calcita - CaCO_3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P	-	-	-	-	-	-	-	P	-
Sulfato de alumina hidratado - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-
Silicato de alumínio hidratado - $\text{Al}_4\text{SiO}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feldspato/Anortoclase	-	-	-	-	-	-	-	-	P	-	-	-	-	P	-	P	-	-	-	-	-	P	-	-	-
Mica/Ilita	-	-	-	-	-	P	-	P	-	P	-	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alumina - Al_2O_3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-	P	-	P
Grafite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P	P	P
<i>Ringwoodita</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P
Rodocrosita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P
Hercinita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P	-
Albita	-	P	-	-	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Leadhillita - $\text{Pb}_4\text{SO}_4(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Clorita/Serafinita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dolomita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: P - Presente.

Fontes: (1)Buselatto et al. (2019); (2)Godoy et al. (2019); (3)El-Didamony, Khalin & Heikal (2019); (4)Ramirez et al. (2018); (5)Suman, Ahmad & InaMulhaq (2018); (6)Abo-El-Enein, Shebl & Dahab (2017); (7)Montalvan (2016); (8)Delgado (2016); (9)Gastaldini et al. (2015); (10)Pinheiro, Estevão & Souza (2014); (11)Rodrigues & Holanda (2013); (12)Cabral (2013); (13)Teixeira et al. (2011); (14)Watanabe et al. (2011); (15)Tartari et al. (2011); (16)Rodríguez et al. (2010); (17)Paixão et al. (2008); (18)(19)Barroso (2007); (20)Hoppen et al. (2005); (21)Wolff et al. (2005); (22)Santos et al. (2000); (23)(24)(25)Basim (1999).

3.3.2 Caracterização Ambiental

A NBR 10.004 (ABNT, 2004 a) classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. Os resíduos são divididos em perigosos e não perigosos. Os perigosos (Classe I) são aqueles que apresentam inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, ou apresentam periculosidade, isto é:

Característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, pode apresentar:

- a) risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices;
- b) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

(ABNT, 2004 a)

Os resíduos não perigosos (Classe II) são classificados em não inertes (A) e inertes (B). Os resíduos não inertes (II-A) são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou classe II-B e podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Os resíduos não-perigosos inertes (II-B) são aqueles que, quando amostrados de uma forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004 b), não apresentarem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões estabelecidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004 a).

Os ensaios de solubilização (NBR 10.006 – ABNT, 2004 b) e lixiviação (NBR 10.005 – ABNT, 2004 c) – ou Método 1.311 (USEPA, 1992) (TCLP - *Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) – são os métodos utilizados para classificação e diagnóstico sobre quanto do material será transferido para o meio natural. A solubilização consiste em um mecanismo de dissolução de um determinado material ou produto em água, enquanto a lixiviação é o processo de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo, por meio de dissolução no meio extrator.

Buselatto et al. (2019), Godoy et al. (2019), Delgado (2016), Silveira, Koga & Kuroda (2013) e Cordeiro (2011) realizaram ensaios de lixiviação e solubilização de diferentes LETAs. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 4 e 5. Silveira, Koga

& Kuroda (2013) avaliaram, além dos parâmetros inorgânicos apresentados nas tabelas, diversos parâmetros orgânicos, entretanto todos estiveram muito abaixo do limite máximo da NBR 10.004 (ABNT, 2004) ou não foram detectados.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de lixiviação - parâmetros inorgânicos de LETAs.

	(1) (mg.L ⁻¹)	(2) (mg.L ⁻¹)	(3) (mg.L ⁻¹)	(4) (mg.L ⁻¹)	(5) (mg.L ⁻¹)	Limite Máximo (mg.L ⁻¹)
pH	5,13	4,92	6,31	5,50	5,10	-
Arsênio (As)	0,0060	≤ 0,0001	-	< 0,0010	< 0,0400	1,0000
Bário (Ba)	0,2020	2,9700	0,6567	< 0,0700	0,3700	70,0000
Cádmio (Cd)	≤ 0,0010	0,0040	0,0001	< 0,0010	< 0,0030	0,5000
Chumbo (Pb)	≤ 0,0040	0,0040	0,0016	< 0,010	< 0,0300	1,0000
Cromo (Cr)	0,0660	0,0340	0,0278	< 0,010	0,0030	5,0000
Fluoreto (F)	0,1010	0,0600	-	< 0,0140	< 0,0500	150,0000
Mercúrio (Hg)	0,0020	≤ 0,0001	-	< 0,0001	< 0,0005	0,1000
Prata (Ag)	≤ 0,0020	0,0004	-	< 0,0100	< 0,0030	5,0000
Selênio (Se)	0,0090	≤ 0,0001	-	< 0,0080	< 0,0500	1,0000

Nota: Limite Máximo de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004 A, ANEXO F).

Fontes: (1)Buselatto et al. (2019); (2)Godoy et al. (2019); (3)Delgado (2016); (4)(5)Silveira, Koga & Kuroda (2013).

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de solubilização - parâmetros inorgânicos de LETAs

	(1) (mg.L ⁻¹)	(2) (mg.L ⁻¹)	(3A) (mg.L ⁻¹)	(3B) (mg.L ⁻¹)	(4A) (mg.L ⁻¹)	(4B) (mg.L ⁻¹)	(4C) (mg.L ⁻¹)	Limite Máximo (mg.L ⁻¹)
pH	7,40	-	5,50	5,10	-	-	-	-
Alumínio (Al)	0,4100	< 0,0028	< 0,1000	< 0,0500	11100,00	2,16	30,00	0,2000
Arsênio (Ar)	≤ 0,0001	-	< 0,0010	< 0,0010	-	-	-	0,0100
Bário (Ba)	0,2900	0,4618	< 0,0700	0,3800	-	-	-	0,7000
Cádmio (Cd)	0,0008	< 0,0001	< 0,0010	< 0,0030	0,02	0,00	0,27	0,0050
Chumbo (Pb)	≤ 0,0001	< 0,0002	< 0,0100	< 0,0100	1,60	-	1,06	0,0100
Cianetos	≤ 0,0100	-	< 0,0020	0,0060	-	-	-	0,0700
Cloretos	30,5000	29,1900	84,2300	150,0000	-	-	-	250,0000
Cobre (Cu)	0,0330	0,0071	< 0,0090	< 0,0030	2,06	1,70	0,09	2,0000
Cromo (Cr)	0,0280	< 0,0001	< 0,0100	< 0,0020	1,58	0,19	0,86	0,0500
Fenóis	-	-	-	0,0350	-	-	-	0,0100
Ferro (Fe)	0,1900	0,6320	3,9700	< 0,0020	5000,00	214,00	4200,00	0,3000
Fluoreto (F)	0,2200	-	< 0,1400	0,0590				1,5000

	(1) (mg.L ⁻¹)	(2) (mg.L ⁻¹)	(3A) (mg.L ⁻¹)	(3B) (mg.L ⁻¹)	(4A) (mg.L ⁻¹)	(4B) (mg.L ⁻¹)	(4C) (mg.L ⁻¹)	Limite Máximo (mg.L ⁻¹)
Manganês (Mn)	3,4900	6,4980	9,4700	2,1500	60,00	3,33	30,00	0,1000
Mercúrio (Hg)	≤ 0,0001	-	< 0,0001	< 0,0005	-	-	-	0,0010
Nitrato (NO ₃ ⁻)	0,4000	-	8,4000	0,1900	-	-	-	10,0000
Prata (Ag)	0,0010	-	< 0,0100	< 0,0030	-	-	-	0,0500
Selênio (Se)	≤ 0,0001	-	< 0,0080	< 0,0020	-	-	-	0,0100
Sódio (Na)	4,1200	39,0040	4,9000	3,9700	-	-	-	200,0000
Sulfato (SO ₄)	40,0000	-	83,8000	16,6000	-	-	-	250,0000
Surfactantes	1,6700	-	0,0900	<0,0300	-	-	-	0,5000
Zinco (Zn)	0,0740	0,0070	< 0,1000	0,0400	4,25	0,10	48,53	5,0000

Nota: Limite Máximo de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004 A, ANEXO G); em negrito, componentes com concentrações acima dos limites máximos.

Fontes: (1)Godoy et al. (2019); (2)Delgado (2016); (3) Silveira, Koga & Kuroda (2013); (4)Cordeiro (2001).

Como os extratos de lixiviação não apresentaram componentes em concentrações acima dos limites especificados na NBR 10.004 (ABNT, 2004 a) e os extratos solubilizados apresentaram alguns componentes acima dos limites, os LETAs são classificados como Classe II-A: resíduos não perigosos e não inertes.

No geral, os resultados dos ensaios de lixiviação apresentados atenderam a todas as especificações. Em todos os ensaios de solubilização, no entanto, Mn apareceu acima do limite máximo. Godoy et al. (2019) relacionaram esse componente à composição do solo do Rio Itajaí-Açú (Brasil), onde foi coletada a água bruta, e aos resíduos químicos de processos industriais lançados no rio, enquanto a presença de surfactantes, também superior ao limite no LETA, foi relacionada aos produtos químicos orgânicos utilizados em detergentes, produtos de limpeza domésticos e produtos de higiene pessoal. O primeiro lodo analisado por Silveira, Koga e Kuroda (2013), proveniente da ETA Cafezal, a qual utiliza cloreto férrico como coagulante, apresentou concentrações de Fe superiores à norma. O segundo lodo, proveniente da ETA Tibagi, que utiliza o hidróxi-cloreto de polialumínio como coagulante, além do Mn, apresentou o parâmetro fenóis em concentração acima do limite.

Na Tabela 6, elaborada por Babatunde & Zhao (2007), a partir de uma revisão bibliográfica internacional, estão apresentadas as concentrações de elementos potencialmente tóxicos em LETAs, dependendo do tipo de coagulante utilizado no

tratamento da água bruta. Os limites máximos apresentados na Tabela 6 se referem aos estabelecidos pela Resolução nº 375 (CONAMA, 2006), que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário.

Tabela 6 - Composição típica quanto a elementos potencialmente tóxicos de LETAs.

Parâmetro	Agente coagulante ou condicionante			Limite Máximo
	Alumínio	Ferro	Cal	
Zinco (mg.kg ⁻¹)	33,9 ± 28,0	18,7 ± 16,0	2,5 ± 0,7	2800
Chumbo (mg.kg ⁻¹)	44,1 ± 38,2	19,3 ± ±25,3	1,9 ± 1,1	300
Cádmio (mg.kg ⁻¹)	0,5	0,5 ± 0,3	0,4 ± 0,02	39
Níquel (mg.kg ⁻¹)	44,3 ± 38,4	42,9 ± 39,2	1,0 ± 0,5	420
Cobre (mg.kg ⁻¹)	33,7 ± 32,5	18,7 ± 25,8	3,6 ± 3,1	1500
Cromo (mg.kg ⁻¹)	25,0 ± 20,1	25,7 ± 21,6	1,3 ± 0,2	1000
Cobalto (mg.kg ⁻¹)	1,1	1,6+1,1	0,7+0,05	-

Nota: Limite Máximo de acordo com a Resolução CONAMA nº 375 (2006).

Fonte: Babatunde & Zhao (2007).

Outros autores também realizaram análises quantitativas de elementos potencialmente tóxicos totais presentes nos LETAs. Uma síntese dos resultados pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados de análises quantitativas de elementos potencialmente tóxicos.

	(1) mg.kg ⁻¹	(2) mg.kg ⁻¹	(3) mg.kg ⁻¹	(4) mg.kg ⁻¹	(5) mg.kg ⁻¹	(6) mg.kg ⁻¹	(7) mg.kg ⁻¹	(8) mg.kg ⁻¹	(9) mg.kg ⁻¹	(10) mg.kg ⁻¹
Al	-	-	2780	908,0	-	-	-	-	-	0,4
Ba	485,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	-	-	-	4960,0	-	-	-	-	-	-
Cd	-	11,2	-	< 0,01	-	<0,2	< 0,1	<0,1-2,0	1,1±0,3	-
Cr	-	105,5	-	204,5	76,4	15,5±0,9	104,0	40-513	29,9±6,2	4,6
Cu	38,3	37,5	2000	49,3	43,9	19,1±0,9	2,7	135-485	40,9±2,9	15,0
Fe	-	321,0	6700	105,7	-	-	-	-	-	130,8
Mn	-	526,0	1600	27,3	-	-	-	-	-	121,0
Ni	22,0	71,5	-	28,3	37,6	-	-	26-218	42,3±2,5	-
Pb	24,0	6,4	1000	< 0,3	29,3	17,9±1,8	16,6	18-840	31,7±3,6	0,4
Zn	83,1	155,3	6000	146,3	144,0	75,7±3,9	-	195-865	43,2±3,1	31,0

Nota: Al – Alumínio; Ba – Bário; Ca – Cálcio; Cd – Cádmio; Cr – Cromo; Cu – Cobre; Fe – Ferro; Mn – Manganês; Ni – Níquel; Pb – Chumbo; Zn – Zinco.

Fontes: (1)Suman, Ahmad & InaMulhad (2018); (2)Oliveira (2015); (3)Monteiro (2014); (4)Prin (2011); (5)Chen, Ma e Dai (2010); (6)Chiang et al. (2009); (7)Lin, Wu & Ho (2006); (8)Elliot & Dempsey (1991); (9)Uwimana et al. (2010); (10)Teixeira et al. (2006).

De maneira geral, todos os LETAs apresentaram elementos potencialmente tóxicos abaixo das normas dos respectivos países. Uwimana et al. (2010), Teixeira et al. (2006) e Elliot & Dempsey (1991) concluíram ainda que os LETAs podem ser utilizados em práticas agrícolas, de acordo com os limites de toxicidade da África do Sul, do Brasil e do estado da Pensilvânia (EUA), respectivamente.

Oliveira (2015) e Cordeiro (2001) atribuíram as variações das concentrações de elementos potencialmente tóxicos entre diferentes LETAs à quantidade e tipo de impurezas encontrados nos produtos químicos utilizados, ao local de coleta, ao tipo de tratamento e à frequência de limpeza dos decantadores. Resultados semelhantes foram relatados por Cornwall & Koppers (1990), indicando que a utilização de produtos químicos poderia ser responsável por 100% das concentrações de Cromo, Cobre e Chumbo e 78% da concentração de Zinco. Há ainda a possibilidade de esses elementos potencialmente tóxicos serem provenientes do lançamento de efluentes industriais nos corpos d'água (GODOY et al., 2019).

3.3.3 Caracterização Físico-Química

A caracterização físico-química dos lodos de ETA contempla a compreensão do estado em que se encontra o material (fases líquida e sólida), a determinação do pH e da capacidade de troca catiônica (CTC).

A fase líquida dos LETAs é composta por água em quatro frações distintas (BARROSO, 2007; REALI, 1999; XIA, 1994; SMOLLEN & KAFAAR, 1994):

- (1) Água livre: fração de água que não está associada às partículas sólidas e envolve os flocos de resíduos. Ela pode se mover livremente por gravidade e pode ser removida facilmente por processos como: prensa, evaporação ou secagem. Os LETAs coletados diretamente das ETAs possuem grandes quantidades de água livre, enquanto lodos desaguados possuem pouca;
- (2) Água intersticial: é a água que se encontra presa entre os vazios da estrutura flocular, podendo se mover no floco ou com o floco. Este tipo de água pode ser removido com a destruição do floco, exigindo, portanto, uma quantidade significativa de energia (forças mecânicas, uso de defloculantes, aquecimento, congelamento e descongelamento, secagem etc.). A maior fração de água dos LETAs desaguados é intersticial;

- (3) Água vicinal (ou capilar): pode ser encontrada dentro e fora do floco, desde que associada a uma superfície sólida. Ela é mantida firmemente nas superfícies das partículas por tensão superficial, resultando em moléculas de água altamente estruturadas. Este tipo de água não pode se movimentar livremente e sua remoção só é possível com uso de força mecânica se o floco for quebrado e a água se tornar livre;
- (4) Água adsorvida (ou de hidratação): água ligada à estrutura molecular dos sólidos. O polo positivo das moléculas de água se aproxima das superfícies carregadas negativamente dos coloides presentes nos LETAs. É necessária uma grande quantidade de energia para remover esta água, como altas temperaturas.

Na Figura 5 se apresenta um esboço desta breve discussão, ilustrando as quatro frações de água em um floco de lodo, e na Figura 6, um esquema associando as quantidades de energia necessárias para remoção de cada fração, sendo a energia E_4 muito superior a E_1 .

Figura 5 – Condições da água em um floco nos LETAs.

Fonte: Smollen & Kafaar (1994).

Figura 6 – Condições da água nos LETAs e energias necessárias para remoção.

Fonte: Barroso (2007).

Quanto à fase sólida, as partículas se encontram, no geral, aglomeradas, formando flocos. Os sólidos inorgânicos (fixos) são provenientes dos minerais (argila, silte ou areia), compostos químicos presentes nos coagulantes e os auxiliares de coagulação, enquanto os sólidos orgânicos (voláteis) são normalmente quantificados por ensaio de perda ao fogo.

Baseando-se na análise de 10 diferentes LETAs, Hsieh & Raghu (1997) concluíram que os lodos advindos de ETAs que tratam água bruta de rios apresentam baixas concentrações de sólidos orgânicos (3 a 17%) e altas concentrações de inorgânicos. Por outro lado, os lodos de ETAs que tratam água de reservatórios ou lagoas apresentam elevadas concentrações de sólidos orgânicos (14 a 63%) e baixas concentrações de inorgânicos.

Segundo Richter (2001), normalmente, de 75 a 95% dos LETAs são compostos por sólidos fixos e 5 a 25% por voláteis. Cordeiro (2001), analisando três lodos *in natura* (ETAs Araraquara, Rio Claro e São Carlos), obteve sólidos fixos iguais a 0,8, 15,3 e 26,5 g.L⁻¹ e sólidos voláteis iguais a 0,8, 42,1 e 32,1 g.L⁻¹, respectivamente. Prim (2011) realizou a análise dos sólidos presentes em 6 coletas do LETA de Florianópolis (Santa Catarina). Os sólidos totais variaram entre 2,7 e 18,0%, sendo os sólidos fixos entre 59,0 e 71,2% e os sólidos voláteis entre 28,8 e 41,0%. Alguns outros valores de sólidos totais encontrados: 6,5 g.L⁻¹ (BUSELATTO et al., 2019); 19,4% (GODOY et al., 2019); 99,8 a 104,5 mg.L⁻¹ (OLIVEIRA, 2015); 2,5 a 52,4 g.L⁻¹

(BABATUNDE & ZHAO, 2007); 5,5 a 24,9 g.L⁻¹ (CORDEIRO, 1999), 3,6 a 63,0% (CALKINS & NOVAK, 1973).

A quantificação da fração orgânica pode diferenciar-se em matéria orgânica e carbono orgânico. A determinação do carbono orgânico no solo se dá por via úmida, pela oxidação com o dicromato de potássio. Nesse método apenas a parcela proveniente de materiais orgânicos facilmente oxidáveis ou decomponíveis é quantificada, sendo discriminado o oriundo de compostos carbonáticos ou recalcitrantes como o carvão (WALKLEY & BLACK, 1934 apud EMBRAPA, 2017). Por outro lado, a matéria orgânica é determinada por via seca, em mufla por incineração. Este método, no entanto, não diferencia os componentes do solo, como os minerais e orgânicos (PEREIRA et al., 2006 apud EMBRAPA, 2017).

De acordo com Basim (1999), a matéria orgânica tem a função de estabilização da estrutura do solo formando unidades chamadas agregados, que são similares a flocos; além disso, ela pode influenciar na CTC, uma vez que entre 20 e 70% do total da CTC de vários solos é devida à sua presença. Ainda, de acordo com o autor, quando a matéria orgânica negativamente carregada se encontra adsorvida na superfície dos minerais, pode haver modificação das propriedades de ambos. Em altos teores de umidade, a matéria orgânica decomposta pode se comportar como um sistema reversível dilatante. Em alguns estágios críticos, durante a secagem, esta reversibilidade pode cessar e isto, normalmente, se manifesta como uma grande redução nos Limites de Atterberg.

Os teores de matéria orgânica reportados na literatura variaram entre 0,39% e 68,90%, enquanto os teores de carbono orgânico variaram entre 0,55% e 14,90% (BUSELATTO et al., 2019; GODOY et al., 2019; DELGADO, 2016; MONTALVAN (2016); OLIVEIRA, 2015; CABRAL, 2013; YANG et al., 2006 b; OLIVEIRA, MACHADO & HOLANDA, 2004; DAYTON & BASTA, 2001; RICHTER, 2001; ELLIOT & DEMPSEY, 1991).

Quanto ao pH, segundo Hsieh e Raghu (1997), em LETAs, elevados valores (pH>7, meio básico) favorecem a imobilização de metais e inibem a biodegradação da matéria orgânica; valores muito abaixo de 5,0 (pH<7, meio ácido) podem favorecer a lixiviação de metais; no pH próximo ao neutro, e com condições favoráveis de nutrientes, temperatura e água, a biodegradação é favorecida e a solubilização de componentes pode ser minimizada.

A diferença entre o pH(KCl) e o pH(H₂O) é chamada carga líquida ou ΔpH (Equação 1), podendo ser positiva, negativa ou zero, dependendo da carga superficial no momento da análise. Um resultado negativo indica predominância de cargas negativas e um valor positivo indica predominância de cargas positivas. O ponto de carga zero (PCZ) é atingido quando o ΔpH é nulo, isto é, quando há equilíbrio entre cargas superficiais positivas e negativas (SPOSITO, 2008). Nas argilas, nessa condição, as cargas elétricas de sinais contrários se atraem mutuamente resultando em floculação máxima.

$$\Delta pH = pH(KCl) - pH(H_2O) \quad (1)$$

Diversos valores de pH de LETA foram encontrados na bibliografia, variando de ácido a básico, mas próximos ao pH neutro, entre 6,0 e 8,0 (Figura 7): 5 a 8 (ZHAO et al., 2018); 7,0 a 8,0 (O'KELLY, 2016); 6,0 a 8,0 (BABATUNDE & ZHAO, 2007); 5,6 a 8,4 (DAYTON & BASTA, 2001);); lodos de SFA entre 6,0 e 8,0 e lodos férricos entre 7,4 e 9,5 (RICHTER, 2001); lodos de alumínio de 5,6 a 7,3, lodos férricos entre 5,4 e 6,4, e de cal entre 8,6 a 12,3 (TOWNSEND et al., 2001); lodos de alumínio entre 6,5 e 7,8 e lodos de cal entre 6,3 e 11,2 (HSIEH & RAGHU, 1997); 5,1 a 8,0 (ELLIOT & DEMPSEY, 1991); 5,0 a 8,9 (RAMIREZ, et al., 2018; AHMAD et al., 2016; MONTALVAN, 2016; AHMAD, AHMAD & ALAM, 2016 a; DELGADO, 2016; CABRAL, 2013; SILVEIRA, KOGA & KURODA, 2013; PRIM, 2011; WATANABE et al., 2011; UWIMANA et al., 2010; CHIANG et al., 2009; BARROSO, 2007; REIS, 2006; LIN, WU & HO, 2006; OLIVEIRA, MACHADO & HOLANDA, 2004; PORTELLA et al., 2003; CORDEIRO, 2001, 1999).

Figura 7 – Valores de pH de LETA na bibliografia entre 1991 e 2018.

Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados de diversos autores.

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC), definida como a soma dos cátions trocáveis, indica a capacidade de manter e trocar cátions e é normalmente expressa em meq/100g (miliequivalentes por 100 g de material seco), $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ (centimols de cátions por kg de material seco) ou $\text{mmol}_c.\text{kg}^{-1}$ (milimols de cátions por kg de material seco). A CTC é estimada pela soma das quantidades trocáveis dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ e Al^{3+} . No parâmetro soma de bases trocáveis, excluem-se os cátions permutáveis H^+ e Al^{3+} . Por sua vez, a acidez potencial é caracterizada pela soma da acidez trocável (íons H^+ e Al^{3+} retidos na superfície dos coloides por forças eletrostáticas) com a acidez não trocável (resultado da dissociação dos íons H^+ dos grupos funcionais da matéria orgânica, das bordas dos argilominerais e da superfície dos óxidos de ferro e alumínio). A acidez potencial é prejudicial ao crescimento da maioria das plantas e sua quantificação representa a quantidade de base necessária para neutralizá-la, ou seja, a quantidade de calcário a ser adicionado no solo (EMBRAPA, 2017).

Altas CTC normalmente denotam capacidades potencialmente altas de reter contaminantes. Em solos, a CTC é influenciada pela espécie e quantidades de argila e de matéria orgânica e também pelo pH. A influência do pH na CTC será tanto maior quanto maior for a presença de minerais com cargas variáveis (dependentes de pH), como a caulinita (em suas bordas) e os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, e/ou, matéria orgânica. Nos LETAs, a influência dos argilominerais na CTC pode ser considerada negligenciável, se comparada à das substâncias húmicas; em solos com conteúdo orgânico baixo, húmus pode ser um fator importante na troca catiônica se o conteúdo argiloso também for baixo (MUCHIMBANE, 2016; HSIEH & RAGHU, 1997).

Algumas CTCs reportadas na literatura para diferentes lodos foram: 255,2 mmol_c.kg⁻¹ (MONTALVAN, 2016); 69,3 mmol_c. kg⁻¹ (CABRAL, 2013); entre 284 e 333 mmol.kg⁻¹ (UWIMANA et al., 2010); 210 a 278 mmol.kg⁻¹ (BOTERO et al., 2009); 98,5 mmol_c.kg⁻¹ (OLIVEIRA, MACHADO & HOLANDA, 2004); 136 a 565 mmol.kg⁻¹ (DAYTON & BASTA, 2001); 229,6 a 1357,5 mmol_c.kg⁻¹ (HSIEH & RAGHU, 1997). Alguns valores de soma de bases trocáveis (Ca²⁺+ Mg²⁺+ K⁺ + Na⁺) e acidez potencial (H⁺+Al³⁺) encontrados foram: 252,2 e 3,0 mmol_c.kg⁻¹ (MONTALVAN, 2016); 172,0 a 253,0 e 25 a 38 mmol.kg⁻¹ (BOTERO et al., 2009); 69,8 e 28,7 mmol_c.kg⁻¹ (OLIVEIRA, MACHADO & HOLANDA, 2004).

3.3.4 Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica compreende a análise granulométrica, massa específica dos sólidos, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP).

Nas Tabelas 8 a 10 estão apresentados os valores encontrados por Vandermeiden & Cornwell (1998) em análises granulométricas e da massa específica dos sólidos de diversos LETAs, separados pelo tipo de coagulante utilizado no tratamento de água. A massa específica variou entre 2,05 e 2,94 g.cm⁻³ e a distribuição granulométrica dos LETAs se mostrou majoritariamente composta por partículas finas.

Tabela 8 - Caracterização geotécnica de LETAs que utilizam SFA como coagulante.

ETA	Distribuição granulométrica			Massa específica dos sólidos (g.cm ⁻³)
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	
ETA Harwood's Mill	40,00	45,00	15,00	2,94
ETA Main Street	23,20	59,90	16,90	2,51
ETA Lake Chaplin	26,00	48,10	25,90	2,53
ETA Ipswich	33,20	39,00	27,80	2,16
ETA Tar River	19,80	8,50	71,70	2,26
ETA Port Wentworth	19,30	56,90	23,80	2,25
ETA Lake Kilby	14,40	35,90	49,70	2,21
ETA E.M. Johnson	12,50	54,40	33,10	2,07
ETA York	18,50	50,60	30,90	2,18
ETA Lake Gaillard	3,00	86,00	11,00	2,05

Fonte: Vandermeiden & Cornwell (1998).

Tabela 9 - Caracterização geotécnica de LETAs que utilizam cloreto férrico como coagulante.

ETA	Distribuição granulométrica			Massa específica dos sólidos (g.cm ⁻³)
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	
ETA Sourdough Canyon	56,00	31,20	12,80	2,37
ETA 1, Louisville, Ky.	34,00	49,10	16,90	2,80
ETA 2, Louisville, Ky.	36,70	44,90	18,40	2,84
ETA Sweetwater Authority	15,90	57,40	26,70	2,35
ETA Manatee County	37,30	23,10	39,60	2,44
ETA Baxter	1,40	60,20	38,40	2,45
ETA Queen Lane	8,30	58,90	32,80	2,27
ETA Belmont	12,00	69,20	18,80	2,30
ETA Winchester	14,00	51,00	35,00	2,08

Fonte: Vandermeiden & Cornwell (1998).

Tabela 10 - Características geotécnicas de LETAs que utilizam PACI como coagulante.

ETA	Distribuição granulométrica			Massa específica dos sólidos (g.cm ⁻³)
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	
ETA St. Bernard Parish	9,00	76,60	14,40	2,53
ETA Frostburg	31,30	55,00	13,70	2,22
ETA Roxboro	0,70	45,50	53,80	2,26
ETA Blacksburg-Christiansburg	7,00	88,00	5,00	2,08

Fonte: Vandermeiden & Cornwell (1998).

Basim (1999) determinou a distribuição granulométrica de seis LETAs do estado de New Jersey (EUA) em três estados: *in natura*, seco e congelado/descongelado, visando avaliar a influência do intemperismo nas características dos resíduos. Na Tabela 11 estão apresentados os resultados obtidos com os LETAs nos dois primeiros estados. Os lodos *in natura* apresentaram granulometria majoritariamente fina: os sólidos inorgânicos tinham normalmente tamanho de argilominerais, variando entre 1 nm e 1 µm, enquanto os sólidos orgânicos eram normalmente menores que 0,1 µm. Por outro lado, a granulometria dos lodos secos revelou a composição majoritária de partículas do tamanho de areia. Ciclos de congelamento e descongelamento, assim como a secagem, expõem a água retida entre as partículas, provocando um rearranjo estrutural e levando à floculação e cimentação das partículas.

Tabela 11 - Distribuição granulométrica e classificação de LETAs de New Jersey (EUA).

Identificação (Coagulante)	Estado	Granulometria		Classificação
		% finos	% areia	
HWD (Alumínio)	<i>In natura</i>	86	14	Silte orgânico arenoso
	Seco	34	66	Areia siltosa
VDD (Alumínio)	<i>In natura</i>	72	28	Silte orgânico arenoso
	Seco	48	52	Areia siltosa
ELD (Cal)	<i>In natura</i>	62	38	Silte orgânico arenoso
	Seco	10	90	Areia mal graduada com argila orgânica
JCD (Cal)	<i>In natura</i>	100	0	Silte orgânico arenoso
	Seco	30	70	Areia siltosa
STD (Polímero)	<i>In natura</i>	76	24	Argila orgânica arenosa
	Seco	48	52	Areia siltosa
WQD (Polímero)	<i>In natura</i>	62	38	Argila orgânica arenosa
	Seco	35	65	Areia siltosa

Nota: A classificação das amostras foi atualizada segundo o Sistema de Classificação Unificada de Solos, D2487-17 (ASTM, 2017 a).

Fonte: Basim (1999) atualizado.

Na etapa de sedimentação dos ensaios de análise granulométrica com LETAs, Vandermeijden & Cornwell (1998) relataram dificuldades na inserção do densímetro na suspensão aquosa preparada com 50 g de material. Então, os ensaios foram realizados com apenas 10 g de material e eliminando a etapa de secagem anterior à

sedimentação, fornecendo assim resultados satisfatórios. Os autores suspeitaram da eficiência do defloculante hexametáfosfato de sódio na neutralização do efeito dos coagulantes utilizados no processo de tratamento da água.

Hsieh e Raghu (1997), por sua vez, em ensaios de sedimentação de diversos lodos, sob duas condições: seco em estufa a 105 °C, como estabelecido pela D7928 – 17 (ASTM, 2017 b), e sem secagem prévia, observaram a estratificação da suspensão em duas camadas, em vez da sedimentação esperada. Embora tenham sido utilizadas diferentes porcentagens de defloculante (Hexametáfosfato de Sódio), ele não se mostrou efetivo em nenhuma das condições: a secagem prévia fez com que as partículas se cimentassem fortemente, sendo o defloculante insuficiente para separá-las; nos lodos *in natura*, as partículas voltaram a se flocular após separação. Os autores concluíram que os métodos normalmente utilizados para solos não são efetivos para LETAs.

A eficiência de defloculantes foi amplamente explorada por diferentes autores ao longo do tempo. Em solos, Lambe (1951) cita o uso de silicato de sódio e *Daxad 23* (produto comercial à base de sais de sódio polimerizados de ácido sulfônico) como defloculantes. Resultados satisfatórios para muitas argilas foram reportados para 2 cm³ de solução 10% *Daxad 23* e 0,5 e 1 cm³ de silicato de sódio 40º Baumé, assim como para o pirofosfato de sódio. O autor recomenda que a seleção do defloculante e a quantidade a ser utilizada se dê por tentativas. Wintermyer & Kinter (1955), realizando ensaios de sedimentação com 19 diferentes defloculantes e 16 solos, sob condições rigorosamente controladas, concluíram que vários agentes, como carbonato, hidróxido e oxalato de sódio, produziram um alto grau de dispersão em alguns solos, mas falharam em estabilizar as suspensões de outros. Polifosfato de sódio e tripolifosfato de sódio foram altamente e igualmente eficazes para todos os experimentos com solos representativos dos EUA. Hexametáfosfato de sódio e tetrafosfato de sódio foram ligeiramente menos eficazes. Nenhum desses quatro fosfatos foi capaz de estabilizar a suspensão do solo laterítico vermelho e ferruginoso testado, o qual, entretanto, foi altamente disperso pelo fosfato trissódico e pirofosfato tetrassódico, que são geralmente ineficazes com os outros grupos de solos.

Para solos residuais, Blight (1997) recomenda, se necessário, o uso de hexametáfosfato de sódio em concentrações duas vezes a convencional e, se este defloculante se mostrar ineficiente, o uso de fosfato trissódico. Head (2006) apresenta

uma lista de diversas substâncias utilizadas como defloculantes, muitas das quais muito bem-sucedidas para maior parte dos solos. Segundo o autor, o hexametáfostato convencionalmente utilizado pode não ser totalmente eficaz para alguns solos tropicais residuais. Nesses casos, os fosfatos trissódico e tetrassódico em concentrações de 2 a 3 vezes mais fortes que o padrão se mostraram mais efetivos.

Em relação a massa específica dos sólidos, Hsieh e Raghu (1997) encontraram valores de massa específica dos sólidos de LETAs variando entre 1,87 e 2,30 g.cm⁻³, com exceção de uma amostra com ferro em sua composição, cujo valor foi de 2,71 g.cm⁻³. Basim (1999) também estudou o efeito da secagem nesse parâmetro (Figura 8), observado o aumento da massa com o aumento da temperatura de secagem dos LETAs, possivelmente devido à perda de componentes de baixa massa específica, como matéria orgânica e óxidos metálicos (óxido de cálcio, ferro e alumínio). Nos LETAs, a presença da matéria orgânica e dos produtos químicos adicionados na ETA influenciam diretamente na massa específica dos sólidos: um elevado teor de matéria orgânica tende a diminuir a massa específica, enquanto a presença de metais tende a aumentar (XIA, 1994).

Figura 8 – Variação da massa específica dos sólidos com a temperatura (°C).

Fonte: Basim (1999).

Basim (1999) também determinou os limites de Atterberg dos LETAs *in natura* (úmido para seco) e com secagem prévia (seco para úmido) (Tabela 12). No estado *in natura*, todos os LETAs eram plásticos com LL entre 280 e 425% e IP entre 82 e 225%, comparáveis aos do argilomineral montmorilonita. No entanto, diferentemente dos argilominerais, os LETAs, quando sujeitos a variações na temperatura, perdem a afinidade com a água e sofrem redução drástica em suas plasticidades. Isso significa que os LETAs não se reidratam quando a água é adicionada. De acordo com O'Kelly (2008), esta característica é também característica de alguns solos ricos em óxidos e hidróxidos de alumínio.

Tabela 12 – Limites de Atterberg de LETAs *in natura* e com secagem prévia.

Identificação (Coagulante)	Limite de Liquidez (%)		Limite de Plasticidade (%)		Índice de Plasticidade (%)	
	Úmido para seco	Seco para úmido	Úmido para seco	Seco para úmido	Úmido para seco	Seco para úmido
HWD (Alumínio)	371	107	228	NP	144	NP
VDD (Alumínio)	206	118	115	NP	91	NP
ELD (Cal)	330	125	212	43	118	82
JCD (Cal)	329	37	200	NP	129	NP
STD (Polímero)	161	55	57	49	104	6
WQD (Polímero)	690	151	20	NP	670	NP

Nota: NP – não plástico.

Fonte: Basim (1999).

Watanabe et al. (2011) estudaram a granulometria do LETA de Hitachi (Japão), onde se utiliza PACI como coagulante, avaliando a dependência da característica em relação ao teor de umidade inicial (Figura 9). Em acordo com os resultados de Basim (1999), à medida que se diminuiu a umidade inicial, o LETA se tornou mais granular. Com o menor teor de umidade inicial, a distribuição mostrou maior fração de areia, enquanto com o maior teor de umidade predominaram partículas finas. Os autores também avaliaram a influência das variações sazonais na massa específica dos

sólidos (2,40 a 2,61 g.cm⁻³), no LL (83% a 511%), no LP (60% a 186%), no IP (23% a 325%) e na perda de massa ao fogo (9,0 a 26,1%) (Tabela 13).

Figura 9 – Distribuição granulométrica com diferentes teores de umidade iniciais.

Fonte: Watanabe et al. (2011).

Tabela 13 – Variações sazonais nas características do LETA Hitachi (Japão).

Data da amostragem	Fev 2006	Abr 2006	Nov 2006	Jun 2007	Set 2007	Nov 2007	Nov 2007	Dez 2007	Jun 2008	Nov 2008
Massa específica dos sólidos (g.cm ⁻³)	2,48	2,51	2,60	2,40	2,61	2,45	2,51	2,45	2,58	2,58
Limite de liquidez (%)	330	275	420	248	178	116	221	511	83	224
Limite de plasticidade (%)	167	140	166	165	104	69	145	186	60	145
Índice de plasticidade (%)	163	135	243	83	74	47	77	325	23	80
Perda ao fogo (%)	25,9	26,1	25,8	18,2	17,2	12,4	18,2	17,0	9,0	22,3

Fonte: Watanabe et al. (2011).

Teixeira et al. (2011) analisaram a granulometria do LETA de Presidente Prudente (São Paulo, Brasil) mensalmente durante 10 meses, período no qual a ETA utilizou como coagulantes SFA, cloreto férrico e PAC. Também foram analisados o teor de matéria orgânica e o nível de água do rio no local de coleta da água bruta

(Figura 10). A concentração de matéria orgânica não mostrou variação. A fração de areia mostrou uma tendência de variação inversa à variação do nível do rio, enquanto a fração de argila acompanhou a tendência de variação do nível do rio.

Figura 10 – Variação na granulometria e teor de matéria orgânica ao longo dos meses e a variação do nível de água do rio no local de coleta.

Fonte: Teixeira et al. (2011).

Na Tabela 14 estão apresentados dados de diversos LETAs compilados por O'Kelly (2016). O autor relacionou a classificação dos LETAs ao tipo de coagulante dos quais derivam, uma vez que a utilização dos defloculantes cal, SFA-polímero, SFA e SFA-cal produziram resíduos sucessivamente mais finos (Figura 11). A maior plasticidade dos LETAs de SFA se justifica pela presença de aluminatos de cálcio e SFA hidratados, que aumentam a capacidade de retenção de água.

Apesar da classificação do autor ter se baseado nos tipos de coagulantes, a análise minuciosa e conjunta de seus dados com os dos dois últimos trabalhos apresentados, de Watanabe et al. (2011) e Teixeira et al. (2011), sobre as variações sazonais das características dos LETAs, permite concluir que a água bruta é o maior responsável pelas características dos lodos.

Tabela 14 – Caracterização geotécnica de diversos LETAs.

Identificação (Coagulante)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Gravidade Específica	Sólidos Voláteis (%)	pH	Partículas < 0,06 mm (%)	Classificação (BSI, 2015)
1 (Alumínio)	490	240	250	1,86	57,00	8,60	—	Silte Orgânico de Alta Plasticidade
2 (Alumínio)	550	260	290	1,99	45,00	7,10	—	Silte Orgânico de Alta Plasticidade
3 (Alumínio)	430	220	210	1,90	46,00	7,20	—	Silte Orgânico de Alta Plasticidade
4 (Alumínio)	513	268	245	1,86	57,00	8,60	—	Silte Orgânico de Alta Plasticidade
5 (Alumínio)	550	239	311	2,26	—	—	—	Silte Orgânico de Alta Plasticidade
6 (Alumínio)	423	137	286	2,33	—	—	—	Silte Orgânico de Alta Plasticidade
7 (Alumínio)	108	82	26	2,27	10,00	—	86,00	Silte Orgânico de Alta Plasticidade
1 (Alumínio/Cal)	—	—	—	1,90	33,50	—	84,00	—
1 (Ferro)	108	47	61	2,72	—	—	—	Silte Orgânico de Alta Plasticidade
1 (Cal)	38	31	7	2,65	9,30	—	51,00	Silte intermediária plasticidade
2 (Cal)	38	32	6	2,57	—	11,00	83,00	Silte intermediária plasticidade

Nota: Classificação de acordo com a norma BS 5930 (BSI, 2015).

Fonte: O'Kelly (2016).

Figura 11 – Curvas granulométricas de diversos LETAs.

Fonte: O'Kelly (2016).

Para os LETAs de SFA, a gravidade específica (massa específica dos sólidos dividida pela densidade da água) parece ser inversamente relacionada ao teor de matéria orgânica (ou sólidos voláteis) (Figura 12). Os altos teores de sólidos voláteis totais, entre 30% e 57%, foram considerados superestimados por O'Kelly (2016). No teste de perda ao fogo a 440 °C, os resíduos perdem quantidades significativas de água estrutural e hidroxilas, estas associadas ao coagulante SFA, que representa entre 5-15% do peso do lodo (WANG et al., 1992). Medições mais confiáveis do teor de matéria orgânica podem ser obtidas pelo método de Walkley e Black (BSI, 1990), que emprega oxidação com dicromato de potássio.

Figura 12 – Massa específica dos sólidos em função do teor de sólidos voláteis para diversos LETAs.

Fonte: O'Kelly (2016).

3.3.5 Comportamento Geotécnico

Compactação

Normalmente, os ensaios de compactação com solos são conduzidos pelo processo de umedecimento (ASTM, 2012; ABNT, 1986 a), ou seja, os solos são secos até a umidade higroscópica e água é progressivamente adicionada para a compactação dos pontos. A curva de peso específico aparente seco (γ_d) em função do teor de umidade (w) é aproximadamente parabólica com concavidade para baixo,

cujo ponto máximo fornece os parâmetros de compactação ótimos. O ensaio também pode ser realizado pelo processo de secagem, partindo do ponto mais úmido da curva.

Devido à dificuldade de se realizar o ensaio de compactação com o lodo após secagem – pois se forma um bloco de material muito denso – Wang et al. (1992) obtiveram curvas de compactação pelo processo de secagem de três LETAs utilizando a energia normal (ASTM, 2012). A forma da curva do lodo férrico (Lodo 1 – Figura 13) se assemelhou às curvas típicas dos solos (teor de umidade ótimo, $w_{ót.}$, 45%, peso específico aparente seco máximo, $\gamma_{d,máx.}$, 11,30 kN.m⁻³). As outras duas curvas, de lodos de alumínio (Lodos 2 e 3, Figura 14 e 15, respectivamente), indicaram a redução do γ_d com o aumento do w , mas sem o pico característico do ensaio.

Figura 13 - Curva de compactação de um lodo férrico.

Nota: ZAVC = curva de 100% de saturação (zero air voids curve).

Fonte: Wang et al. (1992).

Figura 14 - Curva de compactação do lodo de alumínio 1.

Nota: ZAVC = curva de 100% de saturação (zero air void curve).

Fonte: Wang et al. (1992).

Figura 15 - Curva de compactação do lodo de alumínio 2.

Nota: ZAVC = curva de 100% de saturação (zero air void curve).

Fonte: Wang et al., (1992).

Xia (1994) e Basim (1999) conduziram ensaios de compactação com diversos LETAs pelos processos de umedecimento (secagem até o primeiro ponto de compactação e umedecimento posterior) e de secagem (amostras com diferentes teores de umidade iniciais foram gradualmente secas ao ar, com misturas periódicas para uniformização da umidade). Nos resultados apresentados nas Figuras 16 a 19, observa-se que as curvas obtidas por umedecimento apresentaram formato parabólico típico do ensaio com solos, enquanto as curvas obtidas por secagem apresentaram uma tendência crescente do γ_d com o teor de sólidos. Os parâmetros de compactação obtidos nos ensaios foram: $\gamma_{d,máx.}$ entre 5,82 e 14,29 kN.m^{-3} e s_{ot} (teor de sólidos ótimo) entre 57,1 e 83,0% ($w_{ót.}$ 75,1% e 20,5%, respectivamente) (XIA, 1994) e $\gamma_{d,máx.}$ entre 4,08 e 10,30 kN.m^{-3} e o $w_{ót.}$ entre 46 e 130% (BASIM, 1999).

Figura 16 – Curvas de compactação de LETAs obtidas por umedecimento com padrão parabólico.

Fonte: Xia (1994).

Figura 17 – Curvas de compactação de LETAs obtidas por secagem com padrão crescente.

Fonte: Xia (1994).

Figura 18 – Curvas de compactação do LETA WQD (Polímero) por umedecimento e secagem.

Fonte: Basim (1999).

Figura 19 – Curvas de compactação do LETA HWD (Alumínio) por umedecimento e secagem.

Fonte: Basim (1999).

Na Figura 20 estão apresentados os pontos obtidos em ensaios de compactação por secagem de três lodos de SFA, em termos de massa específica aparente seca (ρ_d) e úmida (ρ) em função do teor de umidade. Na figura estão apresentadas as curvas de saturação 100% para a condição seca (*Zero air voids curve* – ZAVC) e úmida. Com características de plasticidade semelhantes e massa específica dos sólidos variando entre 1,86 e 1,99 g.cm⁻³, os três LETAs apresentaram comportamento semelhante quanto à compactação: ρ_d variou entre 0,20 e 0,37 t.m⁻³ para umidade entre 160 e 430%. De acordo com O’Kelly (2016), para a maioria dos solos inorgânicos o $w_{ót.}$ é aproximadamente 10% menos que o LP. Com isso, o $w_{ót.}$ dos LETAs deveria ser de aproximadamente 200% (LP entre 220 e 260%), no entanto, a curva de compactação por secagem não apresentou um pico até o menor teor de umidade ensaiado. No geral, LETAs possuem massa específica seca máxima menor e teor de umidade ótimo maior do que solos inorgânicos (O’KELLY, 2016).

Figura 20 – Curvas de compactação de LETAs de SFA.

Fonte: O’Kelly (2016).

Deformabilidade

A deformabilidade dos três lodos foi estudada por Wang et al. (1992) por meio de ensaios de adensamento, cujos resultados estão apresentados na Figura 21. Os

índices de compressão (C_c) foram 2,0, 6,7 e 5,3, para o lodo férrico (1) e os lodos de alumínio (2 e 3), respectivamente, valores que, segundos os autores, são maiores que de argilas naturais, normalmente menores que 1,0, e do argilomineral mais compressível, a montmorilonita, normalmente entre 1,0 e 2,6. Os autores correlacionaram linearmente C_c com LL , obtendo a Equação 2, exibida a seguir:

$$C_c = 0,9 + 0,0105 \times LL \quad (2)$$

Os valores de C_r foram iguais a 0,03, 0,17 e 0,15 para os três lodos, respectivamente. Segundo os autores, os valores foram muito baixos se comparados a solos com IP tão altos, cujos C_r podem exceder 1,0. As razões entre C_r e C_c foram 0,015, 0,025 e 0,028 para os três lodos, respectivamente. Amostras indeformadas de solos naturais não-expansivos geralmente possuem razões menores que 0,1.

Figura 21 – Ensaio de adensamento de três LETAs.

Fonte: Wang et al. (1992).

Xia (1994) observou para 11 lodos que, exceto para o primeiro carregamento do ensaio de adensamento (carregamento mais baixo, 24,76 kPa), as curvas de compressão ao longo do tempo não apresentaram o comportamento exibido por solos. Essas curvas mostraram variação baixa e praticamente linear do deslocamento axial em função do logaritmo do tempo, dificultando a utilização das técnicas habituais para determinar o C_c e a tensão de pré-adensamento (Figuras 22 e 23). A explicação dada pelo autor foi a de que a estrutura flocular inicial dos LETAs foi destruída no preparo

das amostras para o ensaio. Com a saída de água no primeiro carregamento, as partículas se aproximaram e reconstituíram parcialmente a estrutura flocular, que possui maior estabilidade e resistência. Com isso, o processo de saída de água dos flocos se torna mais lento, efeito demonstrado pelo alto adensamento secundário. A reestruturação parcial dos flocos após o primeiro carregamento impede que haja a recuperação da estrutura inicial após a remoção do carregamento.

De acordo com O'Kelly (2016), embora altamente compressíveis, os LETAs adensam lentamente devido à fina granulometria, alto teor de matéria orgânica e estrutura flocular, contendo volumes significativos de água intersticial. No caso dos LETAs de SFA soma-se o caráter eletrovalente do íon alumínio (Al^{3+}) (que se liga a um grande número de moléculas de água em seu estado de hidróxido de alumínio), sua excepcionalmente alta afinidade pela água em comparação com outros coagulantes e o fato que seus flocos serem geralmente um pouco maiores e mais compactos que os flocos de LETAs férricos, tornando-os mais difíceis de desidratar.

Figura 22 – Ensaio de adensamento – Curvas deslocamento em função do tempo – LETA JCD.

Fonte: Xia (1994).

Figura 23 – Determinação da tensão de pré-adensamento, Índice de Compressão (C_c) e Índice de Expansão (Swell Index, C_s) – LETA JCD.

Fonte: Xia (1994).

Para os LETAs analisados por Xia (1994), os valores de C_c estiveram entre 0,1 e 4,48, próximos aos de solos argilosos altamente compressíveis. Os valores de C_r foram muito baixos, entre 0,014 e 0,199, dentro da faixa típica de solos naturais não plásticos. Apesar de não possuírem um histórico de carregamento que os justificassem, obtiveram-se valores das tensões de pré-adensamento entre 75 e 150 kPa. As relações C_α/C_c foram menores que 0,035, limite inferior utilizado como referência no trabalho, justificadas pelo alto teor de matéria orgânica.

O'Kelly (2010) estudou o adensamento de três LETAs por meio de três tipos de ensaio: célula edométrica, consolidômetro e câmara triaxial. Na célula edométrica o nível de tensões foi de 3 a 800 kPa e no consolidômetro, de 10 a 30 kPa. Em ambos, a drenagem foi vertical unidirecional. Para os ensaios na câmara triaxial, as amostras puderam drenar radial e verticalmente, sob tensões confinantes isotrópicas efetivas de 30, 60, 120 e 150 kPa e contrapressão de 200 kPa, com medição do volume de água drenado em 24 horas. Ao final, na célula edométrica, ocorreram deformações volumétricas de até 62%, no consolidômetro, de até 36% e na câmara triaxial, de até 33%. Os valores de C_c variaram entre 2,5 e 3,2 na célula edométrica, entre 2,6 a 5,5 no consolidômetro e entre 0,8 a 2,3 na câmara triaxial, valores em geral altos se comparados a argilas inorgânicas ($C_c < 1,0$). Os coeficientes de adensamento, C_v , foram determinados para a célula edométrica e a câmara triaxial, sendo crescentes

com a tensão efetiva num intervalo de 0,1 a 0,8 m^2/ano ($3,2 \times 10^{-9}$ a $2,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Os valores foram muito baixos, típicos de argilas de alta plasticidade (Figuras 24 e 25).

Figura 24 –Compressão unidimensional na célula edométrica e no consolidômetro - adensamento primário.

Fonte: O'Kelly (2010).

Figura 25 - Compressão isotrópica na célula triaxial - (adensamento primário).

Fonte: O'Kelly (2010).

Resistência ao Cisalhamento

Para obtenção dos parâmetros de resistência (ϕ' , ângulo de atrito efetivo, c' , intercepto de coesão efetivo) de LETAS, os ensaios mais reportados na literatura foram: cisalhamento direto (BASIM, 1999; HSIEH & RAGHU, 1997; XIA, 1994) e ensaios triaxiais do tipo adensados não-drenados (*consolidated undrained*, CU) (O'KELLY & QUILLE, 2010; O'KELLY, 2008; WANG et al., 1992). Para obtenção da resistência não-drenada, os ensaios mais utilizados para LETAs foram: ensaios triaxiais do tipo não-adensado não-drenado (*unconsolidated undrained*, UU) (O'KELLY & QUILLE, 2010), penetração do cone (WANG et al., 1992), palheta e compressão simples (BASIM, 1999; XIA, 1994).

Na Tabela 15 estão apresentados parâmetros de resistência efetivos obtidos em ensaios CU. Segundo Wang et al. (1992), o ângulo de atrito efetivo é alto se comparado ao argilomineral altamente plástico montmorilonita (com IP entre 160 e 1.100%, o ϕ' varia de 5° a 10°). Entretanto, não é incomum que alguns resíduos altamente plásticos tenham ϕ' altos (O'KELLY, 2008).

Tabela 15 – Parâmetros efetivos de resistência de diversos LETAs.

Autor	LETA	ϕ' (°)	c' (kPa)
Wang et al. (1992)	1 (férico)	42,8	8,27
Wang et al. (1992)	2 (Alumínio)	42,3	6,89
Wang et al. (1992)	3 (Alumínio)	44,0	8.27
O'Kelly (2008)	Alumínio	39,0	0
O'Kelly & Quille (2010)	1 (Alumínio)	42,0	0
O'Kelly & Quille (2010)	2a (Alumínio)	42,0	0
O'Kelly & Quille (2010)	2b (Alumínio)	40,0	0
O'Kelly & Quille (2010)	3 (Alumínio)	44,0	0

Fonte: Adaptado de vários autores.

O'Kelly & Quille (2010) avaliaram a influência do uso de aditivos no tratamento de água na resistência ao cisalhamento de LETAs. A amostra do LETA 2a foi coletada após a utilização de SFA e polieletrólito, enquanto a do LETA 2b foi coletada sem aditivos. No LETA 2a, a água ficou retida e absorvida na intrincada matriz de partículas coloidais, precipitados de hidróxido de alumínio e moléculas de polieletrólito, constituindo os flocos. A resistência ao cisalhamento desse resíduo foi de 10 a 20%

maior que a do mesmo resíduo sem aditivo, e os ângulos de atrito foram 42° e 40° respectivamente, ambos com umidades semelhantes.

Na Tabela 16, estão apresentados os resultados de Xia (1994) em ensaios de cisalhamento direto. LETAs com teores de umidade mais altos ($> 100\%$) apresentaram interceptos de coesão e ângulos de atrito mais baixos, $2,4 \leq c \leq 11,4$ kPa e $3 \leq \varphi \leq 25^\circ$, respectivamente; já LETAs com teores de umidade mais baixos ($< 100\%$) apresentaram interceptos e ângulos de atrito mais altos, $15,5 \leq c \leq 45,1$ kPa e $16 \leq \varphi \leq 26^\circ$, respectivamente. As exceções foram a amostra JCD, que apresentou intercepto de coesão extraordinariamente alto, mesmo apresentando um alto teor de umidade, devido ao seu alto endurecimento tixotrópico e cimentação, e a amostra FLDM, que apresentou o maior ângulo de atrito, devido ao efeito do envelhecimento. Segundo o autor, os valores de ângulo de atrito obtidos não refletem o verdadeiro atrito entre as partículas sólidas dos LETAs, uma vez que os flocos são cisalhados e não as partículas individuais. Durante o movimento de um floco sobre o outro, a água e a matéria orgânica atuam como lubrificantes, reduzindo o atrito.

Tabela 16 – Parâmetros de resistência por cisalhamento direto.

Identificação (Coagulante)	LL (%)	w (%)	c (kPa)	φ (°)
WQD (Férrico)	617,4	549,4	4,2	3
RWA (Férrico)	429,2	405,1	2,4	7
JCD (Cal)	329,5	327,4	106,8	18
MQD (Alumínio)	Alto teor de areia	189,0	11,4	9
PVD (Cal)	207,2	157,1	3,4	20
NCD (Cal)	138,1	150,6	9,0	25
FLDM (Alumínio)	Não-plástico	90,8	20,7	45
HWD (Alumínio)	93,0	67,5	15,5	26
SLDF (Cal)	60,1	56,0	3,1	20
SLD	39,4	38,7	17,7	16

Identificação (Coagulante)	LL (%)	w (%)	c (kPa)	ϕ (°)
(Cal)				
MWD (Cal)	35,5	34,8	45,1	24

Fonte: Xia (1994).

Basim (1999) obteve os parâmetros de resistência por ensaios de cisalhamento direto de 6 LETAs, para três teores de umidade cada, obtidos por umedecimento (Tabela 17). Pode-se observar que c' aumenta, enquanto ϕ' diminui, com o aumento do teor de umidade. Nas Figuras 26 e 27 estão apresentadas as curvas tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal e a envoltória de resistência do LETA JCD sob teor de umidade 27% e peso específico aparente seco $13,9 \text{ kN.m}^{-3}$.

Tabela 17 – Parâmetros de resistência de diversos LETAs por cisalhamento direto.

Identificação (Coagulante)	w (%)	$\gamma_{d,máx.}$ (kN.m^{-3})	c (kPa)	ϕ (°)
HWD (Alumínio)	79	7,3	2,20	32
	84	7,0	3,5	29
	97	6,4	4,5	25
VDD (Alumínio)	54	8,3	2,25	26
	62	8,6	3,57	22
	68	8,3	4,90	18
ELD (Cal)	65	7,2	16,5	25
	72	7,3	18,1	20
	80	7,5	20,0	16
JCD (Cal)	27	13,9	38,0	35
	30	13,5	41,0	31
	35	12,6	43,0	28
STD (Polímero)	20	11,1	-	34
	28	11,9	17,53	28
	35	12,2	38,52	20
WQD (Polímero)	30	12,8	7,0	33
	35	12,0	7,5	29
	39	11,4	7,5	27

Fonte: Basim (1999).

Figura 26 - Tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal do LETA JCD (w=27%).

Fonte: Basim (1999).

Figura 27 – Envoltória de resistência do LETA JCD (w=27%).

Fonte: Basim (1999).

Silva & Hemsí (2018) e Wang et al. (1992) estudaram a resistência não drenada de LETAs por ensaios de penetração do cone e compressão simples, respectivamente. Os resultados, na Figura 28, indicam aumento da resistência com o aumento do teor de sólidos, de maneira exponencial. Para uma dada resistência, o lodo férrico (Lodo 1) de Wang et al. (1992), apresenta o maior teor de sólidos tendendo a se aproximar do lodo férrico da ETA Cubatão de Silva & Hemsí (2018).

Figura 28 – Resistência ao cisalhamento em função do teor de sólidos.

Fonte: Silva & Hemsí (2018) e Wang et al. (1992).

O'Kelly & Quille (2010) realizaram ensaios triaxiais do tipo UU com quatro amostras, com teores de umidade entre 185 e 295% (Figura 29). Quando próximas do estado plástico, as amostras sofreram grandes deformações para baixas tensões desviadoras, considerando-se como valor de ruptura a tensão desviadora que ocorre a 20% de deformação. Este comportamento é exemplificado pelas amostras de umidade 270%. As amostras em estado rígido e muito rígido atingiram tensões desviadoras máximas baixas (5 a 10%), se comparadas à maioria das argilas orgânicas. Na Figura 30 estão apresentadas curvas de resistência ao cisalhamento não-drenada em relação ao teor de umidade em um gráfico bilogarítmico. Foram obtidas curvas semelhantes para todos os LETAs. As razões entre a resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u) e a tensão confinante (σ_3) variaram entre 1,6 e 2,0.

Figura 29 – Tensão desviadora em função da deformação axial – Ensaios Triaxiais UU das amostras 2a e 2b.

Fonte: O'Kelly & Quille (2010).

Figura 30 – Resistência ao cisalhamento não-drenada em função do teor de umidade.

Fonte: O'Kelly & Quille (2010).

Xia (1994) realizou testes de resistência à compressão simples a diferentes teores de sólidos. As curvas de tensão em função do teor de sólidos para os LETAs estudados se enquadraram em duas categorias: crescente e parabólica. Em regra, a resistência se relaciona ao desenvolvimento da cimentação e à plasticidade. As amostras que apresentaram curvas do tipo crescente (SLD, SLDF, NCD, FLDM)

apresentavam baixa plasticidade e atingiram tensões muito altas, o que pode ter sido causado por cimentação bem desenvolvida. Já as amostras que apresentaram curvas aproximadamente parabólicas (JCD, PVD, WQD, RWA), apresentavam alta plasticidade. No primeiro caso, assim como os solos argilosos com baixa plasticidade, os LETAs com baixa ou nenhuma plasticidade sofrem pequenas variações de peso e volume, e, portanto, em sua estrutura, com a secagem, favorecendo a cimentação uniforme e completa e resultando em alta resistência. No segundo caso, assim como os solos argilosos altamente plásticos, a secagem provoca grandes variações de peso e volume, porém de maneira desigual, causando microfraturas e rachaduras, que se transformam em regiões de fraqueza. A resistência, influenciada por este comportamento macroscópico, para de aumentar quando o teor de sólidos atinge um certo valor. Nestes casos, com o aumento do teor de sólidos, a resistência apresenta aumento seguido de redução (Figura 31).

Figura 31 – Resistência não-drenada em função do teor de sólidos.

Fonte: Xia (1994).

Por fim, Basim (1999) realizou ensaios de compressão simples com corpos-de-prova advindos dos ensaios de compactação por umedecimento e secagem. As curvas do ensaio foram mostradas nas Figuras 18 e 19. As amostras obtidas por umedecimento apresentaram ruptura frágil, com inclinação dos planos de ruptura em

relação ao plano principal maior entre 50° e 65°. A resistência, S_u , foi calculada como metade da resistência à compressão simples. A maioria das amostras obtidas por secagem exibiu abaulamento da curva de resistência à compressão em função da umidade. Os planos de ruptura apresentaram ângulo de inclinação de 45° com o plano principal maior. Portanto, o ângulo de atrito assumido foi zero.

Permeabilidade

Raghu & Hsieh (1987) *apud* Basim (1999) calcularam os coeficientes de permeabilidade (k) de dois lodos a partir dos resultados de ensaios de adensamento unidimensionais. Os resíduos se mostraram pouco permeáveis, com coeficientes entre $10^{-8} \leq k \leq 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$.

Wang & Tseng (1993) também estudaram por meio do ensaio de adensamento convencional a permeabilidade de um LETA de SFA *in natura*. As amostras foram preparadas sem cura e com cura de um e dois meses. Os resultados indicaram que, dentro do intervalo de tempo investigado, a cura não teve efeito significativo na permeabilidade do lodo. A condutividade hidráulica diminuiu de 8×10^{-8} a $3 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ quando a tensão vertical efetiva (σ'_v) aumentou de 1,7 a 541 kPa. Observou-se uma tendência linear entre o logaritmo da condutividade hidráulica ($\log k$) e o logaritmo do índice de vazios ($\log e$) (Figura 32): enquanto e variou de 7 a 17, o K variou de 3×10^{-10} a $8 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$, de acordo com a Equação 3:

$$K = 2,13 \times 10^{-15} \times (e)^{6,15} \quad (3)$$

Em que k = condutividade hidráulica (m.s^{-1}); e = índice de vazios.

Xia (1994) observou a permeabilidade de 11 LETAs por meio dos ensaios de adensamento unidimensional, utilizando o primeiro carregamento (carregamento mais baixo, 24,76 kPa), de cada LETA para determinar k . Foram encontrados valores da ordem de 10^{-8} a 10^{-9} m.s^{-1} . Os valores são condizentes com solos argilosos.

Figura 32 – Permeabilidade em função do índice de vazios para lodo *in natura*.

Fonte: Wang & Tseng (1993).

O'Kelly (2016) investigou 3 lodos de SFA e concluiu que os coeficientes de permeabilidade de lodos de ETAs são tipicamente da ordem de 10^{-9} a 10^{-11} m.s⁻¹, exibindo relações inversas com as tensões efetivas e relações diretas com o índice de vazios em gráficos bilogarítmicos (Figuras 33 e 34). A baixa condutividade hidráulica se deve à fina granulometria, à microestrutura intrincada dos flocos constituintes, que tende a prender a água intersticial, ao fato de o SFA estar principalmente presente em uma forma amorfa e, portanto, fortemente hidratado, e ao alto teor de matéria orgânica.

Figura 33 – Condutividade hidráulica em função da tensão efetiva de 3 LETAs.

Fonte: O'Kelly & Quille (2009).

Figura 34 – Condutividade hidráulica em função do índice de vazios de 3 LETAs.

Fonte: O'Kelly & Quille (2009).

3.4 Areia Argilosa Laterítica de Botucatu (SP)

A amostra estudada por Zanon (2014) foi obtida no interior do terreno do aterro sanitário de Botucatu (São Paulo) em 31 de agosto de 2011, em local afastado e a montante dos maciços de resíduos (Figura 35), com coordenadas geográficas UTM 756.247 m E e 7.459.857 m S e cota 847 metros. A localidade apresenta estratigrafia associada às Formações Botucatu e Pirambóia, ambas constituídas por arenitos de granulação média a fina, sendo a primeira com coloração vermelha, rósea ou amarelo-claro e a segunda com coloração branco-alaranjada e avermelhada, bastante homogêneas e com contribuição de material fino menor que 20%. O local possui formação pedológica da classe mais abundante do estado de São Paulo, os Latossolos, sendo classificado mais especificamente como Latossolo Vermelho-Amarelo (ROSSI, 2017).

Figura 35 – Coleta de amostra da Areia Argilosa de Botucatu.

Fonte: Imagem de satélite do software *Google Earth*..

3.4.1 Caracterização Física, Química e Mineralógica

Os resultados da DRX do solo obtidos por Zanon (2014) indicaram a presença quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e hematita (Fe_2O_3) e a possível presença de anatásio (TiO_2). O difratograma está apresentado em vermelho na Figura 36, onde estão assinaladas as linhas de difração correspondentes às fases cristalinas identificadas. Na Figura 37 estão apresentadas as fases identificadas.

As micrografias da MEV realizada por Zanon (2014) podem ser observadas na Figura 38. As análises químicas pontuais indicaram a predominância de: óxidos de silício (SiO_2), de alumínio (Al_2O_3), de ferro (Fe_2O_3) e de titânio (TiO_2), podendo ser associados à presença dos seguintes minerais, respectivamente: quartzo e caulinita, caulinita e gibbsita, hematita e anatásio.

Figura 36 – Difratoograma de raios-X da areia argilosa de Botucatu.

Fonte: Zanon (2014).

Figura 37 – Fases cristalinas identificadas na DRX da areia argilosa de Botucatu.

Fonte: Zanon (2014).

Figura 38 – Micrografias da areia argilosa de Botucatu.

Fonte: Zanon (2014).

Os resultados da análise química semiquantitativa por FRX estão apresentados na Tabela 18. Em acordo com a DRX, mostraram-se predominantes: silício, alumínio, ferro e titânio.

Tabela 18 – Resultados da FRX da Areia Argilosa de Botucatu.

Composto Químico	Teor Normalizado do Composto (%)	Composto Químico	Teor Normalizado do Composto (%)
SiO ₂	68,1	V ₂ O ₅	0,03
Al ₂ O ₃	16,5	MnO	0,03
Fe ₂ O ₃	7,17	CaO	0,02
TiO ₂	1,55	Nb ₂ O ₅	0,02
Cr ₂ O ₃	0,08	SO ₃	0,02
ZrO ₂	0,07	NiO	0,01
Ta ₂ O ₅	0,06	ZnO	0,01
P ₂ O ₅	0,05	Cl	0,01
MgO	0,04	PbO	0,01
CuO	0,04	Y ₂ O ₃	< 0,01
K ₂ O	0,04	Perda ao Fogo	6,11

Fonte: Zanon (2014).

Os resultados de outras análises químicas realizadas pelo autor podem ser observados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados de análises químicas da Areia Argilosa de Botucatu.

Parâmetro	Quantidade	Parâmetro	Quantidade
pH (em H ₂ O)	5,7	H ⁺ +Al ³⁺ (mmolc.kg ⁻¹)	22
pH (em solução de KCl 1 mol.L ⁻¹)	4,4	Soma de bases trocáveis (mmolc.kg ⁻¹)	1,8
P (mg.kg ⁻¹)	< 1	CTC (mmolc.kg ⁻¹)	23,4
K (mmolc.kg ⁻¹)	< 0,3	Saturação da CTC por bases	8
Ca (mmolc.kg ⁻¹)	< 2	Saturação por alumínio (%)	65
Mg (mmolc.kg ⁻¹)	1	Matéria orgânica (g.kg ⁻¹)	7
Al (mmolc.kg ⁻¹)	3	Carbono orgânico (g.kg ⁻¹)	4

Fonte: Zanon (2014).

De acordo com dados do IBGE (2007), o solo é moderadamente ácido (pH entre 5,4 e 6,5), assim como solos tropicais em geral. A carga líquida do solo (Δ pH) igual a -1,3, indicando predominância de cargas superficiais negativas, ou seja, o solo é mais propício à adsorção de cátions. A CTC é baixa (23,4 mmolc.kg⁻¹) (CTC menores que 270 mmolc.kg⁻¹ caracterizam solo com baixa atividade, enquanto valores iguais ou superiores indicam alta atividade); a acidez potencial (H⁺+Al³⁺) representa 94% dos cátions do solo; o teor de matéria orgânica é baixo, mas coerente com outros solos brasileiros.

3.4.2 Caracterização Geotécnica

Em ensaios de granulometria, realizados de acordo com a NBR 7.181 (ABNT, 2017), com duas amostras da areia argilosa laterítica de Botucatu coletadas por Montalvan (2016), obtiveram-se as seguintes frações médias em massa seca de solo: 2,4 % de areia grossa, 45,5% de areia média, 24,3% de areia fina, 4,1% de silte, e 23,8% de argila. Para o mesmo solo, Zanon (2014) obteve as seguintes frações granulométricas em massa seca: 28% de areia média, 60% de areia fina, 4% de silte e 8% de argila.

Os valores médios dos limites de consistência das duas amostras de solo analisadas por Montalvan (2016) e da amostra analisada por Zanon (2014) foram, respectivamente: LL de 28% e 26%, LP de 15% e 16%, resultando consequentemente o índice de plasticidade (IP) de 13% e 10%.

Com base na granulometria e nos limites de consistência, o solo se classifica como uma Areia Argilosa (SC) segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (ASTM, 2017a).

Montalvan (2016) obteve massa específica dos sólidos igual a $2,690 \text{ g/cm}^3$, enquanto Zanon (2014) obteve $2,685 \text{ g/cm}^3$, valores muito próximos entre si.

3.4.3 Comportamento Geotécnico

Compactação

Montalvan (2016) e Zanon (2014) realizaram ensaios de compactação com o solo em questão, utilizando energia normal, e obtiveram como parâmetros ótimos de compactação, respectivamente: densidade seca máxima de $1,92 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,86 \text{ g.cm}^{-3}$ e umidade ótima de 12,4% e 14,3%. De acordo com Pinto (2006), areias argilosas lateríticas podem apresentar umidades ótimas entre 12 e 14% e densidades secas máximas de até $1,9 \text{ g/cm}^3$.

Deformabilidade

O ensaio de adensamento do solo compactado na energia normal foi realizado por Montalvan (2016). O solo foi compactado na umidade de 12,8% (desvio de umidade de +0,4%) e massa específica seca de $1,86 \text{ g.cm}^{-3}$ (grau de compactação $GC = 97,5\%$). O autor obteve C_c igual a 0,07 e C_r igual a 0,02, indicando baixa compressibilidade.

Resistência ao Cisalhamento

No ensaio de compressão triaxial adensado anisotropicamente não drenado (CAU), Montalvan (2016) obteve as curvas tensão-deformação e pressão neutra-deformação do solo para valores de tensão principal menor de adensamento (σ_3) de 50, 100 e 200 kPa. Como o adensamento foi anisotrópico com razão de tensões ($K = \sigma'_3/\sigma'_1$) 0,8, os valores da tensão principal maior de adensamento (σ_1) foram de 62,5,

125, e 250 kPa correspondentes aos valores de tensão principal menor de 50, 100 e 200, respectivamente.

Na Figura 39 é possível observar que o solo desenvolveu pressão neutra negativa nos ensaios realizados com tensão confinante₁ (σ_3) de 50 e 100 kPa, indicando tendência à expansão volumétrica durante o cisalhamento, comportamento típico de areias compactas e argilas muito sobreadensadas, assim como de solos compactados. Os valores determinados para o ângulo de atrito efetivo e a coesão efetiva do solo foram 34° e 22 kPa, respectivamente.

Figura 39 – Resultados do ensaio triaxial CAU com o solo: curvas tensão em função da deformação e pressão neutra em função da deformação.

Fonte: Montalvan (2016).

Permeabilidade

Montalvan (2016) obteve condutividades hidráulicas, referidas à temperatura de 20°C (k_{20}), iguais a $6,8 \times 10^{-6}$ e $3,9 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ para gradiente hidráulico 10 e tensões

confinantes 30 e 60 kPa, respectivamente. Zanon (2014) realizou ensaios com dois corpos de prova diferentes a gradientes hidráulicos crescentes. O primeiro foi submetido a gradientes de 5, 10 e 15 e o segundo a gradientes de 2, 5, 10 e 15. Sob gradiente 10, as condutividades hidráulicas foram, respectivamente, $1,2 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ e $1,5 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$.

3.5 Misturas de Solos e Lodos de ETAs

Conforme citado no Item 1, têm sido desenvolvidas diversas investigações sobre a reutilização de LETAs. Devido ao tema da dissertação, neste item será dada especial atenção aos estudos relacionados ao seu reuso misturado a solos em obras geotécnicas.

3.5.1 Caracterização Geotécnica

Montalvan et al. (2019) realizaram investigações geotécnicas com misturas do LETA da ETA Cubatão *in natura* e dois solos lateríticos distintos na umidade higroscópica: areia argilosa de Botucatu (São Paulo) e argila de Campinas (São Paulo). Esses autores investigaram as características dos solos, do lodo e de 3 misturas de solo e lodo em diferentes proporções com cada solo (Tabela 20). As proporções investigadas foram: 5 partes de solo para 1 de lodo, 4 de solo para 1 de lodo, 3 de solo para 1 de lodo e 2 de solo para 1 de lodo (5:1, 4:1, 3:1 e 2:1). Os resultados encontrados foram:

- O LETA Cubatão apresentou granulometria composta por mais de 94% de finos (argila + silte);
- A adição do LETA nas proporções investigadas pelo autor não alterou significativamente os limites de consistência dos solos lateríticos estudados, com isso, a classificação das misturas foi a mesma que a dos solos;
- A adição do LETA não influenciou na massa específica dos sólidos da areia, mas diminuiu a da argila. A explicação dada pelos autores foi a possível formação de aglomerados (*clusters*) de partículas de argila induzida pelos coagulantes do lodo prendendo ar entre os vazios.

Tabela 20 – Resultados da caracterização geotécnica de solos e misturas de solo e LETA.

Material	LL (%)	IP (%)	ρ_s (g/cm ³)	Classificação o SUCS	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
Solo B	31	14	2,69	SC	24,4	9,8	65,8
LETA C (amostra 1)	239	158	2,85 - 2,95	MH	69,3	26,1	4,6
5:1 BC	32	14	2,71	CL	26,8	9,3	63,9
4:1 BC	32	15	2,70	CL	23,9	8,3	67,8
3:1 BC	33	16	2,69	CL	27,1	9,5	63,4
Solo C	45	18	2,98	CL-ML	51,9	26,2	21,9
LETA C (amostra 7)	237	138	2,94	MH	78,1	20,2	1,7
4:1 CC	46	18	2,74 - 2,78	CL-ML	44,7	35,4	19,9
3:1 CC	50	16	2,70 - 2,80	ML-MH	47,8	32,7	19,5
2:1 CC	63	27	2,77 - 2,84	MH	44,7	36,1	19,2

Nota: Solo B – areia argilosa laterítica de Botucatu; Solo C – argila laterítica de Campinas; LETA C – Lodo da ETA Cubatão; SC – areia argilosa; MH – silte de alta plasticidade; CL – argila de baixa plasticidade; ML – silte; ρ_s – massa específica dos sólidos; SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos.

Fonte: Montalvan et al. (2019).

3.5.2 Comportamento Geotécnico

Compactação

Nos ensaios de compactação com as misturas, Montalvan et al. (2019) observaram que os parâmetros ótimos foram consideravelmente influenciados pela adição de LETA. O solo arenoso e o solo argiloso apresentaram, respectivamente, massa específica seca máxima iguais a 19,1 e 15,7 kN.m⁻³ e teores umidade ótima iguais a 12,4 e 26,2%, respectivamente. Nas misturas, a massa específica seca máxima diminuiu e os teores de umidade ótimos aumentaram com o aumento do teor de lodo. Esta influência foi mais significativa nas misturas com o solo arenoso.

Ferreira et al. (2019) estudaram a influência da secagem prévia de misturas de solo e lodo nos parâmetros de compactação ótimos. Esses autores utilizaram misturas dos solos lateríticos areia argilosa de Botucatu (São Paulo) e argila de Campinas (São Paulo) com o lodo da ETA Cubatão *in natura*, na proporção 4:1. Assim como

Montalvan et al. (2019), a massa específica seca máxima diminuiu e os teores de umidade ótimos aumentaram com a adição de lodo. A secagem prévia provocou a recuperação dos parâmetros de compactação de forma linear, exercendo maior influência nas misturas com o solo arenoso. Os resultados obtidos indicam que misturas de solos lateríticos e lodo, com secagem prévia à compactação, podem ser potencialmente viáveis para diversos usos geotécnicos, exigindo maior detalhamento na determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade em função da aplicação desejada.

Resistência ao Cisalhamento e Deformabilidade

Montalvan (2016) estudou a resistência ao cisalhamento de misturas da areia argilosa laterítica de Botucatu com o lodo da ETA Cubatão *in natura*, nas proporções 5:1, 4:1 e 3:1. Foram realizados ensaios de compressão triaxial do tipo adensado anisotropicamente não-drenado (*Anisotropically Consolidated Undrained*, CAU), com tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa. Os parâmetros de resistências obtidos pelo autor estão apresentados na Tabela 21: os ângulos de atrito efetivos foram crescentes com o aumento do teor de lodo e os interceptos de coesão efetivos foram decrescentes.

Tabela 21 – Parâmetros de resistência de misturas de solo e lodo.

	Solo	Mistura 5:1	Mistura 4:1	Mistura 3:1
ϕ' (°)	34	34	35	37
c' (kPa)	22	17	15	10

Fonte: Montalvan (2016).

De acordo com Montalvan (2016), em ensaios de adensamento com as mesmas misturas, os C_c não foram crescentes com o teor de lodo, sendo, 0,19, 0,14, 0,13, para as misturas 3:1, 5:1 e 4:1, respectivamente. Os C_r das misturas 3:1 (0,02) e 4:1 (0,02) foram muito próximos entre si, enquanto o da mistura 5:1 (0,03) foi maior. A adição do LETA levou ao aumento expressivo da compressibilidade dos solos. Embora a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento dos solos tenham sido influenciadas pela adição de lodo, os valores dos parâmetros obtidos para as proporções de mistura estudadas são adequados para diversas obras geotécnicas. A compressibilidade pode ser o fator determinante na avaliação da adequação de

misturas solo-lodo como material de construção, uma vez que a adição de lodo parece afetar mais este comportamento que a resistência (MONTALVAN et al., 2019).

Coelho et al. (2015) investigaram a resistência à compressão simples de misturas compactadas de um solo argiloso com lodo da ETA Cafezal seco (Londrina, Paraná), na proporção 1:1, e de um solo arenoso com o mesmo lodo, na proporção 1:0,25. A adição de lodo levou a uma redução da resistência do solo. Segundo os autores, nas proporções analisadas, as misturas podem ser utilizadas como camada de subleito de pavimento.

Resiliência

Delgado (2016) realizou ensaios triaxiais de cargas repetidas para obtenção do Módulo Resiliente de misturas de um solo arenoso e um lodo (nas proporções 95% e 5%, S95L5, 90% e 10%, S90L10), um solo argiloso e um lodo e pó de pedra e lodo. Por meio do ensaio, baseando-se em constantes experimentais, foram obtidos modelos matemáticos simplificados em função da tensão confinante, que foram usados como entrada no cálculo de tensões e deformações de pavimentos. A baixas tensões confinantes, a mistura S90L10 apresentou redução de 15% do módulo resiliente em relação ao solo arenoso, enquanto a altas tensões confinantes, houve redução de 33%. A mistura S95L5, independentemente da tensão confinante, apresentou diminuição de cerca de 13% em relação ao solo arenoso. Concluiu-se que a adição de lodo a este solo não trouxe nenhuma melhoria em termos de deformabilidade, além de ter prejudicado seu comportamento resiliente (Figura 40).

Figura 40 - Comparação do comportamento resiliente de misturas de solo arenoso e lodo de ETA.

Fonte: Delgado (2016).

3.6 Parâmetros Geotécnicos Adotados em Obras

3.6.1 Aterros Sanitários

O principal parâmetro geotécnico considerado para coberturas finais e revestimentos de fundo de aterros sanitários é a permeabilidade. O objetivo é, respectivamente, minimizar a infiltração de água e a contaminação do subsolo e lençol freático. Especificações para coberturas diárias não são uma preocupação, uma vez que suas principais funções são: controle de vetores transmissores de doenças (como pernilongos, pulgas, mosquitos e ratos), incêndios por explosão de biogás, emissão de odores, espalhamento de material particulado, dentre outros.

No Brasil, não existem especificações geotécnicas para aterros sanitários de grande porte. A NBR 13.896 (ABNT, 1997), relativa a aterros de resíduos não-perigosos, orienta apenas que no plano de encerramento devem constar:

O projeto e construção da cobertura final, de forma a minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não estar sujeita a erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro.
(ABNT, 1997)

A norma ainda especifica que, obrigatoriamente, “o aterro deve ser executado em áreas onde haja predominância no subsolo de material com condutividade hidráulica inferior a $5 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$ ”.

A NBR 15.849 (ABNT, 2010), para aterros sanitários de pequeno porte, recomenda a adoção de um sistema de impermeabilização de fundo complementar, executado por meio de compactação com controle tecnológico de solo ou com a aplicação de geossintético impermeabilizante, sempre que existam riscos para as águas subterrâneas. A compreensão acerca do risco é baseada na correlação entre parâmetros relacionados majoritariamente às condições de campo: permeabilidade do solo local, profundidade do lençol freático, excedente hídrico e percentual de matéria orgânica nos resíduos.

Em aterros sanitários, os materiais comumente utilizados como barreira de fundo são solos argilosos compactados, geomembranas, geossintéticos e combinações destes materiais. A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), no estado de São Paulo, tem como requisitos para barreiras de fundo de aterros sanitários de resíduos perigosos, uma camada de solo argiloso compactado de 1 metro de espessura e condutividade hidráulica menor que $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ sobreposta por um sistema de duas geomembranas PEAD de 2 milímetros de espessura ($K = 1 \times 10^{-14} \text{ m/s}$) entremeadas com uma camada drenante (dreno testemunho). Para resíduos não perigosos, o requisito é uma camada de argila de 0,60 metros de espessura e condutividade hidráulica menor que $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ sobreposta por uma geomembrana de PEAD de 2 milímetros de espessura coberta por um geotêxtil de proteção (BOSCOV, 2008).

As barreiras devem possuir permeabilidade menor ou igual à permeabilidade de qualquer sistema de revestimento de fundo ou subsolos naturais presentes ou permeabilidade não superior a $1 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$, o que for menor (BONAPARTE et al., 2004; USEPA, 1991).

Koerner & Daniel (1997) especificaram, para camadas argilosas compactadas: condutividades hidráulicas menores que $1 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$; porcentagem de finos mínima (partículas passando na peneira Nº 200 com 0,074 mm de abertura) $\geq 30\text{-}50\%$; IP mínimo $\geq 7\text{-}15\%$; porcentagem máxima de pedregulhos (partículas retidas na peneira Nº 4 com 4,76mm de abertura) $\leq 20\text{-}50\%$ e tamanho máximo das partículas $\leq 25\text{-}50 \text{ mm}$.

Para Rocca, Iacovone & Barrotti (1993), para um solo argiloso ser considerado adequado, tanto para uso em camadas de fundo quanto coberturas finais, ele deve atender às seguintes especificações: ser classificado, pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), como Argila magra (*Lean Clay* – CL), Argila gorda (*Fat Clay* – CH), Areia argilosa (*Clayey sand* – SC) ou Argila/Silte orgânico (*Organic clay/silt* – OH); ter porcentagem de finos $\geq 30\%$; $LL \geq 30\%$; $IP \geq 15\%$; $pH \geq 7$ e condutividade hidráulica $\leq 1 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ quando compactado. Para solos argilosos brasileiros, o requisito de pH maior ou igual a 7 dificilmente é atingido (Fadigas et al. 2002). No entanto, solos lateríticos, mesmo ácidos por natureza, têm mostrado elevada capacidade de retenção de poluentes (Boskov, 2010).

3.6.2 Bases de Pavimentos

Dentre as especificações da norma 098 (DNIT, 2007) – Pavimentação - base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico - Especificação de serviço – os materiais utilizados como bases de pavimentos devem atender:

- a) A fração que passa na peneira N° 40 (abertura de 0,42 mm) deverá apresentar limite de liquidez inferior ou igual a 40% e índice de plasticidade inferior ou igual a 15%;
- b) Os solos lateríticos com $IP > 15\%$ poderão ser usados em misturas como outros materiais de $IP \leq 6\%$, satisfazendo a mistura resultante aos seguintes requisitos, dentre outros:
 - $LL \leq 40\%$ e $IP \leq 15\%$;
 - Ausência de argilas das famílias das nontronitas e/ou montmorilonitas constatadas em análises mineralógicas.
- c) O equivalente em areia deverá ser maior que 30%;
- d) A porcentagem do material que passa na peneira N° 200 (abertura de 0,075 mm) não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira N° 40;
- e) O agregado retido na peneira N° 10 (abertura de 2 mm) deve ser constituído de partículas duras e duráveis, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, isento de matéria vegetal ou outra substância prejudicial e apresentando valores de abrasão “Los Angeles” menores ou iguais a 65%;

- f) Possuir composição granulométrica satisfazendo uma das faixas da Tabela 22:

Tabela 22 – Faixas granulométricas de materiais utilizados em bases de pavimentos.

Peneira	Abertura (mm)	Faixas Granulométricas (%, em Peso Passando)		
		Faixa A	Faixa B	
2"	50,8	100 – 100	–	–
1"	25,4	100 – 75	100 – 100	± 7
3/8"	9,5	85 – 40	95 – 60	
Nº 4	4,8	75 – 20	85 – 30	
Nº 10	2,09	60 – 15	60 – 15	± 5
Nº 40	0,42	45 – 10	45 – 10	
Nº 200	0,075	30 – 5	30 – 5	± 2

Fonte: Norma 098 (DNIT, 2007).

3.6.3 Barragens

No caso das barragens, não existem normativas especificando requerimentos mínimos ou máximos dos parâmetros geotécnicos dos solos a serem empregados. Os solos são selecionados considerando seu comportamento geotécnico em diferentes obras, levando em conta: solo de fundação, tipo de barragem, resultados de análises de estabilidade, adensamento, parâmetros de compactação ótimos, dentre outros. Na Tabela 23 estão apresentados parâmetros geotécnicos de resistência de solos de diferentes barragens, a partir dos quais é possível perceber que há uma grande variação entre eles. No geral, os interceptos de coesão são menores que 10 kPa e os ângulos de atrito, variam entre 30° e 35°.

No caso dos solos arenosos, além dos parâmetros de resistência, no caso de barragens, o comportamento dos materiais durante o cisalhamento também é muito importante. Materiais que apresentam comportamento predominantemente contrátil, podem apresentar potencial de se liquefazer, devendo ser realizados ensaios e/ou análises complementares, como a proposta por Olson (2001), que leva em conta a resistência não drenada.

Tabela 23 – Parâmetros geotécnicos de solos utilizados em barragens.

Amostra/ Procedência	Limites de Atterberg		Classificação SUCS	Parâmetros de Compactação Proctor Normal		Parâmetros de resistência ao cisalhamento	
	LL (%)	IP (%)		W _{ót.} (%)	γ _d máx (g/cm ³)	c' (kPa)	φ' (°)
Promissão S-6 (SP)	23	13	SP	9,5	2,036	7,8	34,0
Prom. Macuco C (SP)	17	7	SP	9,7	2,050	9,8	35,0
Prom. P.Queixada (SP)	18	6	SP	9,7	1,984	7,8	33,5
3 Irmãos F.G. (SP0)	24	12	SP	10,0	2,020	9,8	34,0
Prom. Macuco A (SP)	20	7	SP	10,2	2,037	4,9	35,0
Xavantes C (SP)	20	3	SC	10,7	1,980	0	33,0
Jupia (SP-MT)	25	11	CL	10,9	1,995	4,9	33,0
Taquaruçu (SP- PR)	29	16	CL	11,2	1,980	4,9	33,0
Guaíra M.D. (SP)	25	8	SP	11,5	1,960	4,9	31,0
Ibitinga (SP)	24	7	SP	12,0	1,950	19,6	32,0
Ilha Solteira I (SP-MT)	24	8	CL	12,2	1,925	4,9	33,5
Xavantes C' (SP)	25	9	SP	12,7	1,884	14,7	33,0
Anhembi (SP)	35	16	CL	13,5	1,860	6,9	34,0
Xavantes H1 (SP)	31	14	CL	14,0	1,812	9,8	33,5
Guaíra eixo 2-3 (SP)	33	14	CL	15,3	1,820	0	28,5
Promissão S-3 (SP)	37	22	CL	17,6	1,774	29,4	26,5
Ilha Solteira II (SP-MT)	36	12	CL	17,1	1,737	9,8	33,0
Dona Francisca B6 (RS)	40	21	CL	17,2	1,770	9,8	28,5
Dona Francisca B8 (RS)	40	18	CL	19,3	1,668	9,8	30,5
Dona Francisca B9 (RS)	52	27	CL	22,0	1,620	9,8	26,5
Ilha Solteira III (SP-MT)	46	15	CL	22,1	1,632	14,7	30,0
MÉDIA	30	13	-	13,7	1,881	9,2	32,0

Fonte: Cruz (1967).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram utilizados um solo – uma areia argilosa laterítica muito empregada em obras geotécnicas –, um lodo de ETA e três misturas de solo e lodo em diferentes proporções. Conforme apresentado no Item 2, o objetivo foi definir o teor de lodo máximo a ser adicionado ao solo sem que houvesse alterações significativas em suas propriedades geotécnicas.

Inicialmente, os materiais foram devidamente caracterizados: o solo e o lodo foram caracterizados física, química e mineralógicamente; o solo, o lodo e as misturas foram caracterizados geotécnicamente. Foram investigadas as propriedades geotécnicas do solo e das misturas (deformabilidade, resistência ao cisalhamento, permeabilidade e resiliência), a fim de realizar uma análise comparativa e concluir sobre a influência da adição do lodo nas propriedades do solo.

Os ensaios geotécnicos foram realizados segundo as normas da ABNT e ASTM, no entanto, foram feitas adaptações para o lodo devido à diferença de comportamento em relação aos solos naturais e devido às alterações de suas propriedades com a secagem.

4.1 Descrição dos Materiais

4.1.1 LETA Taiaçupeba

O lodo foi coletado na ETA Taiaçupeba, localizada na cidade de Suzano (SP) (Figura 41).

A estação se localiza junto à margem esquerda da Represa Taiaçupeba, compondo o Sistema Produtor Alto Tietê da SABESP, e conta com uma área de 50 hectares. A capacidade de produção de água potável da ETA é de 15.000 L.s^{-1} , que atende a 4,2 milhões de habitantes das cidades de São Paulo, Arujá, Itaquaquecetuba, Poá, Ferraz de Vasconcelos, Suzano, Mogi das Cruzes e Guarulhos.

Figura 41 – ETA Taiapuêba, Suzano (São Paulo).

Fonte: Imagem de satélite do *software Google Earth*.

A água bruta, captada da represa, é tratada por ciclo convencional, no qual são utilizados como coagulantes o sulfato de alumínio e um polímero de alto peso molecular (*superfloc 8392*)⁴. O lodo coletado diretamente nos decantadores e filtros é encaminhado para tanques de equalização e adensamento. A água equalizada sobrenadante retorna para o início do processo de tratamento. Após nova adição de polímero, o lodo passa por esteiras de desaguamento, onde atinge teor de sólidos de aproximadamente 4%. O desaguamento final do lodo é realizado em centrífugas e resulta num teor de sólidos entre 16 e 18% (teor de umidade de 455 a 525%). O lodo desaguado é enviado para leitos de secagem em um pavilhão coberto, aberto nas

⁴ O polímero *superfloc 8392* trata-se da poliacrilamida (C_3H_5NO), floculante catiônico de alto peso molecular, densidade 0,80 kg/L e pH em solução 0,5% (25°C) variando entre 3,0 e 5,0 (ASOCIACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA, 2019). Os polímeros são macromoléculas constituídas por uma cadeia de grupos unitários de moléculas (monômeros) com arranjo característico. O mecanismo de floculação do agente consiste na neutralização de cargas elétricas superficiais que envolvem os sólidos suspensos, aumentando a densidade dos flocos (DUMKE et al., 2015).

laterais e com piso revestido por uma manta de polietileno de alta densidade que impede a infiltração do percolado no solo.

A coleta de amostras baseou-se na Teoria da Amostragem para garantir representatividade do lodo gerado durante um mês na ETA (TSUGAWA et al., 2019). Amostras de lodo de aproximadamente 7 kg foram coletadas diariamente durante quatro semanas (20 dias úteis) na saída das centrífugas e armazenadas dentro de sacos plásticos vedados na câmara úmida do Laboratório de Mecânica dos Solos Milton Vargas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LMS-EPUSP). Com o objetivo de formar uma única amostra representativa do mês de coleta, todas as amostras foram misturadas e homogeneizadas, e então armazenadas em potes plásticos hermeticamente fechados em câmara úmida.

O aspecto do LETA *in natura* (no teor de umidade de coleta na saída da centrífuga) pode ser observado na Figura 43a. A cor preta do material é provavelmente resultado do alto teor de matéria orgânica presente, a ser discutido posteriormente neste trabalho, e da presença de polímeros.

4.1.2 Solo

O solo utilizado foi uma areia argilosa laterítica proveniente da região do aterro sanitário do município de Botucatu, São Paulo, cuja caracterização foi apresentada no Item 3.4.

O solo foi coletado e transportado para o LMS-EPUSP, destorroado e disposto em bandejas para secagem ao ar e à sombra até umidade higroscópica (~1%), conforme mostra a Figura 42.

Figura 42 – Areia argilosa laterítica de Botucatu (São Paulo).

Fonte: A autora.

4.2 Caracterização Química e Mineralógica

4.2.1 LETA Taiaçupeba

A amostra de lodo foi preparada para a caracterização mineralógica por secagem ao ar, com misturas periódicas para uniformização da umidade, destorroamento com almofariz de porcelana e pistilo de borracha e secagem em estufa a 35°C. Na Figura 43 estão apresentadas fotos do LETA Taiaçupeba em diversas etapas de preparação de amostras. Na Figura 43b pode ser observada a variação da cor na superfície do material, causada pela exposição ao ar. Nas Figuras 43C e 43D, é possível observar a formação de grumos fortemente cimentados com a secagem.

Figura 43 – LETA Taiaçupeba: A) *in natura*; B) no início da secagem ao ar; C) em processo de secagem ao ar sem homogeneização; D) em processo de secagem ao ar com homogeneização periódica; E) seco ao ar e destorroad.

Fonte: A autora.

Uma parcela da amostra foi enviada para o Laboratório de Análise de Solos do Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (USP) (LSO-ESALQ) para caracterização química, de acordo com os métodos da EMBRAPA (2017). Foram realizados os ensaios: pH em H₂O; pH em KCl 1 mol.L⁻¹; carbono orgânico e matéria orgânica pelo método da titulometria; cálcio (Ca) e magnésio (Mg) por extração com cloreto de potássio 1 mol.L⁻¹ e determinação em espectrofotômetro de absorção atômica; potássio (K) por extração com Mehlich 1 e determinação em espectrofotômetro de emissão atômica; sódio (Na) por extração com Mehlich 1 e determinação por fotômetro de chama; acidez potencial (H⁺+Al³⁺) 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; soma de bases trocáveis; capacidade de troca catiônica (CTC); saturação da CTC por bases (V) e saturação por alumínio (m).

A caracterização mineralógica foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP (LCT-EPUSP) por DRX, FRX e MEV. A DRX foi efetuada através do método do pó, mediante o emprego do difratômetro de raios X *X'pert Panalytical* com detector sensível a posição. Foi utilizado tubo de Cobre, filtro de Níquel, ângulos de varredura de 4 a 70°, passo de 0,02° e tempo total da varredura 1h30. A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD (*International Centre for Diffraction Data*) e ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*).

Os teores de Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti, P foram determinados por FRX em uma amostra fundida com Tetraborato de Lítio, na calibração ROC-1 (Rochas), relativa à análise quantitativa por comparação com materiais de referência certificados, em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca *Malvern Panalytical* modelo *Zetium*. Na Tabela 24 estão apresentados o ângulo do detector (2θ) em relação ao feixe de raios-X e os cristais utilizados como rede de difração na análise de cada elemento. Todas as análises foram feitas a partir das transições discretas entre as camadas L e K (K_{α1,2}).

Tabela 24: Ângulos do detector e cristais utilizados na FRX.

Elemento	Cristal	Ângulo do detector (2 θ)
Fe	LiF220	85,7148
Mn	LiF220	95,1996
Ti	PX10	86,1314
Ca	PX10	113,0786
K	PX10	136,6376
P	Ge	140,9502
Si	InSb	144,6862
Al	PE	144,8088
Mg	PX1	22,9008
Na	PX1	27,6924

Fonte: LCT-EPUSP.

A análise em MEV compreendeu a coleta de imagens e análises químicas pontuais semiquantitativas por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS). Foi utilizado o microscópio eletrônico *Quanta 650 FEG*, marca *FEI*, com espectrômetro de *EDS Quantax 4030*, marca *Bruker*. As amostras analisadas foram montadas em suportes próprios para MEV, em fita de carbono dupla face e recobertos com película de carbono por vaporização. As análises compreenderam a execução de imagens de detalhe, com a seleção de pontos e/ou áreas, quando pertinentes, para microanálise química por EDS, priorizando regiões representativas das feições observadas.

Constatado o alto teor de matéria orgânica nas análises químicas, efetuou-se a extração da matéria orgânica, com a utilização de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), com 30% de concentração, e moderado aquecimento, a $(60 \pm 5) ^\circ C$ por três horas, de acordo com a norma D-7928-17 (ASTM, 2017 b). A amostra foi destorroada em moedor de ágata e foram repetidos os ensaios DRX, FRX e MEV, nos quais foram utilizados como meio de dispersão água deionizada e *Calgon*.

4.2.2 Solo

A caracterização química e mineralógica do solo foi efetuada por Zanon (2014), em estudos sobre a contaminação por lixiviado do subsolo do aterro sanitário de Bauru. As amostras deste trabalho foram coletadas no mesmo local e utilizando os mesmos métodos. Os resultados das análises químicas e mineralógicas de Zanon (2014) estão apresentados no Item 3.4.1.

4.3 Caracterização Ambiental

A caracterização ambiental do LETA Taiaçupeba foi realizada no Laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP Lab) e compreendeu os ensaios de Solubilização e Lixiviação, realizados de acordo com a NBR 10.006 (ABNT, 2004 b) e NBR 10.005 (ABNT, 2004 c), respectivamente. Outros métodos utilizados foram:

- PO-GT-3006 – Rev. 04 – Determinação de anidrido sulfúrico;
- PO-GT-3012 – Rev. 06 – Determinação de cloreto pelo método do íon seletivo;
- PO-GT-3013 – Rev.05 – Determinação de fluoreto pelo método do íon seletivo;
- PO-GT-3062 – Rev. 02 – Determinação de pH;
- PO-GT-6023 – Rev. 09 – Espectrometria de absorção atômica – Sistema gerador de hidretos;
- PO-GT-6030 – Rev. 03 – Determinação do teor de fenol;
- PO-GR-6036 – Rev. 02 – Determinação de metais e elementos traços por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente;
- PO-GT-6061 – Rev. 03 – Determinação de cianeto total;
- PO-GT-6065 – Rev. 04 – Determinação de nitrato pelo método do íon seletivo;

4.4 Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica do solo, do lodo e das misturas foi realizada no LMS-EPUSP e compreendeu os ensaios: teor de umidade (w), análise granulométrica, massa específica dos sólidos (ρ_s), limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). Para o lodo, realizou-se ainda o ensaio de determinação do teor de matéria orgânica.

As amostras foram preparadas com solo e lodo nas proporções 5:1, 4:1 e 3:1 em massa úmida, estando o solo na umidade higroscópica (~1%) e o lodo com umidade *in natura*. Os materiais foram misturados manualmente até completa homogeneização, obtendo-se misturas com teores de umidade distintos (Figura 44). As proporções de mistura foram definidas com base no trabalho de Montalvan (2016), que utilizou metodologia similar a deste trabalho e misturas com o mesmo solo deste trabalho (areia argilosa laterítica de Botucatu) e outro lodo (ETA Cubatão).

Figura 44 – Misturas homogeneizadas manualmente.

Fonte: A autora.

Os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos preconizados pela ABNT e ASTM (Tabela 25).

Tabela 25 – Ensaio e normas.

Ensaio	Norma
Preparação de amostras para ensaios geotécnicos	NBR 6.457 (ABNT, 1986 a)
Teor de umidade	NBR 6.457 (ABNT, 1986 a) / D2974-14 (ASTM, 2016)
Análise granulométrica	NBR 7.181 (ABNT, 2017) / D7928 – 17 (ASTM, 2017 b)
Limite de liquidez	NBR 6.459 (ABNT, 2016 a) / D4318-17E1 (ASTM, 2017 c)
Limite de plasticidade	NBR 7.180 (ABNT, 2016 b) / D4318-17E1 (ASTM, 2017 c)
Massa específica dos sólidos	NBR 6.508 (ABNT, 1984) / D854-14 (ASTM, 2014)
Teor de matéria orgânica	NBR 13.600 (ABNT, 1996) / D7928 – 17 (ASTM, 2017 b)
Classificação SUCS	D2487-17 (ASTM, 2017 a)

Nota: SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos.

Fonte: A autora.

Para o LETA houve alterações nos procedimentos normatizados. Para a determinação do teor de umidade adotou-se a temperatura de 110 °C. A NBR 6.457 (ABNT, 1986 a) recomenda a secagem de solos orgânicos, turfosos ou contendo

gipsita a $(60 \pm 5) ^\circ\text{C}$, enquanto a D2974-14 (ASTM, 2016) e a USEPA (2001) recomendam a secagem de solos orgânicos a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$. O’Kelly & Sivakumar (2014) demonstraram que a secagem em estufa a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ de LETAs é adequada para determinações rotineiras do teor de umidade e também preferível, uma vez que leva a menores erros que amostras secas a temperaturas inferiores. A umidade representativa do LETA Taiaçupeba foi considerada a média das 20 amostras coletadas diariamente na ETA. As amostras de lodo foram utilizadas para os ensaios na umidade *in natura* em vez de secas, uma vez que a secagem prévia altera as características do LETA (WATANABE et al., 2011; BASIM, 1999; XIA 1994).

No ensaio de análise granulométrica realizado conforme as normas da Tabela 25, não ocorreu sedimentação das partículas sólidas, assim como relatado por Vandermeijden & Cornwell (1998) e Hsieh & Raghu (1997). Então, foram realizados ensaios para verificar a influência da quantidade de material: utilizou-se material na umidade *in natura* em quantidade correspondente a 40 g e 10 g em massa seca, mantendo-se a concentração de $45,7 \text{ g.L}^{-1}$ do defloculante hexametáfosfato de sódio, indicado na norma. Também se verificou a influência do tipo e concentração de defloculante, testando-se três outros defloculantes. A relação das quantidades de material utilizadas, dos defloculantes e concentrações está apresentada na Tabela 26.

Tabela 26 – Análises granulométricas realizadas com o LETA Taiaçupeba.

Defloculante	Quantidade de lodo <i>in natura</i> utilizada (g)	Concentração da Solução de Defloculante (g.L^{-1})	Concentração da Solução de Defloculante (%)
Água	40,00	-	-
Hexametáfosfato de Sódio	40,00	45,70	4,57
	10,00	45,70	4,57
	10,00	91,40	9,14
Fosfato Trissódico	40,00	40,00	4,00
	40,00	80,00	8,00
Pirofosfato de Sódio	40,00	40,00	4,00
	40,00	80,00	8,00
Tripolifosfato de Sódio	40,00	40,00	4,00
	40,00	80,00	8,00

Fonte: A autora.

A análise granulométrica também foi determinada por ensaios a laser no LCT-EPUSP, utilizando como meio de dispersão água deionizada e *Calgon*, em três

amostras: uma amostra de lodo *in natura*; uma amostra seca ao ar e destorroada em moedor de ágata; uma amostra seca a 60°C, após extração da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio, e destorroada em moedor de ágata.

Devido à variabilidade do lodo, foram realizadas triplicatas dos ensaios de densidade dos grãos e limites de consistência. Para o solo realizaram-se triplicatas do ensaio de densidade dos grãos.

4.5 Propriedades Geotécnicas do Solo e das Misturas

4.5.1 Compactação

Foram realizados ensaios de compactação por umedecimento do solo e das três misturas, na energia normal e com reuso de material, segundo a NBR 7.182 (ABNT, 1986 b). Para o solo foram realizados dois ensaios.

Nos ensaios de compactação, foi utilizado o cilindro metálico pequeno (cilindro de Proctor), que compreende: o molde cilíndrico com altura $(127,3 \pm 0,3)$ mm e diâmetro $(100,0 \pm 0,4)$ mm; o cilindro complementar (colarinho) de mesmo diâmetro a altura 50,0 mm; a base de suporte. Também se utilizou o soquete metálico pequeno com massa (2.500 ± 10) g, dotado de dispositivo de controle de altura de queda (guia), de (305 ± 2) mm (Figura 45).

A influência da secagem prévia ao ar nos parâmetros de compactação ótimos ($w_{ót.}$ e $p_{d,máx.}$) das misturas foi avaliada em três graus de secagem (GS). O GS é definido como a relação entre a perda de água devida à secagem e o teor de umidade da mistura sem secagem prévia (w_{mi}). A perda de água é definida como a diferença entre o w_{mi} e o teor de umidade inicial no ensaio de compactação (w_i). O valor w_{mi} pode ser obtido pelo ensaio de determinação do teor de umidade ou por cálculo, através do teor de umidade do solo e do LETA antes da preparação da mistura.

Figura 45 – Compactação sendo executada.

Fonte: A autora.

4.5.2 Deformabilidade

A deformabilidade do solo (MONTALVAN, 2016) e das três misturas foi investigada por ensaios de adensamento unidimensional, de acordo com o método preconizado pela D2435/D2435M-11 (ASTM, 2020 a).

Para os ensaios, foram utilizadas prensas tipo Bishop, fabricados pela Ronald Top Ltda., do tipo convencional com sistema de carga de pesos em pendural com relação de braço de 1:10, células edométricas do tipo anel fixo e extensômetros da marca Mitutoyo com sensibilidade 0,01 mm.

As amostras foram preparadas por compactação nos respectivos pontos ótimos das curvas, na energia normal, por umedecimento, em cilindro de Proctor. Os espécimes foram envolvidos em plástico PVC, identificados e armazenados por 24 horas, com o objetivo de garantir homogeneização da umidade. Então, foram moldados corpos de prova, respeitando-se as recomendações da norma, com diâmetro de 71,3 mm e altura de 20,0 mm. Na Figura 46 estão fotografias do equipamento utilizado nos ensaios.

Figura 46 – Prensa de adensamento: A) vista frontal; B) vista lateral.

Fonte: A autora.

4.5.3 Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento do solo e das três misturas foi investigada por ensaios triaxiais do tipo adensado isotropicamente não-drenado (*Isotropically Consolidated Undrained, CIU*) com medida contínua de poropressão, de acordo com o método preconizado pela D4767-11 (ASTM, 2020 b).

Foi utilizada a prensa de carga marca GDS 50kN, com alta precisão de posição e velocidade, provida de transdutores de deslocamento e pressão para aquisição de dados por meio de computador e *software* específico. Na Figura 47 estão fotografias da moldagem e do equipamento utilizado.

As amostras de solo e das três misturas foram preparadas por compactação nos respectivos pontos ótimos das curvas, na energia normal, por umedecimento, em cilindro de Proctor. Os espécimes foram envolvidos em plástico PVC, identificados e armazenados por 24 horas, com o objetivo de garantir homogeneização da umidade. Então, de um mesmo espécime compactado, foram moldados os três corpos de prova do ensaio, respeitando-se as recomendações da norma, com diâmetro de 38,0 mm e altura de 80,0 mm.

Para determinar os parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento realizou-se medição contínua de poropressão. Foram aplicadas tensões confinantes de 550, 600, 700 kPa a cada conjunto de amostras, e contrapressão de 500 kPa, correspondentes a tensões confinantes (σ_3) de 50, 100 e 200 kPa. A velocidade de deslocamento foi de 0,007 cm/min, que permitiu o equilíbrio das poropressões ao longo do ensaio, com limite máximo de deformação axial de 18%.

Figura 47: Ensaio de Compressão Triaxial: A) corpo de prova compactado da mistura 5:1: divisão para moldagem de corpos de prova para ensaio; B) montagem do corpo de prova para o ensaio; C) célula triaxial montada para iniciar o ensaio; D) equipamento do ensaio.

Fonte: A autora.

A resistência não-drenada, s_u , do solo e das três misturas foi investigada por ensaios de compressão simples, de acordo com o método preconizado pela NBR 12.770 (ABNT, 1992), em triplicatas e com velocidade de deformação de 1%/min, visando garantir que o ensaio ocorresse de maneira não drenada.

Foi utilizada a prensa hidráulica da marca Instron provida de transdutores de deslocamento para aquisição de dados por meio de computador e *software* específico.

Os corpos de prova foram compactados com diâmetro e altura de 50 mm nos pontos ótimos de compactação na energia normal, por umedecimento, em equipamento miniatura MCT, conforme a norma ME228 (DNER, 1994). Na compactação foram aplicados 5 golpes de cada lado do corpo de prova, segundo recomendação da norma para solos arenosos. Os corpos de prova compactados foram envolvidos em plástico PVC, identificados e armazenados por um período mínimo de 24 horas, com o objetivo de garantir homogeneização da umidade.

A NBR 12.770 (ABNT, 1992) recomenda que a relação altura/diâmetro (H/D) do corpo de prova esteja entre 2 e 2,5, no entanto, como o diâmetro e a altura da compactação miniatura foram iguais, a relação H/D foi 1. Segundo Güneyli & Rüşen (2016), a resistência à compressão simples para corpos de prova de solos coesivos com H/D = 2 seria 69% do valor obtido para H/D = 1. Ferreira et al. (2019) realizaram ensaios com o mesmo solo deste trabalho com as duas relações geométricas, e obtiveram resistência à compressão simples 66% menor para H/D = 2.

4.5.4 Permeabilidade

A permeabilidade do solo e das misturas foi investigada por ensaios de permeabilidade de parede flexível, de acordo com o método D5084-16 (ASTM, 2020 c), com tensão confinante efetiva de 50 kPa, gradiente hidráulico 10 e fluxo de água ascendente. Como foi utilizada contrapressão de 450 kPa para saturar o corpo de prova (parâmetro B maior ou igual a 0,95), aplicou-se tensão confinante de 500 kPa para fornecer o valor efetivo desejado.

Foi utilizada a mesma prensa do ensaio de compressão triaxial, marca GDS 50kN, com alta precisão de posição e velocidade, provida de transdutores de deslocamento e pressão para aquisição de dados por meio de computador e *software*

específico. Também foi utilizado o equipamento *Tri-Flex 2 Master Control Panel*, da marca ELE International.

Os ensaios do solo e das misturas 5:1 e 3:1 foram realizados na célula triaxial, na qual o fluxo de água ascendente foi gerado por uma diferença de pressão de 7kPa entre o topo e a base (com 500 e 507 kPa, respectivamente). A percolação foi contínua até o volume de água percolado pelo corpo de prova de, no mínimo, 2 volumes de vazios do corpo de prova ou estabilização do resultado do ensaio. Foram também realizados ensaios de permeabilidade do solo e das misturas 5:1 e 4:1 no equipamento *Tri-Flex2* (Figura 48).

Os corpos de prova foram compactados no ponto ótimo da energia normal, por umedecimento, em cilindro de Proctor, e a seguir desbastados nas dimensões da norma, diâmetro e altura de 70,0 mm. Os espécimes foram envolvidos em plástico PVC, identificados e armazenados por 24 horas, com o objetivo de garantir homogeneização da umidade.

Figura 48 – Equipamento *Tri-Flex2* com ensaios em andamento.

Fonte: A autora.

4.5.5 Resiliência

Os ensaios de resiliência foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP (LTP-USP), de acordo com a norma 134

(DNIT, 2018), Solos – Determinação do Módulo de Resiliência, que especifica os procedimentos para determinação do módulo de resiliência de solos para várias combinações de tensões aplicadas, utilizando o equipamento triaxial de carga repetida.

O equipamento simula as condições físicas e os estados de tensões que os materiais estarão submetidos nas camadas do pavimento devido às cargas móveis do tráfego. O ensaio é feito sob uma tensão confinante (σ_3) constante e uma tensão vertical (σ_1), que é igual à tensão confinante acrescida de uma tensão desviadora (σ_d) variável, conforme apresentado na Equação 4.

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4)$$

O módulo resiliente é dado pela relação entre a tensão desviadora, aplicada repetidamente em uma amostra de solo e a correspondente deformação vertical recuperável ou resiliente ϵ_r , conforme equação 5.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (5)$$

A norma 134 (DNIT, 2018), especifica a realização da fase de condicionamento seguida pela aplicação da sequência de tensões apresentadas na Tabela 27 para determinação do módulo de resiliência.

Foram realizados ensaios com corpos de prova do solo e da mistura 3:1, compactados no ponto ótimo da energia normal, por umedecimento, em cilindro de dimensões 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Os espécimes foram envolvidos em plástico PVC, identificados e armazenados por 24 horas, com o objetivo de garantir homogeneização da umidade. Na Figura 49 está apresentada uma imagem do equipamento utilizado no ensaio.

Tabela 27 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência.

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_1/σ_3	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_1/σ_3
0,020	0,020	2	0,070	0,070	2
	0,040	3		0,140	3
	0,060	4		0,210	4
0,035	0,035	2	0,105	0,105	2
	0,070	3		0,210	3
	0,105	4		0,315	4
0,050	0,050	2	0,140	0,140	2
	0,100	3		0,280	3
	0,150	4		0,420	4

Nota: σ_3 = Tensão principal menor; σ_1 = Tensão principal maior; σ_d = Tensão desviadora.

Fonte: Norma 134 (DNIT, 2018).

Figura 49 – Equipamento utilizado no ensaio do Módulo de Resiliência.

Fonte: A autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Físico, Química e Mineralógica do LETA Taiaçupeba

Os resultados da caracterização mineralógica por DRX do LETA Taiaçupeba indicaram uma matriz amorfa com possível presença de fase cristalina composta por quartzo (SiO_2), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Conforme discutido no Item 3.3.1, a presença de material amorfo foi relatada por diversos autores, sendo constituído majoritariamente por compostos húmicos e óxidos e hidróxidos de alumínio e/ou ferro não-cristalinos. No LETA Taiaçupeba, a fase amorfa pode ser atribuída ao elevado teor de matéria orgânica (Tabelas 28 e 29), aos óxidos e hidróxidos metálicos não-cristalinos advindos do coagulante – provavelmente hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e óxido de alumínio (Al_2O_3) – e ao polímero adicionado na ETA. Na Figura 50, apresentam-se: o difratograma, com presença de bandas largas com baixas intensidades, e as linhas de difração, correspondentes às fases cristalinas identificadas.

Figura 50 – Difratograma de Raios-X do LETA Taiaçupeba: A) Difratograma; B) Fases cristalinas identificadas.

Fonte: LCT-EPUSP.

Após oxidação da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio, os resultados indicaram uma matriz amorfa com possível presença de fase cristalina composta por gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). O difratograma e as fases cristalinas identificadas estão apresentados na Figura 51.

Figura 51 – Difratograma de Raios-X do LETA Taiáçupeba após tratamento com H_2O_2 : A) Difratograma; B) Fases cristalinas identificadas.

Fonte: LCT-EPUSP.

As micrografias obtidas pela MEV estão apresentadas na Figura 52 e as micrografias obtidas pela MEV do LETA Taiaçupeba após oxidação da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio estão apresentadas na Figura 53. Na Figura 52A é possível distinguir partículas aproximadamente cúbicas, que podem ser grãos de quartzo, devido ao seu tamanho. De acordo com as análises do LETA Taiaçupeba de Muchimbane (2016), as estruturas presentes nas Figuras 52E e 53B se tratam de espécies de diatomáceas, componentes de fitoplanctons de lagos, lagoas e rios eutróficos, denominadas *Aulacoseira ambígua*. De acordo com o autor, a superfície das frústulas diatomáceas é escamosa com orifícios retangulares visíveis formando um padrão colmeia, que confere ao material uma elevada propriedade filtrante. Na Figura 52D apresenta-se uma estrutura com padrão, provavelmente um fragmento de polímero. Nas Figuras 52B e 52F, observa-se materiais sem forma distinta, provavelmente componentes da matriz amorfa citada. Na Figura 53A, o microagregado é semelhante aos encontrados em solos laterizados, formados por partículas de caulinita cimentadas por óxidos de ferro.

Figura 52 – Micrografias do LETA Taiaçupeba com aumentos: A) 3.000x; B) 100.000x; C) 12.000x; D) 20.000x; E) 14.000x; F) 120.000x.

Fonte: LCT-EPUSP.

Figura 53 – Micrografias do LETA Taiaçupeba após oxidação da matéria orgânica com aumentos: A) 2.000x; B)10.000x; C)8.000x; D)10.000.

Fonte: LCT-EPUSP

Os resultados das análises químicas realizadas nos pontos indicados na Figura 52E estão apresentadas na Figura 54, na qual observa-se a presença de Si, Al, Fe e Pt (Platina). Os três primeiros estão condizentes com os resultados da FRX e DRX. A origem da platina nas amostras poderia ser explicada por alguma contaminação da Represa Taiaçupeba, uma vez que existem diversas indústrias químicas em sua proximidade (automobilísticas, químicas, de papel, dentre outras). Outra explicação seria a localização da represa em um local de grande fluxo de veículos. Ribeiro et al. (2009), relacionaram a presença de platina em solos da cidade de São Paulo ao desgaste dos catalisadores automotivos e consequente diminuição da eficiência no controle da emissão de gases tóxicos produzidos durante a combustão da gasolina.

Em outras análises pontuais realizadas em outras micrografias, também foram identificados Mg, K, Cl, Na, O e Ca. O Cálcio e o Cloro podem estar relacionados ao processo de tratamento da água na ETA, sendo o Cal (CaO) utilizado para correção

do pH e o Cl utilizado para oxidação e desinfecção da água. Os demais componentes possivelmente se relacionam à composição da água bruta e à poluição.

Figura 54 – Espectro de análise química pontual (EDS) da Figura 52E (LETA Taiapuêba): A) Região A; B) Região B.

Fonte: LCT-EPUSP.

Os resultados das análises químicas realizadas nos pontos indicados na Figura 53B estão apresentadas na Figura 55, na qual observa-se a presença de Si, Al, Fe, Pt, S, O, C. Da mesma forma, os três primeiros estão condizentes com os resultados da FRX e DRX. O carbono pode estar relacionado à alguma composição orgânica remanescente e a platina e o enxofre à alguma contaminação da Represa Taiapuêba por resíduos industriais. Em outras análises pontuais realizadas em outras micrografias, também se identificou o Ca, que pode estar relacionado a adição de Cal (CaO) na ETA, como citado anteriormente.

Figura 55– Espectro de análise química pontual (EDS) da Figura 53B (LETA Taiapuêba após oxidação da matéria orgânica): A) Região A; B) Região B; C) Região C.

Os resultados da análise química semiquantitativa por FRX do LETA Taiacupeba antes e após oxidação da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados da FRX do LETA Taiacupeba antes e após tratamento com H₂O₂.

Parâmetro	Antes (%)	Após (%)	Parâmetro	Antes (%)	Após (%)
Al ₂ O ₃	29,6	37,4	Na ₂ O	< 0,10	0,13
Fe ₂ O ₃	12,3	16,7	K ₂ O	< 0,10	0,19
SiO ₂	4,87	4,39	TiO ₂	0,17	0,26
MnO	0,32	0,23	P ₂ O ₅	0,45	0,78
MgO	< 0,10	0,16	PF	52,60	39,1
CaO	0,49	0,57			

Fonte: LCT-EPUSP.

Comparando-se os resultados da FRX do LETA Taiacupeba neste trabalho com os apresentados nas Tabelas 1 e 2, observa-se que eles estão de acordo com as referências. Para o mesmo LETA, observa-se uma alta compatibilidade com duas das amostras analisadas por Muchimbane (2016).

Comparando-se com os valores compilados nas Tabelas 1 e 2, o teor de Al₂O₃ (29,6%) se encontra dentro da faixa de valores exposta, de 8,60% a 31,71%, assim como o teor de Fe₂O₃ (12,3%), entre 4,05% e 73,00% e o teor de SiO₂ (4,87%), de 7,41% a 74,62%. Os valores do LETA Taiacupeba também se enquadram nos limites determinados por Babatunde & Zhao (2007) para lodos provenientes de ETAs que coagulam com sais de alumínio, com teor de alumínio de 29,7% ± 13,3%, teor de ferro de 10,2% ± 12,0% e teor de SiO₂ de 33,4% ± 26,2%. Outros óxidos analisados como MnO (0,32%), MgO (< 0,10%), CaO (0,49%), Na₂O (< 0,10%), K₂O (< 0,10%), TiO₂ (0,17%), P₂O₅ (0,45%) apresentaram baixos percentuais, e estão de acordo a literatura. Conforme citado no Item 3.3.1, os teores de Al₂O₃, Fe₂O₃ e SiO₂ se relacionam a presença de minerais como a caulinita, a gibbsita e o quartzo. O Al₂O₃ também se relaciona aos óxidos e hidróxidos advindos da reação do coagulante SFA com a água (ROQUE, MONTALVAN & BOSCOV, 2019).

A perda ao fogo se dá devido à volatilização de água adsorvida e decomposição de compostos, como carbonatos, hidroxilas e matéria orgânica durante a queima. Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentados diversos valores de PF de LETAs, variando entre

7,41% e 57,73%, com grande maioria superior a 20,4%. As perdas ao fogo antes (52,6%) e após oxidação com peróxido de hidrogênio (39,1%) estão nessa faixa. O tratamento com o peróxido reduziu a perda ao fogo, indicando retirada de 13,5% de massa do lodo.

Os resultados de outras análises químicas estão listados na Tabela 29. O $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ e pH_{KCl} foram de 6,4 e 5,6, respectivamente, indicando acidez do material. Muchimbane (2016) encontrou valores semelhantes para o mesmo lodo. Nas três amostras analisadas por ele, o valor médio do $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ foi de 6,6 e do pH_{KCl} de 6,3. Outros autores, analisando outros lodos, também obtiveram valores de pH próximos ao neutro (Figura 7). Conforme discutido, valores de pH próximos ao neutro, em condições favoráveis de nutrientes, temperatura e água, favorecem a biodegradação e podem diminuir a solubilização de componentes. O parâmetro ΔpH (-0,8) indicou a predominância de cargas negativas.

Tabela 29 – Resultados de análises químicas do LETA Taiaçupeba.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
pH (em H_2O)	6,4	$\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ (mmol.c.kg^{-1})	20,0
pH (em solução de KCl 1 mol.L^{-1})	5,6	Soma de bases trocáveis (mmol.c.kg^{-1})	53,3
P (mg.kg^{-1})	4,2	CTC (mmol.c.kg^{-1})	73,3
K (mmol.c.kg^{-1})	2,5	Saturação da CTC por bases	73
Ca (mmol.c.kg^{-1})	32	Saturação por alumínio (%)	2
Mg (mmol.c.kg^{-1})	4,0	Matéria orgânica (g.kg^{-1})	267,0
Al (mmol.c.kg^{-1})	1,0	Carbono orgânico (g.kg^{-1})	155,0
Na (mmol.c.kg^{-1})	14,8		

Fonte: LSO-ESALQ.

O teor de matéria orgânica (26,7%) foi expressivo. Os trabalhos referenciados no Item 3.3.3 apresentam teores entre 0,39% e 68,90%. O LETA Taiaçupeba, que resulta do tratamento de água de reservatório e se enquadra na afirmativa de Hsieh & Raghu (1997), de que lodos advindos de ETAs que tratam água bruta de reservatórios ou lagoas apresentam elevadas concentrações de sólidos orgânicos, entre 14 a 63%, e baixas concentrações de inorgânicos. O LETA também se enquadra na faixa apresentada por Richter (2001), de 20 a 35%.

Segundo O'Kelly (2016), o método mais confiável para determinação do teor de matéria orgânica é o de Walkley e Black (BSI, 1990), que emprega oxidação com dicromato, fornecendo o teor de carbono orgânico. Para o LETA Taiaçupeba, esse valor é 15,5%, enquanto na bibliografia varia de 0,55% a 14,90%. O resultado obtido é muito próximo da diferença entre as perdas ao fogo antes (52,6%) e após (39,1%) oxidação da matéria orgânica, de 13,5%, indicando que, de fato, apenas a parcela proveniente de materiais orgânicos facilmente oxidáveis ou decomponíveis foi oxidada.

A CTC do LETA Taiaçupeba foi de 73,3 mmolc.kg⁻¹ (ou 7,33 cmol.kg⁻¹), valor baixo se comparado à literatura apresentada ao longo desse texto. Entretanto, o valor obtido por Cabral (2013), de 69,3 mmolc.kg⁻¹, foi bastante próximo. A soma de bases trocáveis (53,3 mmolc.kg⁻¹) representou 72,7% da CTC, enquanto a acidez potencial (H⁺+Al³⁺) foi responsável pelo restante.

5.2 Caracterização Físico, Química e Mineralógica do Solo

Esta caracterização foi efetuada por Zanon (2014) e se encontra apresentada no Item 3.4.1.

5.3 Caracterização Ambiental do LETA Taiaçupeba

Na Tabela 30 estão apresentados os resultados do ensaio de lixiviação do LETA Taiaçupeba. Todos os teores de constituintes lixiviados analisados se apresentaram dentro dos limites estabelecidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004 a). Nos ensaios de solubilização, os constituintes manganês e fenóis se apresentaram acima dos limites estabelecidos pela norma. Com isso, o LETA se classifica como resíduo Classe II-A (não perigoso e não inerte), conforme apresentado na revisão bibliográfica (item 3.3.2). Com base nessa informação, a segurança ambiental da utilização do lodo em substituição a materiais inertes deve ser mais bem investigada para cada tipo de aplicação.

Tabela 30 – Teor de constituintes lixiviados.

Parâmetros			Teor (mg/L)	Limite de Quantificação (mg/L)	NBR 10.004 (mg/L)
Constituinte	Símbolo	Unidade			
Prata	Ag	mg/L	N.D.	0,025	5,0
Arsênio	As	mg/L	N.D.	0,025	1,0
Bário	Ba	mg/L	0,424	0,010	70,0
Cádmio	Cd	mg/L	N.D.	0,003	0,5
Cromo	Cr	mg/L	N.D.	0,010	5,0
Chumbo	Pb	mg/L	N.D.	0,010	1,0
Selênio	Se	mg/L	N.D.	0,025	1,0
Mercúrio	Hg	mg/L	N.D.	0,0008	0,1
Fluoreto	F ⁻	mg/L	0,55	0,600	150,0
pH	-	-	5,30	-	-

Nota: N.D. = Não detectado.

Fonte: ABCP Lab.

Na Tabela 31 estão apresentados os resultados do ensaio de solubilização do LETA Taiaçupeba.

Tabela 31: Teor de constituintes solubilizados.

Parâmetros			Teor (mg/L)	Limite de Quantificação (mg/L)	NBR 10.004 (mg/L)
Constituinte	Símbolo	Unidade			
Prata	Ag	mg/L	N.D.	0,025	0,05
Alumínio	Al	mg/L	0,025	0,010	0,20
Arsênio	As	mg/L	N.D.	0,008	0,01
Bário	Ba	mg/L	0,247	0,010	0,70
Cádmio	Cd	mg/L	N.D.	0,003	0,005
Cromo	Cr	mg/L	N.D.	0,010	0,05
Cobre	Cu	mg/L	N.D.	0,010	2,00
Ferro	Fe	mg/L	0,012	0,010	0,3
Manganês	Mn	mg/L	3,948	0,005	0,10
Chumbo	Pb	mg/L	N.D.	0,007	0,01
Selênio	Se	mg/L	N.D.	0,008	0,01
Zinco	Zn	mg/L	0,008	0,003	5,0
Mercúrio	Hg	mg/L	N.D.	0,0008	0,001
Sódio	Na	mg/L	39,445	0,060	200,00
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	mg/L	75,117	4,0	250,00
Nitratos	N	Mg/L	6,73	1,5	10,00

Parâmetros			Teor (mg/L)	Limite de Quantificação (mg/L)	NBR 10.004 (mg/L)
Constituinte	Símbolo	Unidade			
Cloretos	Cl ⁻	mg/L	193,312	0,5	250,00
Fluoretos	F ⁻	mg/L	N.D.	0,6	1,50
Cianetos	CN ⁻	mg/L	N.D.	0,05	0,07
Fenóis	-	mg/L	0,0189	0,005	0,01
pH	-	-	6,99	-	-

Nota: N.D. = Não detectado; em negrito, componentes com concentrações acima dos limites máximos da NBR 10.004 (ABNT 2004a).

Fonte: ABCP Lab.

A concentração de manganês no extrato solubilizado foi 3,95 mg.L⁻¹, enquanto o limite máximo era 0,10 mg.L⁻¹. A presença do manganês foi discutida por Godoy et al. (2019), que a relacionaram à composição do solo do Rio Itajaí-Açú (Brasil), onde foi coletada a água bruta, e aos resíduos químicos de processos industriais lançados no rio.

A concentração de fenol no extrato solubilizado, de 0,019 mg/L, ultrapassa ligeiramente o limite preconizado pela norma, de 0,01 mg/L. A presença desse componente no LETA pode estar relacionada ao lançamento de resíduos industriais e domésticos, bem como à decomposição de vegetação. De acordo com a CETESB (s.d):

Fenóis e seus derivados, como clorofenóis e compostos aromáticos relacionados, são substâncias de origem industrial, conhecidos devido a sua elevada toxicidade e por serem compostos comuns em efluentes industriais, oriundos das atividades de produção de: plásticos, corantes, tintas, drogas, antioxidantes, polímeros sintéticos, resinas, pesticidas, detergentes, desinfetantes, refinaria de óleo e principalmente de papel e celulose, além de mineração do carvão ou mesmo despejos domésticos.
CETESB (s.d.)

Em consonância, Cavalcante (2016) afirma que o fenol e seus derivados são poluentes orgânicos comuns existentes nas águas residuais de diversos segmentos industriais, tais como papel e celulose, pesticidas, corantes, indústrias de transformação de produtos químicos, fabricação de resinas, gás, têxtil, plástico, borracha, farmacêutica, petróleo, dentre outros. Ainda, os fenóis também estão presentes em diferentes efluentes domésticos e vegetação deteriorada. O autor destaca a toxicidade do componente para a vida humana e animal, mesmo em baixas concentrações, sendo essencial sua remoção.

Os valores de pH obtidos em ambos os ensaios, 5,30 e 6,99, se assemelham aos valores de pH (em solução de KCl), 5,60, e pH (em H₂O), 6,4, obtidos nas análises químicas apresentadas na Tabela 29.

5.4 Caracterização Geotécnica do Solo, do Lodo e das Misturas

Na Tabela 32 estão apresentados os resultados da caracterização geotécnica dos materiais. Além deles, o teor de matéria orgânica do LETA foi 49,0%.

Tabela 32 – Caracterização geotécnica do LETA, solo e misturas.

Parâmetros	LETA Taiaçupeba	Solo	Mistura 5:1	Mistura 4:1	Mistura 3:1
Teor de umidade (%)	495,8 ± 19,9	~1,0	17,2	21,1	27,5
Massa específica dos grãos (g.cm ⁻³)	2,42	2,80	2,72	2,70	2,68
Limite de liquidez (%)	536	24	39	44	52
Limite de plasticidade (%)	236	18	22	25	29
Índice de plasticidade (%)	300	7	18	19	23
Classificação SUCS	OH	SC	SC	SC	SM

Nota: SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos; OH – silte orgânico; SC – areia argilosa; SM – areia siltosa.

Fonte: A autora.

5.4.1 Caracterização Geotécnica do LETA Taiaçupeba

A Figura 56 apresenta os teores de umidade das 20 amostras coletadas diariamente. É possível observar que houve variação considerável, tanto entre amostras de diferentes dias de coleta, quanto numa mesma amostra, mesmo após homogeneização. Os teores de umidade mínimo, médio e máximo foram de 456,3, 495,8 (teor de sólidos 16,8%) e 529,6%, respectivamente. O desvio padrão foi de 19,9% e o coeficiente de variação, de 4,0%.

A massa específica dos sólidos, 2,42 g.cm⁻³, é menor que a de solos em geral e comum em solos orgânicos (HUAT, ASADI & KAZEMIAN, 2009). Este valor está dentro da faixa encontrada por Vandermeiden & Cornwell (1998), 2,05 a 2,94 g.cm⁻³ (Tabelas 8 a 10) e Watanabe et al. (2011), 2,40 a 2,61 g.cm⁻³ (Tabela 13) e pouco acima da faixa encontrada por Hsieh & Raghu (1997), 1,87 a 2,30 g.cm⁻³.

Conforme afirmado por Xia (1994), nos LETAs, um elevado teor de matéria orgânica tende a diminuir a massa específica. O teor de matéria orgânica obtido por queima a 440°C foi de 49,0%, valor próximo ao obtido no ensaio de perda ao fogo à 1020°C, de 52,6% (Tabela 28).

Fonte: A autora.

Os resultados dos três ensaios de limite de liquidez estão apresentados na Figura 57. Foi obtido LL de 536%, entretanto, pode-se observar que foi baixo o coeficiente de determinação (R^2) do ajuste linear aos resultados de teor de umidade em função do logaritmo dos números de golpe, associado à grande variabilidade do material. O limite de plasticidade obtido pelas três repetições do ensaio foi de 236%. Consequentemente, o índice de plasticidade foi de 300%. Os LETAs geralmente apresentam LL e IP altos como os valores obtidos. O'Kelly (2016) reportou para LETAS de SFA, LL entre 108% e 550% e IP entre 26% e 311%; Watanabe et al. (2011) reportou LL de 83% a 420% e IP de 47% a 325%; Basim (1999) reportou valores de LL entre 280 e 425% e IP entre 82 e 225%;

Ao se realizar novamente o ensaio de LL após secagem em estufa a 110 °C, o LETA Taiaçupeba se comportou como não-plástico. Como diversos autores discutiram, os LETAs, quando sujeitos a temperaturas elevadas, perdem a afinidade com a água, provocando redução drástica em suas plasticidades.

Figura 57 – Limites de Liquidez do LETA Taiaçupeba.

Fonte: A autora.

Como a totalidade do material passou na peneira N° 4 (4,75 mm de abertura), a análise granulométrica foi obtida por sedimentação e peneiramento do material lavado e retido na peneira N° 200 (0,074 mm de abertura) após o ensaio de sedimentação. Porém, os sólidos não sedimentaram durante o ensaio. Suspeitou-se da eficiência do defloculante hexametáfosfato de sódio na neutralização do efeito dos coagulantes e polímeros utilizados no processo de tratamento da água, como retratado por Hsieh & Raghu (1997).

Na Figura 58 (A a E) estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados com diferentes defloculantes, enquanto na Figura 58F estão apresentadas as distribuições granulométricas obtidas por laser do LETA *in natura*, seco ao ar e com oxidação da matéria orgânica e seca a 60 °C.

Figura 58 – Distribuições granulométricas do LETA Taiaçupeba: A) sem o uso de defloculante; B) uso de hexametáfosfato de sódio; C) uso de fosfato trissódico; D) uso de pirofosfato de sódio; E) uso de tripolifosfato de sódio; F) granulometria por laser.

Fonte: A autora.

Todas as tentativas de realizar a análise granulométrica conforme a NBR 7.181 (ABNT, 2017) foram frustradas, não sendo possível obter resultados coerentes com as bases teóricas do ensaio. O lodo não sedimentou e a densidade da suspensão não

diminuiu com o tempo, havendo algumas situações, inclusive, em que o densímetro acusou aumento da densidade da suspensão. Em todas as repetições ocorreu uma grande formação de espuma após a agitação do material em solução de defloculante no dispersor, conforme pode ser observado na Figura 59. Foi necessário lavar abundantemente a espuma com o auxílio de uma pisseta com água destilada, intercalando intervalos de alguns minutos para que a espuma pudesse se assentar antes do início do ensaio e até atingir a marca de 1000 mL das provetas, conforme preconizado nas normas.

Figura 59 – A) Solução com 40g de lodo + fosfato trissódico 4%; B) Solução com 10g de lodo + hexametáfosfato de sódio 9,14%.

Fonte: A autora

Como não foi possível obter a distribuição granulométrica do LETA Taiaçupeba pelo ensaio de sedimentação e como praticamente todo o material passa na peneira Nº 200 (0,074 mm de abertura) quando lavado, utilizou-se a carta de plasticidade para sua classificação (ASTM, 2017). O LETA Taiaçupeba, localizado abaixo da linha A com LL maior que 50%, foi classificado como silte. A separação entre materiais orgânicos e inorgânicos é baseada nas alterações causadas pela secagem a 110 °C: o material é classificado como silte orgânico quando a repetição do ensaio de limite de liquidez após secagem é inferior a 75% do limite de liquidez antes da secagem.

Como o LETA se tornou não plástico após secagem, foi classificado como OH (silte orgânico).

No caso dos resultados obtidos por laser, analisando-se a curva obtida para o LETA *in natura* e os valores do LL e LP, o material classifica-se também como OH.

Para o LETA seco ao ar e com oxidação da matéria orgânica e seco a 60°C, com a redução da matéria orgânica e por tornar-se não plástico com a secagem, a classificação mais adequada para essas condições seria ML (silte elástico).

5.4.2 Caracterização Geotécnica da Areia Argilosa Laterítica de Botucatu

A massa específica dos sólidos obtida foi de $2,80 \text{ g.cm}^{-3}$, superior aos valores encontrados por Montalvan (2016) e Zanon (2014) de, respectivamente, $2,690 \text{ g.cm}^{-3}$ e $2,685 \text{ g.cm}^{-3}$, e um pouco elevada em relação a solos em geral ($2,65 - 2,70 \text{ g.cm}^{-3}$). As diferenças são possivelmente devidas a variações experimentais, particularmente relacionadas à eficiência do sistema de vácuo.

O limite de liquidez (LL) foi de 24%, o limite de plasticidade (LP) foi de 18%, resultando no índice de plasticidade (IP) de 6%. Montalvan (2016) e Zanon (2014) encontraram para o LL, respectivamente, 25% e 26%, e para o IP, 13% e 10%.

Como a totalidade do material passou na peneira Nº 4 (4,75 mm de abertura), a análise granulométrica foi obtida por sedimentação e peneiramento do material lavado e retido na peneira Nº 200 (0,074 mm de abertura) após o ensaio de sedimentação. De acordo com o SUCS (ASTM, 2017 a), as frações foram: 0% de pedregulho e areia grossa, 10% de areia média, 54% de areia fina, 9% de silte e 27% de argila. A distribuição granulométrica obtida e os limites de consistência, levam à classificação como SC (areia argilosa). Montalvan (2016) e Zanon (2014) obtiveram a mesma classificação com frações bastante próximas. Para o primeiro: 2,4 % de areia grossa, 45,5% de areia média, 24,3% de areia fina, 4,1% de silte, e 23,8% de argila, enquanto para o segundo: 28% de areia média, 60% de areia fina, 4% de silte e 8% de argila.

A distribuição granulométrica do solo obtida neste trabalho e a obtida por Montalvan (2016) estão apresentadas na Figura 60. Conforme pode ser observado, as curvas são coincidentes para diâmetros acima de 0,075 mm (obtidos por peneiramento) e apresentam cerca de 5% de diferença nas frações silte e argila (obtidas por sedimentação). Esta diferença pode ser explicada pela alta massa

específica dos sólidos obtida neste trabalho em relação à de Montalvan (2016), uma vez que a presença de metais em solos laterizados, principalmente o ferro, contribuem majoritariamente com a fração fina do solo.

Figura 60 – Distribuição granulométrica da areia argilosa lateríticade Botucatu.

Fonte: Montalvan (2016) adaptado.

5.4.3 Caracterização Geotécnica das Misturas

Como o lodo possui um alto teor de umidade, o aumento do teor de lodo leva ao aumento do teor de umidade das misturas. Os resultados foram iguais a 17,2%, 21,1% e 27,5%, para, respectivamente, as misturas 5:1, 4:1 e 3:1.

Como o lodo possui baixa massa específica dos sólidos, a adição de lodo provoca a redução progressiva da massa específica das misturas. Os valores obtidos foram: 2,80 g.cm⁻³ para o solo, 2,72 g.cm⁻³ para a mistura 5:1, 2,70 g.cm⁻³ para a mistura 4:1 e 2,68 g.cm⁻³ para a mistura 3:1.

Como o lodo possui elevados LL e LP, o incremento do lodo tende a aumentar os limites de consistência do solo (LL=24% e LP=18%). Os valores de LL foram de

39%, 44% e 52%, os valores de LP foram de 22%, 25% e 29% e os valores de IP foram 18%, 19% e 23%, para, respectivamente, as misturas 5:1, 4:1 e 3:1.

A adição de lodo no solo alterou pouco sua distribuição granulométrica, uma vez que o teor de sólidos do LETA representou um incremento muito pequeno no total das misturas. Mesmo na mistura 3:1, o incremento do teor de sólidos foi menor que 6%. As curvas granulométricas do solo e das misturas estão apresentadas na Figura 61, e a localização dos materiais na Carta de Plasticidade está na Figura 62, onde é possível observar o aumento progressivo da plasticidade com o aumento do teor de lodo. As classificações das misturas 5:1 e 4:1 se mantêm como a do solo, SC. Para a mistura 3:1, no entanto, os finos se classificam como MH-OH, alterando a classificação da mistura para SM (areia siltosa).

Figura 61 – Curvas granulométricas do solo e das misturas.

Fonte: A autora.

Figura 62 – Carta de Plasticidade – Solo e misturas.

Fonte: A autora.

5.5 Ensaios Geotécnicos com o Solo e as Misturas

5.5.1 Compactação

Os resultados dos dois ensaios de compactação por umedecimento do solo realizados no escopo desta pesquisa e os resultados obtidos Montalvan (2016) para o mesmo solo estão apresentadas na Figura 63. Pode-se observar que a $\rho_{d,máx.}$ obtida pelo autor ($1,92 \text{ g.cm}^{-3}$) é um pouco superior à deste trabalho ($1,90 \text{ g.cm}^{-3}$), enquanto a $w_{ót.}$ é menor (12,4% e 13,8%, respetivamente). Ou seja, o autor obteve um corpo de prova um pouco mais compacto com a mesma energia. Explicações aplicáveis são: porções de solo utilizadas com granulometrias ligeiramente diferentes, variações experimentais e ajustes diferentes das curvas. Averigua-se pela Figura 63 que alguns pontos obtidos praticamente se igualaram ao ponto ótimo do autor.

Figura 63 – Ensaios de compactação do solo.

Fonte: A autora e Montalvan (2016).

As curvas de compactação do solo e das misturas estão apresentadas na Figura 64. O teor de umidade da mistura 3:1 encontrava-se acima do $w_{\text{ót.}}$, não sendo possível, portanto, obter os pontos do ramo seco, nem os parâmetros ótimos de compactação. Observa-se o aumento do teor de umidade ótimo e a redução da massa específica aparente seca máxima com o aumento do teor de lodo.

Figura 64 – Curvas de compactação do solo e das misturas.

Fonte: A autora.

As Figuras 65 a 67 apresentam curvas de compactação por secagem das misturas, obtidas com o teor de umidade inicial e três graus de secagem. A Tabela 33 apresenta a síntese dos parâmetros ótimos. Os ramos úmidos tendem ao alinhamento entre as linhas de saturação 85% e 100%.

O aumento do GS provoca nas misturas o comportamento inverso ao incremento de lodo, levando ao aumento da massa específica aparente seca e à redução do teor de umidade ótimo. Com GS superiores a 80%, a secagem prévia possibilita uma melhoria dos parâmetros de compactação ótimos das misturas, aproximando-os dos do solo.

Figura 65 – Curvas de compactação da mistura 5:1 obtidas em três graus de secagem.

Fonte: A autora.

Figura 66 – Curvas de compactação da mistura 4:1 obtidas em três graus de secagem.

Fonte: A autora.

Figura 67 – Curvas de compactação da mistura 3:1 obtidas em três graus de secagem.

Fonte: A autora.

Tabela 33 – Parâmetros ótimos das compactações por secagem das misturas.

Mistura 5:1			Mistura 4:1			Mistura 3:1		
GS (%)	W _{ót.} (%)	ρ _{d,máx.} (g.cm-3)	GS (%)	W _{ót.} (%)	ρ _{d,máx.} (g.cm-3)	GS (%)	W _{ót.} (%)	ρ _{d,máx.} (g.cm-3)
0	20,7	1,650	0	22,8	1,605	0	-	-
29,8	18,6	1,705	19,4	21,3	1,635	34,5	21,3	1,620
59,2	17,3	1,765	45,4	17,0	1,750	59,7	18,9	1,690
80,7	15,7	1,790	74,7	16,6	1,765	77,8	17,1	1,730

Nota: GS = Grau de secagem; W_{ót.} = teor de umidade ótimo; ρ_{d,máx.} = massa específica aparente seca máxima.

Fonte: A autora.

As variações nos parâmetros ótimos de compactação foram analisadas de acordo com o grau de secagem (Figuras 68 e 69). Houve redução do w_{ót.} e aumento do ρ_{d,máx.} com a secagem.

Figura 68 – Efeito da secagem: teor de umidade ótimo em função do teor de umidade inicial.

Fonte: A autora.

Figura 69 – Efeito da secagem: massa específica seca máxima em função do teor de umidade inicial.

Fonte: A autora.

Na Figura 70 foi feito um ajuste linear entre os pontos ótimos das amostras com secagem prévia da mistura 3:1, que apresentou coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9995. A linha do ajuste linear praticamente se encontra com o primeiro ponto da curva de compactação sem secagem prévia, indicando que a umidade de mistura está muito próxima da umidade ótima. Portanto, nos ensaios seguintes (adensamento, resistência e permeabilidade) os corpos de prova da mistura 3:1 foram compactados na própria umidade da mistura ($w = 27,0\%$ e $\rho_d = 1,47 \text{ g.cm}^{-3}$).

Figura 70 – Ajuste linear dos pontos ótimos da mistura 3:1 sem e com três graus de secagem prévia.

Fonte: A autora.

Como determinou-se que os ensaios de adensamento, resistência ao cisalhamento, permeabilidade e resiliência seriam realizados com amostras compactadas no ponto ótimo, analisou-se, ao final, os resultados de grau de compactação e desvio de umidade de todos os corpos de prova. Os dados estão apresentados em gráficos tipo caixa (Figuras 71 e 72). Apesar do controle de compactação no laboratório, houve variações significativas nos parâmetros de compactação, os quais, no geral, apresentaram desvios de umidade de $\pm 1\%$ e variações nos GC de $\pm 2\%$.

Figura 71 – Variação no parâmetro Teor de Umidade de Compactação.

Figura 72 – Variação no parâmetro Grau de Compactação.

5.5.2 Deformabilidade

Conforme discutido no Item 4.5.1, as misturas 5:1 e 4:1 foram compactadas na umidade ótima, enquanto a mistura 3:1 foi compactada na umidade de mistura, todas por umedecimento e sem secagem prévia. As umidades das misturas 5:1 e 4:1 foram 20,9% e 22,5% (desvios +0,2% e -0,3% da $w_{ót.}$), respectivamente; as massas específicas aparente secas foram 1,62 g.cm⁻³ e 1,57 g.cm⁻³, correspondentes a GC

98,0% e 97,6%, respectivamente. A mistura 3:1 foi compactada com umidade de 26,4% (desvio -0,6% da umidade de mistura) e com GC 99,2%.

Os resultados dos ensaios de adensamento unidimensional estão apresentados na Figura 73, na forma de índice de vazios em função da tensão vertical aplicada e de deformação axial em função da tensão vertical aplicada. Os índices compressão (C_c) e recompressão (C_r) correspondentes estão apresentados na Tabela 34. Os ensaios compreenderam carregamentos de compressão e expansão, não tendo sido aplicados carregamentos de recompressão. Os índices de recompressão (C_r) foram considerados iguais aos índices de expansão (C_s).

Tabela 34 - Índices de compressão e recompressão do solo e das misturas.

	Solo	Mistura 5:1	Mistura 4:1	Mistura 3:1
C_c	0,07	0,21	0,16	0,22
C_r	0,02	0,06	0,03	0,04

Fonte: A autora.

Figura 73 – Ensaios de adensamento do solo e das misturas: A) índice de vazios em função da tensão aplicada; B) deformação axial em função da tensão aplicada.

Fonte: A autora.

Conclui-se que as misturas compactadas são mais compressíveis que o solo compactado, apresentando C_c de 2,3 a 3,1 vezes a do solo. Entretanto, diferente do esperado, os C_c e C_r não foram crescentes com o incremento de lodo, ou seja, não houve muita diferença entre as três proporções.

Nas Figuras 74 e 75, assim como Wang et al. (1992), foram obtidas correlações entre o LL e o C_c e o LL e o C_r . Os coeficientes de determinação (R^2) mostram que não ocorreu um bom ajuste ao modelo linear generalizado. Entretanto, ao se excluir o ponto correspondente à mistura 5:1, os ajustes melhoram muito (0,9900 e 0,9973, respectivamente). Erros experimentais podem justificar o comportamento destoante desta mistura, como: problemas de calibração do equipamento, compactação imperfeita, deficiências na homogeneização do solo e/ou do lodo, deficiências na homogeneização da umidade, dentre outros. Para verificar se houve erros experimentais ou se ocorreu algum fenômeno não detectado na proporção 5:1, mais repetições deveriam ser feitas.

Figura 74 – Modelo linear generalizado C_c em função de LL - solo e misturas.

Fonte: A autora.

Figura 75 – Modelo linear generalizado C_r em função de LL - solo e misturas.

Fonte: A autora.

Na bibliografia, foram reportados valores de C_c para LETAs variando entre 0,1 e 6,69 e C_r variando entre 0,014 e 0,17 (O'KELLY, 2016; XIA, 1994; WANG et al., 1992). Montalvan (2016), estudando a deformabilidade de misturas nas mesmas proporções desta pesquisa, com o mesmo solo e um lodo diferente, obteve comportamentos semelhantes aos apresentados na Figura 73 e na Tabela 34: o C_c da mistura 3:1 foi o maior (0,19), seguido pelas misturas 5:1 (0,14) e 4:1 (0,13), respectivamente; o C_r da mistura 5:1 (0,03) foi maior, enquanto os das misturas 3:1 (0,02) e 4:1 (0,02) foram iguais. Por fim, para misturas de solo e lodo, nas proporções 37,5% e 62,5% em massa seca, respectivamente), Wang, Hull & Jao (1992) obtiveram C_c igual a 4,04.

A altura dos corpos-de-prova variou de forma aproximadamente linear com o logaritmo do tempo, indicando compressão secundária. Entretanto, nos dois últimos carregamentos, de 1280 e 2560 kPa, as curvas ganharam certa concavidade, como mostrado na Figura 76.

Figura 76 – Curvas altura do corpo de prova (cm) em função do tempo (min), dos carregamentos de 2560 kPa e 40 kPa da mistura 3:1.

Nota: O eixo da esquerda se refere ao carregamento de 2560 kPa e o da direita ao de 40 kPa.

Fonte: A autora.

O'Kelly (2016) e Xia (1994), afirmaram que, embora altamente compressíveis, os LETAs adensam lentamente, apresentando altos adensamentos secundários, devido à fina granulometria, alto teor de matéria orgânica e estrutura flocular, contendo volumes significativos de água intersticial. Ainda, segundo O'Kelly (2016), no caso dos LETAs de SFA soma-se o caráter eletrovalente do íon alumínio (Al^{3+}), com sua alta afinidade pela água em comparação com outros coagulantes e o fato de seus flocos serem geralmente maiores e mais compactos, tornando-os mais difíceis de desidratar.

Apesar do baixo teor de lodo utilizado nas misturas deste trabalho, pode-se concluir que ele influencia significativamente na deformabilidade. Entretanto, como foram utilizadas porcentagens muito baixas de lodo em massa seca (5,7%, 4,2% e 3,4%, nas misturas 3:1, 4:1 e 5:1, respectivamente), não é possível concluir sobre as diferenças de deformabilidade entre as misturas.

5.5.3 Resistência ao cisalhamento

Para os ensaios triaxiais, o solo foi compactado na umidade de 13,5%, com desvio de -0,3% em relação a $w_{ót.}$, e massa específica seca de $1,83 \text{ g.cm}^{-3}$ (grau de

compactação, GC = 96,5%). As misturas 5:1 e 4:1 foram compactadas na umidade ótima, enquanto a mistura 3:1 foi compactada na umidade de mistura, todas sem secagem prévia. Os teores de umidade das misturas 5:1 e 4:1 foram 21,3% e 22,0%, correspondentes a desvios de +0,6% e -0,8% da $w_{ót.}$, respectivamente; as massas específicas aparente secas foram 1,61 g.cm⁻³ e 1,55 g.cm⁻³, correspondentes a GC de 97,7% e 96,5%, respectivamente. A mistura 3:1 foi compactada com umidade de 27,4%, equivalente a um desvio de +0,4% da umidade de mistura e com GC 99,8% ($\rho_d = 1,47$ g.cm⁻³).

Nos ensaios de compressão triaxial CIU foram obtidas as curvas tensão em função da deformação e pressão neutra em função da deformação para valores de tensão confinante (σ_3) de 50, 100 e 200 kPa. Também foram obtidas as trajetórias de tensões correspondentes, representadas por q em função de p' , conforme Equações 6 e 7:

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (6)$$

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (7)$$

Os parâmetros de resistência, ângulo de atrito efetivo (φ') e intercepto de coesão (c'), são definidos por meio dos parâmetros β e d , onde β é o ângulo formado pela reta da envoltória e o eixo horizontal (p'), e d é o intercepto com o eixo vertical (q), e são calculados a partir das Equações 8 e 9:

$$\sin \varphi' = \tan \beta \quad (8)$$

$$c' = \frac{d}{\cos \varphi'} \quad (9)$$

Nas Figuras 77 a 80 estão apresentadas as curvas tensão em função da deformação e pressão neutra em função da deformação do solo e das misturas 5:1, 4:1 e 3:1, respectivamente.

Figura 77 – Tensão em função da deformação e pressão neutra em função da deformação – Solo.

Fonte: A autora.

Figura 78 – Tensão em função da deformação e pressão neutra em função da deformação – Mistura 5:1.

Fonte: A autora.

Figura 79 – Tensão em função da deformação e pressão neutra em função da deformação – Mistura 4:1.

Fonte: A autora.

Figura 80 – Tensão em função da deformação e pressão neutra em função da deformação – Mistura 3:1.

Fonte: A autora.

O solo apresentou desenvolvimento de poropressões negativas para as tensões confinantes de 50 kPa e 100 kPa, devido à tendência de expansão volumétrica durante o cisalhamento, comportamento associado às areias compactas, argilas muito sobreadensadas e solos compactados. Para a tensão confinante de 200 kPa, o solo apresentou poropressões positivas, indicando tendência à compressão volumétrica durante o cisalhamento, embora não monotonicamente crescentes como é comportamento típico de areias fofas e argilas normalmente adensadas, indicando ainda certo sobreadensamento advindo da compactação. Com o aumento da tensão confinante ao longo dos ensaios, os corpos de prova foram apresentando menor razão de sobreadensamento.

Para as misturas, as poropressões aumentaram ligeiramente com o aumento do teor de lodo, principalmente para a tensão confinante de 50 kPa.

Essas tendências de comportamento podem ser observadas na Figura 81, onde se apresentam corpos de prova após rompimento e secagem em estufa do solo. O CP-1, submetido à tensão confinante de 50 kPa, apresentou pressão neutra negativa com maior tendência à expansão, indicando maior razão de sobreadensamento, que se expressou com uma superfície de ruptura bem marcada. Os demais corpos de prova foram gradualmente se tornando menos sobreadensados, culminando na pouca nitidez da superfície de ruptura e abaulamento no CP-3.

Figura 81 – Corpos de prova do solo após rompimento e secagem em estufa, sob as tensões confinantes indicadas.

Fonte: A autora.

A mistura 5:1 apresentou desenvolvimento de poropressões negativas para a tensão confinante de 50 kPa e poropressões positivas para as demais. As misturas 4:1 e 3:1 apresentaram apenas poropressões positivas, indicando tendência à compressão para todos os estados de tensão aos quais foram submetidas, sendo que na mistura 3:1 foram desenvolvidas maiores pressões neutras que a 4:1. Então, quando submetidas à uma mesma tensão confinante, teores crescentes de lodo nas misturas levaram ao desenvolvimento de pressões neutras também crescentes, indicando maiores tendências à compressão durante o cisalhamento e tornando-se progressivamente menos resistentes ao cisalhamento.

Nas Figuras 82 a 85 estão apresentadas as trajetórias de tensões do solo e das misturas.

Figura 82 – Trajetórias de tensões – Solo.

Fonte: A autora.

Figura 83 – Trajetórias de tensões – Mistura 5:1.

Fonte: A autora.

Figura 84 – Trajetórias de tensões – Mistura 4:1.

Fonte: A autora.

Figura 85 – Trajetórias de tensões – Mistura 3:1.

Fonte: A autora.

Pelas trajetórias de tensões, observa-se valores ligeiramente maiores de tensão desviadora para o solo do que para as misturas, ou seja, maior resistência para a mesma tensão confinante, o que pode ser explicado pela compactação, uma vez que o solo foi compactado com uma $p_{d,máx.}$ maior e um $w_{ót.}$ menor que as misturas (Item 5.5.1). No entanto, as tensões desviadoras das misturas para cada tensão confinante se apresentaram bastante próximas entre si.

A partir da observação da forma que se desenvolveram as trajetórias de tensões, sempre crescentes, tanto para o solo, quanto para as misturas, se conclui que, apesar das tendências de comportamento indicadas pelos gráficos da pressão neutra (Figura 77 a 80) e abordadas anteriormente, durante o cisalhamento, o que se observou foi um comportamento dilatante em todos os corpos de prova.

Na Tabela 35 estão apresentados os parâmetros φ' e c' obtidos, a partir dos quais não se observa relação de linearidade com o incremento de lodo.

Tabela 35 – Parâmetros de resistência do solo e das misturas.

	Solo	Mistura 5:1	Mistura 4:1	Mistura 3:1	Conjunto de Ensaio
φ'	33,7°	38,0°	35,0°	38,0°	37,0
c'	22,2	6,2	13,3	5,7	10,2

Fonte: A autora.

Na Figura 86 foi traçada uma única envoltória de resistência com todas as amostras, a qual, pelo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9971$), se observa um ótimo ajuste ao modelo linear generalizado. Foram obtidos parâmetros de resistência intermediários iguais a 37,0° e 10,2 kPa (Tabela 35), indicando pouca influência da adição de lodo nos parâmetros de resistência do solo. Entretanto, pode-se observar que as tensões desviadoras apresentaram redução com o incremento do teor de lodo.

Figura 86 – Envoltória de resistência única para solo e misturas.

Fonte: A autora.

Na bibliografia, foram reportados os seguintes valores de parâmetros de resistência de LETAs obtidos por ensaios de compressão triaxial (Tabela 15): ângulos de atrito entre 39° e 44° e interceptos de coesão efetivos entre 0 e 8 kPa. Também foram reportados os seguintes parâmetros de resistência obtidos por ensaios de cisalhamento direto (Tabelas 16 e 17): ângulos de atrito efetivo entre 3° e 45° e interceptos de coesão efetivos entre 2,2 e 106,8 kPa. Hsieh & Raghu (1997), em seus

estudos, concluíram que LETAs com teores de umidade mais altos ($> 100\%$) tenderam a apresentar ângulos de atrito e interceptos de coesão baixos, entre 2 e 11 kPa, enquanto LETAs com teores de umidade mais baixos ($< 100\%$) tenderam a apresentar ângulos de atrito e interceptos de coesão mais altos, entre 15 e 45 kPa.

Os resultados obtidos por Montalvan (2016) para misturas do mesmo solo com um lodo diferente, nas proporções desta pesquisa, apresentaram valores semelhantes, entretanto, os parâmetros guardaram relações de proporcionalidade com o incremento de lodo, tendo o ângulo de atrito aumentado (34° , 35° e 37°) e o intercepto de coesão diminuído (17, 15 e 10 kPa). O autor também comparou os resultados com os de diversos solos residuais utilizados na construção de barragens, concluindo que as misturas apresentaram resistência ligeiramente maior. Os parâmetros do solo obtidos, $\phi' = 34^\circ$ e $c' = 22$ kPa, foram iguais ao desta pesquisa.

Os corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) foram compactados com desvio de umidade máximo de $\pm 1,0\%$ e grau de compactação entre 98% e 102%. As curvas resultantes dos ensaios estão apresentadas na Figura 87.

Figura 87 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão simples.

Fonte: A autora.

Na Tabela 36 estão apresentados os valores máximos de tensão axial de cada corpo de prova, já corrigidos pela relação H/D, conforme sugerido pelos autores Güneyli e Rüßen (2016), e a deformação axial correspondente. Também está apresentado o tratamento estatístico dos dados, com a média, desvio-padrão e coeficiente de variação. Nas Figuras 88 e 89 estão apresentadas distribuições empíricas dos resultados em gráficos de caixa de tensão máxima (kPa) em função do teor de lodo em massa seca (%) e deformação na ruptura (%) em função do teor de lodo em massa seca (%).

Tabela 36 – Tensões axiais máximas e deformações correspondentes nos ensaios de compressão simples.

Amostra	Solo		5:1		4:1		3:1	
	Tensão (kPa)	Def. (%)	Tensão (kPa)	Def. (%)	Tensão (kPa)	Def. (%)	Tensão (kPa)	Def. (%)
CP-01	243	2,4	193	3,3	146	6,1	122	5,8
CP-02	243	2,6	204	3,4	157	6,0	123	6,3
CP-03	247	3,0	188	4,0	152	5,6	123	6,0
Média	244	2,7	195	3,6	151	5,9	123	6,0
Desvio-padrão	2,8	0,3	8,1	0,4	5,5	0,3	0,7	0,2
Coeficiente de variação	1,2	11,6	4,2	10,7	3,7	4,6	0,6	3,5

Fonte: A autora.

Figura 88 – RCS – Influência do teor de lodo nas tensões máximas.

Fonte: A autora.

Figura 89 – RCS – Influência do teor de lodo nas deformações.

Fonte: A autora.

É possível observar que o incremento de lodo provocou a redução das tensões axiais máximas (ou RCS) e o aumento das deformações na ruptura. Para as tensões máximas, os coeficientes de variação estiveram entre 1,2% e 4,2%, indicando baixa dispersão dos resultados, enquanto para as deformações, os coeficientes estiveram entre 3,5% e 11,6%, indicando uma maior dispersão.

5.5.4 Permeabilidade

Para os ensaios na célula Triaxial e no equipamento *Tri-Flex2*, o solo foi compactado nas umidades 13,4% e 13,3% com desvios de -0,4% e -0,5% em relação a $w_{ót.}$, respectivamente, e massas específicas secas de $1,84 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,87 \text{ g.cm}^{-3}$, correspondentes a graus de compactação 96,9% e 98,9%, respectivamente.

As condutividades hidráulicas referidas à temperatura de 20°C (k_{20}), resultantes dos ensaios sob tensão confinante 50 kPa e gradiente hidráulico 10, em permeâmetro de parede flexível estão sumarizadas na Tabela 37. As k_{20} foram obtidas buscando a constância dos valores nos gráficos (Figuras 90 a 93).

As misturas 5:1 e 4:1 ensaiadas no *Tri-Flex2* foram compactadas com teores de umidade 20,1% e 22,7% com desvios de -0,6% e -0,1% em relação a $w_{ót.}$, respectivamente, e massas específicas secas $1,60 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,56 \text{ g.cm}^{-3}$, correspondentes a graus de compactação 96,8% e 96,8%, respectivamente.

As misturas 5:1 e 3:1 ensaiadas na câmara triaxial foram compactadas com teores de umidade 22,4% (desvio -0,4% em relação a $w_{ót.}$) e 27,0% (sem desvio em relação a $w_{ót.}$), respectivamente, e massas específicas secas de 1,63 g.cm⁻³ e 1,51 g.cm⁻³, correspondentes a graus de compactação 98,7% e 103,9%, respectivamente. Os ensaios de permeabilidade com essas misturas, contudo, foram realizados durante a pandemia, após aproximadamente 8 meses de seu início. Durante esse período o LMS-EPUSP foi fechado e todos os equipamentos desligados, incluindo-se a câmara úmida que mantinha a umidade do LETA Taiaçupeba. Com isso, o material perdeu 252,7% de umidade. Conforme apresentado neste texto, a secagem altera as características dos LETAs, provocando perda definitiva da plasticidade e aglomeração das partículas (WATANABE et al., 2011; BASIM, 1999; XIA, 1994), o que interfere diretamente na permeabilidade. Não há, portanto, a possibilidade de estabelecer uma comparação com os demais ensaios de permeabilidade realizados. Os resultados estão apresentados nas Figuras 90 e 93, porém, não foram considerados confiáveis para serem reportados e não constam na Tabela 37.

Tabela 37: Condutividades hidráulicas do solo e das misturas.

	Solo	Mistura 5:1	Mistura 4:1	Mistura 3:1
Triaxial (m.s ⁻¹)	1,0x10 ⁻⁸	-	-	-
Tri-Flex2 (m.s ⁻¹)	4,0x10 ⁻¹⁰	8,0x10 ⁻¹⁰	3,5x10 ⁻⁹	-

Fonte: A autora.

Figura 90 – Condutividade hidráulica do solo.

Fonte: A autora.

Figura 91 – Condutividade hidráulica da Mistura 5:1.

Fonte: A autora.

Figura 92 – Condutividade hidráulica da Mistura 4:1.

Fonte: A autora.

Figura 93 – Condutividade hidráulica da Mistura 3:1.

Fonte: A autora.

A diferença entre os valores de condutividade hidráulica do solo obtidos pelos ensaios na célula Triaxial e no *Tri-Flex2* pode estar relacionada a diferenças na estrutura dos corpos de prova induzida pela compactação e pela diferença na saturação. Segundo Massad (2016), as estruturas floculadas – normalmente encontradas no ramo seco da curva de compactação – são mais permeáveis, apresentando coeficientes de permeabilidade de 10 a 10.000 vezes maiores do que os correspondentes valores para estruturas dispersas – normalmente encontradas no ramo úmido da curva de compactação. Ou seja, pequenas variações na estrutura dos corpos de prova, provenientes da compactação, podem levar a grandes variações na condutividade hidráulica. Ademais, no ensaio no *Tri-Flex2* não houve saturação por contrapressão, de modo que o grau de saturação e, portanto, a permeabilidade, tendem a ser menores dos que os obtidos no ensaio realizado no aparelho triaxial.

Para o mesmo solo e mesmo gradiente hidráulico, com tensões confinantes de 30 e 60 kPa, Montalvan (2016) obteve k_{20} $6,8 \times 10^{-6}$ e $3,9 \times 10^{-7}$ m.s⁻¹, respectivamente, enquanto Zanon (2014), sob gradiente 10, obteve k_{20} média $1,4 \times 10^{-6}$ m.s⁻¹. O gradiente hidráulico utilizado nos ensaios desse trabalho foi baseado nesses resultados, uma vez que, segundo a norma D5084-16 (ASTM, 2020 c), para solos com condutividade hidráulica entre 1×10^{-6} e 1×10^{-7} m.s⁻¹, deve-se utilizar gradientes de até 5. De acordo com Zanon (2014), em campo, na maioria das situações, o gradiente é

ainda menor. Aplicando-se gradientes maiores (elevada velocidade de percolação) podem ocorrer mudanças na estrutura do solo devido, principalmente, ao arraste das partículas finas, que podem se acumular nos vazios na base do corpo-de-prova ou no papel filtro e colaborar para a diminuição da condutividade hidráulica ao longo do tempo.

5.5.5 Resiliência

Os ensaios de resiliência não puderam ser completados. Alguns resultados obtidos encontram-se no Anexo A.

5.6 Uso em Obras Geotécnicas

5.6.1 Aterros Sanitários

No caso do uso em aterros sanitários (Item 3.6.1), os limites de Atterberg do solo e das misturas atendem ao mínimo especificado na literatura, 7-15% (Koerner & Daniel, 1997). Apenas as misturas atenderiam às referências mais restritivas, $LL \geq 30\%$ e $IP \geq 15\%$ (Rocca, Iacovone & Barrotti, 1993). Tanto o solo quanto as misturas atenderam as recomendações granulométricas, por apresentarem mais de 30% de fração fina (partículas menores que 0,074 mm) e não apresentarem fração pedregulhosa. A classificação da mistura 3:1 não se encontra dentre os tipos de solo especificados por Rocca, Iacovone & Barrotti (1993).

Em se tratando da permeabilidade, todas as misturas se mostraram adequadas para utilização como camadas de fundo, mesmo no caso das práticas mais restritivas apresentadas no Item 3.6.1, que exigem solos com permeabilidades inferiores a $1 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$. Por apresentar a mais baixa condutividade hidráulica, a mistura 5:1 se mostrou a mais adequada. No caso do solo, apenas as práticas menos restritivas, como a indicada na NBR 13.896 (ABNT, 1997), recomendariam sua utilização em barreiras de fundo.

5.6.2 Bases de Pavimentos

Para o uso em bases de pavimentos, segundo a norma 098 (DNIT, 2007), resumidamente, os materiais devem satisfazer:

- $LL \leq 40\%$ e $IP \leq 15\%$;
- Ausência de argilas das famílias das nontronitas e/ou montmorilonitas constatadas em análises mineralógicas;
- O equivalente em areia deverá ser maior que 30%;
- A percentagem do material que passa na peneira N° 200 (abertura de 0,075 mm) não deve ultrapassar 2/3 da percentagem que passa na peneira N° 40;
- Uma das faixas da Tabela 23.

Nesse caso, apenas o solo atende a todas as especificações. As misturas, no geral, atendem quanto às granulometrias e mineralogias, mas não atendem quanto à plasticidade, sendo mais plásticas que o especificado, devido a presença do lodo *in natura*, altamente plástico.

Não foi possível concluir quanto ao comportamento resiliente devido aos percalços encontrados para realização dos ensaios, já explicitados neste texto.

5.6.3 Barragens

Conforme apresentado no Item 3.6.3, não foram encontradas normativas especificando as faixas de abrangência dos parâmetros geotécnicos de resistência dos solos a serem empregados em barragens. De acordo com a Tabela 23, em barragens brasileiras, no geral, os interceptos de coesão dos solos foram menores que 10 kPa, com média 9,2 kPa, enquanto os ângulos de atrito, variaram entre 30° e 35°, com média 32°.

Baseando-se nesses dados, os parâmetros de resistência de todas as misturas se mostraram adequados por apresentarem baixas coesões e altos ângulos de atrito, especialmente a mistura 3:1.

Além disso, os ensaios de compressão Triaxial indicaram que durante o cisalhamento, sob as tensões confinantes estudadas, os corpos de prova apresentaram comportamento dilatante, o que indica baixa probabilidade de ocorrência de liquefação. Entretanto, vale ressaltar que a utilização de materiais em barragens é baseada em ensaios especificados de maneira customizada para os níveis de tensão compatibilizados com o projeto.

6 CONCLUSÕES

Os principais resultados deste trabalho são:

- A mineralogia do LETA Taiaçupeba *in natura* consiste em uma matriz amorfa, identificada pela presença de bandas largas com baixas intensidades nos difratogramas e pela complexa morfologia observada na MEV, com possível presença de fase cristalina composta por quartzo, gibbsita e caulinita. Fazem parte do material amorfo compostos húmicos e óxidos e hidróxidos de alumínio e/ou ferro, produtos da reação dos sais utilizados como coagulantes e a água;
- Os principais elementos constituintes do LETA Taiaçupeba, segundo a FRX, são o alumínio, o ferro e o silício, compatíveis com a composição mineralógica;
- O pH_{H2O} é 6,4, indicando relativa acidez;
- A CTC é 73,3 mmolc.kg⁻¹, indicando baixa atividade;
- O LETA apresentou elevado teor de matéria orgânica, diagnosticado em diversos ensaios: perda ao fogo a 1020°C (52,6%), perda a fogo a 440°C (49,0%), teor de matéria orgânica (26,7%), teor de carbono orgânico (15,5%) e a constatação da presença de fase amorfa;
- O LETA Taiaçupeba é um resíduo não-perigoso e não-inerte, por apresentar teores dos constituintes manganês e fenóis acima dos limites estipulados na NBR 10.004 (ABNT, 2004 a);
- O solo é classificado como SC e o lodo como OH pelo SUCS. A adição de lodo não altera significativamente a granulometria do solo, uma vez que a fração de sólidos adicionados é pequena: as misturas 5:1 e 4:1 são classificadas como SC e a mistura 3:1 é classificada como SM. A massa específica dos sólidos do solo diminuiu e os limites de consistência do solo aumentaram com a adição de lodo;
- As misturas 5:1, 4:1 e 3:1 compactadas por umedecimento, na energia normal, apresentam, gradativamente, menores massas específicas secas máximas e maiores teores de umidade ótimos;
- Quanto maior o grau de secagem prévia das misturas, maior a massa específica seca máxima e menor o teor de umidade ótimo obtidos no ensaio de compactação. O teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima das misturas

correlacionam-se linearmente (inversa e direta, respectivamente) com o teor de umidade após secagem, com coeficientes de determinação R^2 maiores que 0,92. Ainda, com graus de secagem superiores a 80%, a secagem prévia possibilita uma melhoria dos parâmetros de compactação ótimos das misturas, aproximando-os dos do solo;

- As misturas compactadas (CC de 0,16 a 0,22) são de 2,3 a 3,1 vezes mais compressíveis que o solo compactado (CC igual a 0,07). Entretanto, diferente do esperado, os CC e Cr não foram crescentes com o incremento de lodo;
- As misturas têm maior ângulo de atrito efetivo (35° a 38°) do que o do solo ($\varphi' = 34^\circ$) e menor coesão efetiva (6 a 13 kPa) do que o solo ($c' = 22$ kPa);
- Teores crescentes de lodo levam ao desenvolvimento de pressões neutras também crescentes sob mesma tensão confinante durante ensaios de compressão triaxial, indicando tendência a maior compressão durante o cisalhamento e menor resistência não drenada. Coerentemente, nos ensaios de resistência à compressão simples, o incremento de lodo provocou a redução das tensões axiais máximas e o aumento das deformações na ruptura;
- A condutividade hidráulica das misturas foi de aproximadamente 10 a 100 vezes menor que a do solo nas condições estudadas.

Cabe observar que a pandemia de Covid-19 impactou significativamente os trabalhos finais da pesquisa. Com a paralisação das atividades do laboratório, as amostras do LETA Taiaçupeba sofreram consideráveis perdas de umidade. Como a secagem do lodo provoca alteração irreversível em suas características, a premissa básica da pesquisa, que é a utilização do LETA *in natura*, deixou de ser atendida, sem a possibilidade de reposição do material devido às limitações impostas pela pandemia. Assim, ensaios de permeabilidade e de resiliência resultaram incompletos e algumas aplicações geotécnicas não puderam ser exploradas.

Os resultados obtidos mostraram que nas proporções estudadas, a adição do lodo da ETA Taiaçupeba *in natura* na areia argilosa laterítica de Botucatu, seca até umidade higroscópica, não prejudicou o seu comportamento geotécnico, tendo, inclusive, melhorado os parâmetros analisados, se tomados como base, os usos investigados neste trabalho, em aterros sanitários e barragens, e abrindo margem

para outros usos como aterros em geral, preenchimentos de valas, muros reforçados com geossintéticos, dentre outros.

Conclui-se que, portanto, que a adição de LETAs em solos, se mostra potencialmente viável para utilização em obras geotécnicas, exigindo maior detalhamento sobre o comportamento (permeabilidade, resistência ao cisalhamento, deformabilidade e resiliência) e a segurança ambiental em função da aplicação desejada, ou seja, deve ser feita uma análise caso a caso. As misturas, quando submetidas a secagem prévia à compactação, devido à recuperação progressiva dos parâmetros ótimos do solo, possuem ainda mais possibilidades de uso.

7 RECOMENDAÇÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA

Para a continuidade da pesquisa, sugere-se:

- A obtenção de uma nova amostra *in natura* do LETA Taiaçupeba, sua caracterização, compactação e realização de novos ensaios de resiliência e permeabilidade com todas as misturas;
- A repetição dos ensaios de adensamento seria adequada, uma vez que a mistura 5:1 apresentou comportamento destoante das demais;
- Acompanhar as variações do LETA Taiaçupeba ao longo do ano por meio de análises granulométricas, de plasticidade e massa específica dos sólidos, visando compreender as variações de comportamento das misturas e as faixas de variação dos parâmetros geotécnicos;
- Realizar uma pesquisa em campo, aplicando-se as três misturas estudadas neste trabalho em um aterro experimental e avaliando-se seu comportamento e desempenho ao longo do tempo, a partir da coleta de amostras e realização dos ensaios de permeabilidade, adensamento e resistência ao cisalhamento, em períodos definidos, por exemplo a cada 4 meses;
- Em campo também podem ser verificados os melhores métodos e equipamentos a serem utilizados na preparação das misturas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6.508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- _____. *NBR 7.182: Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro: ABNT, 1986 a.
- _____. *NBR 6.457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro: ABNT, 1986 b.
- _____. *NBR 12.770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não-confinada*. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- _____. *NBR 13.600: Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C*. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- _____. *NBR 13.896: Solo – Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- _____. *NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004 a.
- _____. *NBR 10.006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004 b.
- _____. *NBR 10.005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004 c.
- _____. *NBR 15.849: Resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- _____. *NBR 6.459: Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016 a.
- _____. *NBR 7.180: Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016 b.
- _____. *NBR 7.181: Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ABO-EL-ENEIN, S. A.; SHEBL, A.; ABO EL-DAHAB S. A. Drinking water treatment sludge as an efficient adsorbent for heavy metals removal. *Applied Clay Science*, v. 146, p. 343–349, 2017.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020*. ABRELPE, 2020.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ABDUL, A.; ALAM, M. Characterization of water treatment sludge and its reuse as coagulant. *Journal of Environmental Management*, v. 182, p. 606–611, 2016.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Characterization of water treatment plant's sludge and its safe disposal options. *Procedia Environmental Sciences*, v. 35, p. 950 – 955, 2016 a.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. *Journal of Cleaner Production*, v. 124, p. 1–13, 2016 b.

ALVAREZ NETO, L. *Proposta de um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis para vias de baixo volume de tráfego com a utilização de solos lateríticos*. Tese de Doutorado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 1998.

ANDRADE, C.; MYNRINE, V.; SILVA, D.A.; MAYER, S.L.S.; SIMETTI, R.; MARCHIORI, F. Compósito para a construção civil a partir de resíduos industriais. *Matéria*, v. 21, n. 2, p. 321–329, 2016.

ANDREOLI, C.V. (ED.). *Alternativas de uso de resíduos do saneamento*. Rio de Janeiro: Prosab - ABES, 2006.

ASOCIACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA. Información técnica Superfloc Serie 8000 HMW PAMs catiónica seca. *Asociación Nacional de la Industria Química*, 2019. Disponível em: <<http://www.aniq.org.mx/webpublico/>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

ASTM INTERNATIONAL. American Society for Testing and Materials. *D698-12e2: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. West Conshohocken, PA. 2012.

_____. *D854-14: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. West Conshohocken, PA. 2014.

_____. *D2974-14: Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*. West Conshohocken, PA. 2016.

_____. *D2487-17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA. 2017 a.

_____. *D7928-17: Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer)*. West Conshohocken, PA. 2017 b.

_____. *D4318-17e1: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken, PA. 2017 c.

_____. *D2435/D2435M-11: Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. West Conshohocken, PA. 2020 a.

_____. *D4767-11: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*. West Conshohocken, PA. 2020 b.

_____. *D5084-16a: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*. West Conshohocken, PA. 2020 c.

BABATUNDE, A.O.; ZHAO, Y.Q. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 37, n. 2, p. 129–164, 2007.

BALBO, J.T. *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

BARROSO, M.B. *Influência das micro e macropropriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leitos de drenagem*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

BARROSO, M.M.; CORDEIRO, J.S. Metais e sólidos: aspectos legais dos resíduos de estações de tratamento de água. *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21. Anais... João Pessoa: N.P., 2001.

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

BERNDTSSON, M. *Circular Economy and Sustainable development*. Masters dissertation, Earth and Sciences Department, Uppsala University. Uppsala, Sweden, 2015.

BLIGHT, G.E. *Mechanics of residual soils*. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 1997.

BONAPARTE, R.; GROSS, B.A.; DANIEL, D.E.; KOEMER, R.M.; DWYER, S. *Technical Guidance For RCRA/CERCLA Final Covers*. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2004.

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

BOTERO, W.G.; SANTOS, A. OLIVEIRA, L.C.; ROCHA, J.C. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. *Química Nova*, v. 32, n. 8, p. 2018–2022, 2009.

BRAGA, F. M. G. *Dupla filtração em filtros ascendentes de pedregulho e filtros descendentes de areia aplicada à remoção de algas: influência da taxa de filtração e granulometria do filtro de areia*. Dissertação de Mestrado—Brasília: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2005.

BRASIL. *Lei no 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências*. Diário Oficial da União: Brasília, 2010.

BRAUNGART, M., MCDONOUGH, W. *Cradle-to-cradle; Remaking the way we make things*. North Point Press, 2008.

BSI. British Standards Institution. BS 1377-3: Methods of test for soils for civil engineering purposes (chemical and electro-chemical tests). London, UK: BSI,1990.

_____. BS 5930: Code of practice *for ground investigations*. London, UK: BSI, 2015.

BUSELATTO, D.M.; WENZEL, M.C.; ROCHA, G.H.; WEBBER, J.; SILVA, S.R.; ANDRADE, J.J.O. Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. *Matéria*, v. 24, n. 1, 2019.

CABRAL, V.A.L. *Avaliação da incorporação do lodo da ETA UFV na manufatura de tijolos de solo-cimento*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2013.

CALKINS, R.J.; NOVAK, J.T. Characterization of Chemical Sludges. *Journal AWWA*, p. 423–428, 1973.

CAVALCANTE, P.R.M. *Remoção de fenol de efluentes aquosos utilizando floculação iônica*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Fenol*, s.d. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/mortandade-peixes/alteracoes-fisicas-e-quimicas/contaminantes/fenol/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

CHEN, H.; MA, X.; DAI, H. Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. *Cement & Concrete Composites*, v. 32, p. 436–439, 2010.

CHIANG, K.H.; CHOU, P.H. HUA, C.R.; CHIEN, K.L.; CHEESEMAN, C. Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *Journal of Hazardous Materials*, v. 171, p. 76–82, 2009.

COELHO, R.V.; TAHIRA, F.S.; FERNANDES, F.; FONTENELE, H.B.; TEIXEIRA, R.S. uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária. *Revista eletrônica de engenharia civil*, v. 10, n. 2, p. 11–22, 2015.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução Nº 375, de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências*. Disponível em: <http://www.conama.org.br> . Acesso em: 21 jun. 2021.

CORDEIRO, J.S. O Impacto Ambiental Provocado pela Indústria da Água. *Revista Saneamento Ambiental*, v. 56, 1999.

CORDEIRO, J.S. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: *Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final*. Curitiba: Prosab - ABES, 2001.

CORNWALL, D.A.; KOPPERS, H.M (org.). *Slib, Schlamm, Sludge*. Denver, Colorado: American Water Works Association Research Foundation and KIWA Ltd., 1990.

CRUZ, P. T. DA. *Propriedades de engenharia de solos residuais compactados da região Centro-Sul do Brasil*. São Paulo: THEMAG/DLP/EPUSP, 1967.

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

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. *Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicações e preparação de amostras*. Porto Alegre: Centro de Microscopia Eletrônica e Microanálise (CEMM) - EDIPUCGS, 2007.

DELGADO, J. V. C. *Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada*. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

DIAS, L.M.; BATOLIONE, G.; MORAIS, F.U.; FERNANDES, J.; RIBEIRO, M.C.; LISBOA, M.S. Alternativa de Destinação Final do Lodo de Estação de Tratamento de Água - Fabricação de Blocos Cerâmicos. In: *Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 28. Anais... Cancún: AIDIS, 2002.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *ME-228: Solos - Compactação em equipamento miniatura*. 1994.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma 098: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – Especificação de serviço. 2007.

_____. Norma 139: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. 2010.

_____. Norma 134: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. 2018.

DUMKE, C.; CAMARGO, T.; UHLIG, C.; SOMENSI, A.; HOPNER, N. Avaliação da eficiência de um polímero aniônico e um polímero catiônico em tratamento de água para abastecimento. In: *Mostra Científica e Tecnológica - Campus Araquari*, 6. Araquari, 2015.

EL-DIDAMONY, H.; KHALIL, KH.A.; HEIKAL, M. Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag-fired drinking water sludge composite cement pastes. *HBRC Journal*, v. 10, n. 1, p. 73–81, 2019.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, SUN & MCKINSEY & CO. *Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe*, 2015. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>>. Acesso em: 14 dez. 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). (2017). *Uma Economia Circular no Brasil: Uma abordagem exploratória inicial*. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

ELLIOT, H.A.; DEMPSEY, B.A. Agronomic Effects of Land Application of Water Treatment Sludges. *Journal AWWA*, p. 126–131, 1991.

EMBRAPA. *Manual de Métodos de Análise de Solos*. 4. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2017.

FERREIRA FILHO, S.S. Pré-condicionamento de lodos de estações de tratamento de água visando o seu adensamento por gravidade. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 19. Anais... Foz do Iguaçu, Paraná, 1997.

FERREIRA, K.S.M.; 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. In: *Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental*, 9, *Congresso Brasileiro de Geossintéticos*, 8. Anais... São Carlos: Vilar, O.M. & Portelinha, F.H.M., 2019.

FROSCH, D.; GALLOPOULOS, N. Strategies for manufacturing. *Scientific American*, v. 261, n. 3, p. 94–102, 1989.

GASTALDINI, A.L.G.; HENGEN, M.F.; AMARAL, F.D.; ANTONILI, M.B.; COLETTI, T. The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. *Construction and Building Materials*, v. 94, p. 513–520, 2015.

GODOY, L.G.G.; ROHDEN, A.B.; GARCEZ, M.R.; COSTA, E.B.; DALT, S.; ANDRADE, J.J.O. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, v. 223, p. 939–950, 2019.

GÜNEYLI, H.; RÜŞEN, T. Effect of length-to-diameter ratio on the unconfined compressive strength of cohesive soil specimens. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, p. 793–806, 2016.

HEAD, K.H. *Manual of Soil Laboratory Testing*. 3. ed. Scotland, UK: Whittles Publishing, V. 1., 2006.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K.F.; JOUROSKI, A.; BARON, O.; SALES, A.; ANDREOLI, C.V.; PAULON, V.A. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. *Cerâmica*, v. 51, n. 318, p. 85–95, 2005.

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

HUAT, B.B.K.; ASADI, A.; KAZEMIAN, S. Experimental investigation on geomechanical properties of tropical organic soils and peat. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 2, n. 1, p. 184–188, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Manual técnico de pedologia*. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

_____. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

_____. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

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. *Engenharia sanitária e ambiental*, v. 12, n. 2, p. 117–126, 2007.

KOERNER, R.M.; DANIEL, D.E. *Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps*. Reston, VA: ASCE Press, 1997.

LAMBE, T.W. *Soil Testing for Engineers*. New York: John Wiley, 1951.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. *Soil Mechanics*. 2. ed. New York: John Wiley, 1969.

LAZZAROTTO, A. Economia Circular: a urgência de uma nova economia. *Autossustentável*, 2018. Disponível em: <<https://autossustentavel.com/2018/04/economia-circular-uma-nova-economia>>. Acesso em: 16 dez. 2020.

LIN, C.F.; WU, C.H.; HO, H.M. Recovery of municipal waste incineration bottom ash and water treatment sludge to water permeable pavement materials. *Waste Management*, v. 26, p. 970–978, 2006.

MACARTHUR, E. What is the circular economy?. *Ellen Macarthur Foundation*, s.d. Disponível em: < <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

MASSAD, F. *Mecânica dos solos experimental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MONTALVAN, E.L.T. *Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da Estação de Tratamento de Água Cubatão*. Dissertação de Mestrado—São Paulo: Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo, 2016.

MONTALVAN, E.L.T.; FERREIRA, K.S.M.; GODOY, R.V.S.; BOSCOV, M.E.G. Influence of water treatment sludge addition on the compressibility and shear strength parameters of two lateritic soils. In: *Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16. Cancun: Lopez-Acosta, 2019.

MONTALVAN, E.L.T.; BOSCOV, M.E.G. Geotechnical Parameters of Mixtures of a Tropical Soil with Water Treatment Sludge. In: *International Congress on Environmental Geotechnics*, 8. Anais... Springer, Singapore.: N.P. 2018.

MONTEIRO, N.B. Características de lodos de estação de tratamento de água desidratados por sistema geotêxtil: estudo de caso. Dissertação de Mestrado—Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2014.

MOTTA, W.H. Cross Fertilization Between Eco-innovation and Life Cycle Assessment: a pathway to circular economy. In: *Life Cycle Assessment*, 18. Proceedings... Fort Collins, Colorado. 2018.

MUCHIMBANE, A.B.D.A. *Avaliação da influência da disposição de lodo gerado por estação de tratamento de água (ETA) sobre a qualidade do solo e da água subterrânea na área da Barragem Taiaçupeba*, Suzano, SP. Tese de Doutorado—Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2016.

NAIR, A.T.; AHAMMED, M.M. Coagulant recovery from water treatment plant sludge and reuse in post-treatment of UASB reactor effluent treating municipal wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, p. 10407–10418, 2014.

O'KELLY, B.C. Geotechnical properties of a municipal water treatment sludge incorporating a coagulant. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 45, n. 5, p. 715–725, 2008.

O'KELLY, B.C. Landfill disposal of alum water treatment residues: some pertinent geoenvironmental properties. *Residuals Science and Technology*, v. 7, n. 2, p. 95–113, 2010.

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

O'KELLY, B.C.; QUILL, M.E. Compressibility and consolidation of water treatment residues. *Waste and Resource Management*, v. 162, p. 85–97, 2009.

O'KELLY, B.C.; QUILL, M.E. Shear strength properties of water treatment residues. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, v. 163, n. 1, 2010.

O'KELLY, B.C.; SIVAKUMAR, V. Water content determinations for peat and other organic soils using the oven-drying method. *Drying Technology: An International Journal*, v. 32, 2014.

OLIVEIRA, A.P.S. *Avaliação dos atributos de um latossolo adubado com lodo de estação de tratamento de água*. Trabalho de Conclusão de Curso—Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2015.

OLIVEIRA, E.M.S.; MACHADO, S.Q.; HOLANDA, J.N.F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 50, p. 324–330, 2004.

PÁDUA, V.L.; HELLER, L. *Abastecimento de água para consumo humano*. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

PAIXÃO, L.C.C.; YOSHIMURA, H.N.; ESPINOSA, D.C.R.; TENORIO, J.A.S. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. *Cerâmica*, v. 54, n. 329, p. 63–76, 2008.

PEREIRA, M.G.; VALLADARES, G.S.; ANJOS, L.H.C.; BENITES, V.M.; ESPÍNDULA JUNIOR, A.; EBELING, A.G. Organic carbon determination in Histosols and soil horizons with high organic matter content from Brazil. *Scientia Agricola*, v. 63, n. 2, p. 187–193, 2006.

PINHEIRO, B.C.A.; ESTEVÃO, G.M.; SOUZA, D.P. Lodo proveniente da estação de tratamento de água do município de Leopoldina, MG, para aproveitamento na indústria de cerâmica vermelha Parte I: caracterização do lodo. *Matéria*, v. 19, n. 3, p. 204–211, 2014.

PINTO, C.S. *Curso básico de mecânica dos solos: em 16 aulas*. 3ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

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

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

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

RAGHU, D.; HSIEH, H.N. Material properties of water treatment plant sludge. *The International Journal of Civil Engineering for Practicing and Design Engineers*, v. 5, n. 5, p. 927–941, 1987.

RAMIREZ, K.G.; POSSAN, E.; BITTENCOURT, P.R.S.; CARNEIRO, C.; COLOMBO, M. Physico-chemical characterization of centrifuged sludge from the Tamanduá water treatment plant (Foz do Iguaçu, PR). *Matéria*, v. 23, n. 3, 2018.

REALI, M.A.P. (ED.). *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

REIS, E.L. Abordagem Sistêmica do Sistema de Tratamento de Água de Registro, São Paulo, com Ênfase na Avaliação do Impacto do Descarte dos Resíduos na Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape. Tese de Doutorado—São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2006.

RIBEIRO A.P.; FIGUEIREDO A.M.G.; SARKIS J.E.S.; HORTELLANI M. A.; KAKAZU M.; SILVA N.C.; NAMMOURA NETO G.M. Elementos do grupo da platina (Pt, Pd, Rh) em solos da cidade de São Paulo, Brasil: avaliação da poluição devido aos conversores catalíticos automotivos. *Congresso Brasileiro de Geoquímica*, 12. Anais... Ouro Preto, 2009.

RICHTER, C. A. Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água. 1ª ed., 4ª reimpressão. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.

RICHTER, C. A. Água: métodos e tecnologia de tratamento. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

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

RODRIGUES, L.P.; HOLANDA, J.N.F. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. *Cerâmica*, v. 59, p. 551–556, 2013.

RODRÍGUEZ, N.H.; RAMÍREZ, S.M.; VARELA, M.T.B. GUILLEM, M.; PUIG, J.; LARROTCHA, E.; FLORES, J. Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. *Cement and Concrete Research*, v. 40, p. 778–786, 2010.

ROQUE, A.J.; CARVALHO, M. Possibility of using the drinking water sludge as geotechnical material. In: *ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics*, 5. Proceedings... London, UK: Thomas Telford, 2006.

ROQUE, A.; MONTALVAN, E.L.T.; BOSCOV, M.E.G. Caracterização mineralógica, química e geotécnica do lodo da Estação de Tratamento de Água Taiaçupeba. *Simpósio sobre Resíduos Sólidos*, 6. Anais... São Carlos: N.P., 2019.

ROSSI, M. *Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado*. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. *Tratamento de água*. Obtido de SABESP, 2019.

_____. Tratamento de Água. SABESP, 2020. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=47>>. Acesso em: 8 abr. 2020.

SANTOS, I.S.S.; 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 do Município de São Leopoldo. In: *Congresso Interamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ambiental*. Abes, 2000.

SILVA, A.S.; HEMSI, P.S. Efeito do teor de sólidos na resistência ao cisalhamento de um lodo de ETA visando seu uso em cobertura diária de aterros sanitários. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 19. Anais... Salvador: ABMS, 2018.

SILVEIRA, C.; KOGA, D.S.; KURODA, E.K. Estudo da viabilidade de disposição final dos lodos de ETAS em aterros sanitários. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 9, n. 11, p. 251–265, 2013.

SMOLLEN, M.; KAFAAR, A. Electroosmotically enhanced sludge dewatering: pilot-plant study. *Water Science Technology*, v. 30, n. 8, p. 159–168, 1994.

SPOSITO, G. *The chemistry of soils*. 2. ed. Oxford, New York: Oxford University Press, 2008.

SUMAN, A.; AHMAD, K.; INAMULHAQ. Water treatment plant sludge characterization, recovery of coagulant and its reuse. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, v. 07, 2018.

TAN, K.H. *Principles of Soil Chemistry*. 4. ed. Athens, Georgia: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2011.

TARTARI, R.; DÍAZ-MORA, N.; MÓDENES, A.N.; PIANARO, S.A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: Caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. *Cerâmica*, v. 57, p. 288–293, 2011.

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*, v. 52, n. 323, p. 215–220, 2006.

TEIXEIRA, S.R., SANTOS, G.T.A.; SOUZA, A.E.; ALÉSSIO, P.; DE SOUZA, S.A.; DE 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, p. 561–565, 2011.

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

TRINDADE, E. Espectrometria de Fluorescência de Raios-X. *Malvern Panalytical*, 2016. Disponível em: <<https://quimicandovzp.com.br/espectrometria-de-fluorescencia-de-raios-x/>>. Acesso em: 15 abr. 2020.

TSUGAWA, J.K.; DA SILVA SABINO, E.F.; MONTE, R.; BOSCOV, M.E.G. Importance of Composing Representative Samples According to the Theory of a Sampling (TOS) for the Reuse of Water Treatment Sludge. *Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16. Anais... Cancun, Mexico, 2019.

TSUGAWA, J.K.; ROMANO, R.C.; PILEGGI, R.G.; BOSCOV, M.E.G. Rheological Approach for the Evaluation of Geotechnical Use of Water Treatment Sludge. *The International Congress on Environmental Geotechnics*. In: *International Congress on Environmental Geotechnics*, 8. Anais... Springer, Singapore.: N.P. 2018.

United States Environmental Protection Agency - USEPA. *Appendix E to Final Rule, 40 CFR Parts 257 and 258, "Solid Waste Disposal Facility Criteria; Final Rule"*. Federal Register, Vol. 56, No. 196, pp. 51057-51060. Washington, DC. 1991.

_____. *Method 1311: Toxicity characteristic leaching procedure*. Washington, DC. 1992.

_____. *Method 1684: Total, fixed, and volatile solids in water, solids, and biosolids*. Washington, DC. 2001.

UWIMANA, R.A.; NHAPI, I.; WALI, U.G.; HOKO, Z.; KASHAIGILI, J. Sludge characterization at Kadahokwa water treatment plant. *Water Science & Technology: Water Supply—WSTWS*, v. 10, n. 5, 2010.

VANDERMEYDEN, C.; CORNWELL, D.A. *Nonmechanical dewatering of water plant residuals*. Denver, Colorado: American Water Works Association e American Water Works Association Research Foundation, 1998.

VIEIRA, C.M.F.; MARGEM, J.I.; MONTEIRO, S.N. Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com lodo de ETA. *Matéria*, v. 13, n. 2, p. 275 – 281, 2008.

WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, v. 37, n. 1, p. 29–38, 1934.

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*, v. 1345, p. 36–43, 1992.

WANG, M.C.; TSENG, W. Permeability behavior of a water treatment sludge. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 119, n. 10, p. 1672–1677, 1993.

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. In: *Geo-Frontiers 2011 - Advances in Geotechnical Engineering*. Anais... ASCE, 2011.

WINTERMYER, A.M.; KINTER, E.B. Dispersing agents for particle-size analysis of soils. *Highway Research Board Bulletin, Transportation Research Board of the National Academy of Sciences*, 1955.

WOLFF, E.; SCHWABE, W.K.; LANDIM, A.B.; VITORINO, J.P.D. Caracterização do lodo gerado na estação de tratamento de água da CENIBRA. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23. Anais... Campo Grande: ABES, 2005.

WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; CONCEIÇÃO, S. V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. *Journal of Cleaner Production*, p. 1–8, 2014.

XIA, Z. *Geotechnical characterization of water treatment plant residuals*. M.Sc. Thesis—New Jersey: New Jersey Institute of Technology, 1994.

YANG, L.; WEI, J.; ZHANG, Y.; WANG, J.; WANG, D. Reuse of acid coagulant recovered drinking waterworks sludge residual to remove phosphorus from wastewater. *Applied Surface Science*, v. 305, p. 337–346, 2014.

YANG, Y.; ZHAO, Y.Q.; BABATUNDE, A.O.; WANG, L.; REN, Y.X.; HAN, Y. Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption on dewatered alum sludge. *Separation and Purification Technology*, v. 51, p. 193–200, 2006a.

YANG, Y.; TOMLINSON, D.; KENNEDY, S.; ZHAO, Y.Q. Dewatered alum sludge: a potential adsorbent for phosphorus removal. *Water Science & Technology*, v. 54, n. 5, p. 207–213, 2006b.

YEN, C.L.; TSENG, D.H.; LIN, T.T. Characterization of eco-cement paste produced from waste sludges. *Chemosphere*, v. 84, p. 220–226, 2011.

YUZHU, W. *Condicionamento de lodo de estação de tratamento de água: estudo de caso*. Dissertação de Mestrado—São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade de São Paulo, 1996.

ZANON, T.V.B. *Avaliação da contaminação de um solo laterítico por lixiviado de aterro sanitário através de ensaios de laboratório e de retroanálise de campo*. Dissertação de Mestrado—São Paulo: Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo, 2014.

ZHAO, Y.; LIU, R.; AWE, O.W.; YANG, Y.; SHEN, C. Acceptability of land application of alum-based water treatment residuals – An explicit and comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, v. 353, p. 717–726, 2018.

ZOU, J.L.; XU, G.R.; LI, G.B. Ceramsite obtained from water and wastewater sludge and its characteristics affected by Fe₂O₃, CaO, and MgO. *Journal of Hazardous Materials*, v. 165, p. 995–1001, 2009.

ANEXO A

Ensaio de Resiliência

O solo foi compactado com umidade 13,4% (desvio de umidade de -0,4), massa específica seca $1,89 \text{ g.cm}^{-3}$ e, portanto, grau de compactação 99,6%. A mistura 3:1 foi compactada com umidade 26,6% (desvio de -0,4 em relação à umidade de mistura), massa específica seca $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$ (GC = 103,0%). Esses ensaios foram realizados no período de pandemia, após o LETA Taiaçupeba perder 252,7% de umidade e ter suas características alteradas, portanto os resultados da mistura não são confiáveis.

O resultado do ensaio para determinação do módulo de resiliência (MR) da areia argilosa laterítica de Botucatu no equipamento triaxial de carga repetida está apresentado na Figura 93. Os MR variaram de aproximadamente 1800 Kgf.cm^{-2} a 2700 Kgf.cm^{-2} para tensões confinantes de aproximadamente $0,2 \text{ Kgf.cm}^{-2}$ a 1 Kgf.cm^{-2} . De acordo com Balbo (2015), as lateritas mais arenosas e granulares, com poucos finos, têm comportamento dependente da tensão de confinamento, apresentando valores de módulo de resiliência entre 510 Kgf.cm^{-2} e 3060 Kgf.cm^{-2} . O autor cita ainda os trabalhos de Franzoni (1990) como referência para solos localizados no estado de São Paulo. Segundo ele, as areias argilosas apresentam, para a tensão confinante $\sigma_3 = 2 \text{ Kgf.cm}^{-2}$ (0,2 MPa) e tensão desvio $\sigma_d = 0,3 \text{ Kgf.cm}^{-2}$ (0,03 MPa), $w_{\text{ót.}}$ na casa dos 12% e MR próximos a 3400 Kgf.cm^{-2} (340 MPa). Franzoni (1990) faz a ressalva de que os solos lateríticos apresentam comportamento resiliente superior aos não lateríticos.

Figura 94 – Comportamento resiliente da areia argilosa de Botucatu.

Nota: s_3 – tensão confinante.

Não foi possível obter o módulo resiliente da mistura 3:1. Na fase de condicionamento, anterior a fase de aplicação das cargas, o corpo de prova apresentou deformações permanentes, ou seja, ele deixou de ter comportamento elástico e atingiu o comportamento plástico. A mistura 3:1 apresentou capacidade de suporte extremamente baixa, não sendo possível obter nenhum módulo resiliente sob as condições analisadas.