

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**ABORDAGEM SISTÊMICA DO USO DE LODO DE ETE E ETA
EM PAVIMENTAÇÃO.**

GUSTAVO OLIVEIRA FERREIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dra. Cali Laguna Achon.

São Carlos

2021

Oliveira Ferreira, Gustavo

Abordagem sistêmica do uso de lodo de ETE e ETA em pavimentação /
Gustavo Oliveira Ferreira -- 2021.
196f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São
Carlos, São Carlos

Orientador (a): Cali Laguna Achon

Banca Examinadora: Marcelo de Castro Takeda, Fabiana Alves Fiore Pinto

Bibliografia

1. Lodo de ETE e ETA,. 2. Uso benéfico,. 3. Pavimentação. I. Oliveira Ferreira,
Gustavo. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Gustavo Oliveira Ferreira, realizada em 30/06/2021.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Cali Laguna Achon (UFSCar)

Prof. Dr. Marcelo de Castro Takeda (UFSCar)

Profa. Dra. Fabiana Alves Fiore Pinto (UNESP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil. O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

Dedico este trabalho “in memoriam” a meu avô Waldir Gomes Ferreira e tio Vanildo Athaide de Oliveira, eternamente em nossos corações e aos braços do nosso Senhor Deus.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, meu agradecimento é destinado ao nosso Senhor Deus, pois sem Ele, não teria meios para alcançar qualquer objetivo que eu traçasse em minha vida, toda a honra e glória a Ti, por toda eternidade.

A Nossa Senhora Aparecida, mãe que me guiou por esse caminho de desafios e cheios de histórias que irei guardar no coração com muito carinho e aprendizado.

Aos meus pais, Luciano Cardoso Ferreira e Elisângela de Oliveira Ferreira, por dar todo o amor e suporte que necessitei até aqui, pois foi meu combustível para alçar voos mais distantes.

Meus irmãos, Gabriel Aparecido de Oliveira Ferreira e Filipe Canto Oliveira, pelos momentos descontraídos e de companheirismo, que me faz perceber que as vezes é bom rir das coisas mais simples.

A minha namorada, Karen Helena dos Santos, por todo amor e companheirismo que teve comigo neste momento, meu porto seguro.

A todos meus familiares e amigos, em especial meu amigo e irmão Danilo Manuel Silva Oliveira, minha eterna gratidão por dividir esses momentos comigo.

Ao meu ex-professor e agora diretor do escritório em que trabalho, Caio César de Oliveira Nunes, a quem agradeço por permitir que eu viajasse de ônibus no meio do expediente 200 km de Barretos até São Carlos para estudar, e só voltasse ao trabalho na manhã do dia seguinte.

Ao professor do DECiv, Dr. Marcelo de Castro Takeda, pessoa a quem conheci a pouco tempo, mas que criei uma admiração por sua virtuosidade técnica na área da geotecnia, me ajudou muito no entendimento desta disciplina e também em questões de pesquisa acadêmica.

E, por fim, e de forma especial, a minha professora e orientadora do PPGEU, Dra. Cali Laguna Achon, pessoa que me acolheu desde o início do mestrado, sempre prestativa, atenciosa e exigente quando devia ser, que me fez enxergar a beleza e importância da pesquisa acadêmica e de produzir ciência, a quem sou grato por me ensinar tanto, muito obrigado.

RESUMO

As pesquisas realizadas, desde o início da última década, tem avaliado a potencial destinação tanto do lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) quanto de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) em camadas de pavimentação e no revestimento asfáltico. Para tanto, tem-se estudado diversas proporções de lodo na porção de material misturado, em diferentes valores de sólidos totais do lodo consequentes do método de secagem térmica obtido, ou mesmo *in natura*, sendo testados com ou sem aditivos estabilizantes. Dessa forma, o presente trabalho visa analisar as pesquisas que propõe a possibilidade de destinação do lodo de ETE e ETA em pavimentação, através de uma revisão bibliográfica sistemática, em que procurou-se definir o estado da arte atual sobre o tema, e a partir desta, realizar a compilação e análise sobre dos resultados obtidos da literatura. . Para tal efeito, foi organizada as informações por meio de tabelas e gráficos comparativos entre as pesquisas realizadas, para analisar os resultados obtidos, focando principalmente nos tipo de lodo utilizado; na caracterização (química, física e mecânica) deste lodo; nas porcentagens de lodo na mistura sob o auxílio dos parâmetros físicos e mecânicos estabelecidos pelo DNIT para cada camada do pavimento e dos tipos de tráfego em que foi proposto o uso do lodo. Ao analisar as pesquisas selecionadas da literatura, dentro dos critérios pré-estabelecidos, constatou-se que os parâmetros de caracterização, percentuais de lodo na mistura e modos de preparação das amostras são distintos e sem um padrão seguido por todos, que depende mais da localidade da ETA ou ETE . Observou-se também, que As porcentagens de lodo empregados nas misturas são diversos e sem a justificativa prévia de aplicação, porém todos os estudos avaliados neste trabalho obtiveram êxito na aplicação em pavimentação, pelo menos tecnicamente, em no mínimo uma das configurações de traço usada. Notou-se que a questão ambiental foi observada na minoria dos estudos, porém, os testes de lixiviação e solubilização, realizados em algumas pesquisas, mostraram-se favoráveis. Observou-se uma maior inclinação no uso de lodo de ETE calcinado para pavimentação, sendo que o emprego de energia para remoção de água do lodo por meios mecânicos não foi avaliado nas pesquisas, devendo ser um aspecto importante no o intuito de computar os gastos monetários em função da energia consumida para elevar esta temperatura e, desta forma, avançar mais uma etapa de análise da viabilidade de uso de lodo de ETA e ETA, em escala real, na pavimentação.

Palavras-chave: Lodo de ETA, lodo de ETE, pavimentação, destinação, usos benéficos.

ABSTRACT

Research performed from the beginning of the last decade has evaluated the potential allocation of both the sludge water treatment (ETA) and Wastewater Treatment Plant (WWTP) in the asphalt pavement layers and coating. For this purpose, different proportions of sludge in the mixed material portion have been studied, at different values of total sludge solids resulting from the thermal drying method obtained, or even *in natura*, being tested with or without stabilizing additives. Thus, the present work aims to analyze the research that proposes the possibility of disposal of WWTP and ETA sludge in paving, through a systematic bibliographic review, in which we sought to define the current state of the art on the subject, and from from this, carry out the compilation and analysis of the results obtained from the literature. . For this purpose, the information was organized through tables and comparative graphs between the researches carried out, to analyze the results obtained, focusing mainly on the type of sludge used; in the characterization (chemical, physical and mechanical) of this sludge; in percentages of sludge in the mixture under the aid of physical and mechanical parameters established by DNIT for each pavement layer and the types of traffic in which the use of sludge was proposed. When analyzing selected studies from the literature, within the pre-established criteria, it was found that the characterization parameters, percentages of sludge in the mixture and sample preparation methods are distinct and without a pattern followed by all, which depends more from the location of the ETA or ETE . It was also observed that the percentages of sludge used in the mixtures are diverse and without prior justification for application, but all studies evaluated in this work were successful in paving application, at least technically, in at least one of the mix configurations used. . It was noted that the environmental issue was observed in a minority of studies, however, the leaching and solubilization tests, carried out in some studies, were favorable. A greater inclination was observed in the use of calcined ETE sludge for paving, and the use of energy to remove water from the sludge by mechanical means was not evaluated in the surveys, and should be an important aspect in the intuition of computing monetary expenses in function of the energy consumed to raise this temperature and, in this way, to advance one more stage of analysis of the viability of using ETA and ETA sludge, in real scale, in the paving.

Keywords: ETA sludge, WWTP sludge, paving, destination, beneficial uses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Tratamento de esgoto por lodos ativados.....	25
Figura 1.2 - Tratamento de esgoto por reator UASB.....	26
Figura 1.3 - Tratamento de água de tipo convencional.....	27
Figura 1.4 - Formas de tratamento de lodo de ETA.....	28
Figura 1.5 - Destinação do lodo de ETA em 22 ETAs de uma mesma sub-bacia localizada no Estado de São Paulo, Brasil.....	31
Figura 1.6 - Disposição final do lodo de ETA em 22 ETAs de uma mesma sub-bacia localizada no Estado de São Paulo, Brasil.....	31
Figura 1.7 - Destinação do lodo de ETE em 32 ETEs de uma mesma sub-bacia localizada no Estado de São Paulo, Brasil.....	32
Figura 1.8 - Disposição final do lodo de ETE em 32 ETEs de uma mesma sub-bacia localizada no Estado de São Paulo, Brasil.....	32
Figura 1.9 - Fases de remoção de água do lodo.....	34
Figura 2.1- Distribuição da água no lodo.....	34
Figura 2.2- Esquema de um leito de secagem de lodo.....	36
Figura 2.3 - Protótipo de leito de drenagem desenvolvido por Cordeiro (2001).	37
Figura 2.4 - Dimensões do leito de drenagem usado nos ensaios por Cordeiro (2001).	37
Figura 2.5 - Esquema de um sistema de secagem.....	38
Figura 2.6 - Secagem direta.....	39
Figura 2.7- Secagem indireta.....	39
Figura 2.8- Estrutura típica de um pavimento flexível.....	42
Figura 2.9 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas.....	43
Figura 3.1- Classificação dos revestimentos.....	46
Figura 3.2- Estrutura típica de um pavimento com revestimento rígido.....	48
Figura 3.3- Frasco Chapnam.....	52
Figura 3.4 - Aparelho de Casagrande.....	53
Figura 3.5 - Canelura na massa.....	54
Figura 3.6 - Procedimento de rolagem do solo.....	56
Figura 3.7 - Esquema de realização de medidas.....	61
Figura 4.1- Fases de uma revisão bibliográfica efetiva.....	64
Figura 4.2 - Representação do processo sistemático para revisão bibliográfica.....	65
Figura 4.3 - Modelo para condução da revisão bibliográfica sistemática -RBS Roadmap.....	66
Figura 4.4 - Procedimento iterativo da Fase 2 de processamento, RBS Roadmap.....	67
Figura 4.5 - Fluxograma da metodologia proposta para a pesquisa.....	69

Figura 4.6 - Variação do módulo de resiliência com o teor de lodo de ETA para o material pó de pedra.	82
Figura 4.7 - Variação do módulo de resiliência com o teor de lodo de ETA para o material solo arenoso.	83
Figura 4.8- Comparação do comportamento resiliente da mistura solo argiloso e lodo de ETA.	83
Figura 4.9 -Testes de CBR com as misturas de solo-lodo.	85
Figura 5.1 -Testes de MR com as misturas de solo-lodo de ETA 20% e ETE 10%.....	86
Figura 5.2- Curva de compactação na mistura com cal.	88
Figura 5.3 - Curva de compactação na mistura com cimento.	88
Figura 5.4 - Curva de compactação na mistura com emulsão asfáltica.	89
Figura 5.5 - Testes de CBR com o solo, aditivos de cal, cimento, emulsão asfáltica e misturas com o lodo de ETE.	90
Figura 5.6 - Testes de MR com o solo, aditivos de cal, cimento, emulsão asfáltica e misturas com o lodo de ETE.	92
Figura 5.7 - Efeito dos aditivos no lodo de ETE com solo.	93
Figura 5.8 - Perda por abrasão em via úmida.....	94
Figura 5.9 - Curva de compactação na mistura com cal.	97
Figura 6.1 - Curva de compactação na mistura com cimento.....	97
Figura 6.2 -Curva de compactação na mistura com emulsão asfáltica solidificada (resfriado).	98
Figura 6.3 - Curva de compactação na mistura com emulsão asfáltica líquida (quente).	98
Figura 6.4 -Testes de CBR com o solo, aditivos de cal, cimento, emulsão asfáltica e misturas com o lodo de ETA.....	99
Figura 6.5 -Testes de MR com o solo, aditivos de cal, cimento, emulsão asfáltica e misturas com o lodo de ETA.	101
Figura 6.6 -Efeito dos aditivos no lodo de ETA com solo.....	103
Figura 6.7 - Perda por abrasão em via úmida.....	104
Figura 6.8 -Resistência a compressão simples solo-cimento-cinza de lodo de ETE ,por traço.	109
Figura 6.9 -Evolução da estabilidade com o percentual de asfalto.	112
Figura 7.1 - Evolução dos vazios de ar com o percentual de asfalto.....	112
Figura 7.2 - Evolução dos vazios do asfalto com o percentual de asfalto.....	112
Figura 7.3 -MEV do lodo de ETA.	119
Figura 7.4 -DRX do lodo de ETA.....	120
Figura 7.5 -Distribuição granulométrica das partículas de areia, lodo de ETA e brita.	120
Figura 7.6 -Resultados dos testes de compactação das misturas.	125
Figura 7.7 -Resultados limites de Atterberg das misturas.....	126
Figura 7.8 -Resultados da compressão para as misturas.	127
Figura 7.9 -Resultados da compressão para a mistura 3:1. .LETE/cimento.	128

Figura 8.1 -Resultados de CBR para as misturas.....	129
Figura 8.2 -Resultados de CBR para a mistura 3:1 LETE/cimento.	129
Figura 8.3 - Relação entre os resultados experimentais com a múltipla comparação e a variável d de Cohen pela barra de erro.	132
Figura 8.4 - Resultados dos ensaios Marshall para o CBUQ sem aditivo, CBUQ com Aspha-Min® e CBUQ com zeólita A derivada de lodo de ETE.	134
Figura 8 5 -Esquema da configuração do modelo reduzido construído para o experimento.	135
Figura 8.7 - Variação da granulometria e da concentração de matéria orgânica ao longo dos meses de coleta do lodo da ETA Presidente Prudente, SP, Brasil.....	141
Figura 8.8 - Curvas granulométricas de lodos de ETAs que utilizam coagulantes. diferentes.	142
Figura 8.9 -Curvas granulométricas de lodo de ETA em diferentes umidades iniciais (Hitachi, Japão).	143
Figura 9.1 -Curvas granulométricas do solo, do lodo de ETA e das misturas utilizadas de solo e lodo de ETA.....	144
Figura 9.2 - Curva granulométrica do solo com lodo de ETE sem uso de flocculante cal.	145
Figura 9 3 -Curva granulométrica do solo com lodo de ETE com uso de flocculante cal.....	145
Figura 9 4 -Comparação gráfica entre os métodos de determinação de umidade nas áreas de saneamento (APHA) e geotecnia (NBR).	147
Figura 9 5 -Comparação gráfica entre os métodos de determinação de umidade nas áreas de saneamento (APHA) e geotecnia (NBR): etapas de gerenciamento e tratamento do lodo.	147
Figura 9.6 -Ensaio de caracterização física realizados nos estudos de lodo de ETA e ETE.	149
Figura 9.7 -Ensaio de caracterização mecânica realizados para uso do lodo de ETA e ETE em pavimentação nos estudos levantados.	153
Figura 9.8 -Ensaio de caracterização química realizados nos estudos com lodos de ETA e ETE em pavimentação.	159
Figura 9.9 -Influência da umidade relativa do ar e da precipitação na secagem do lodo ao ar.....	161
Figura 10.1 -Influência da isolamento e da evaporação na secagem do lodo ao ar.....	162
Figura 10.2 -Influência do vento e da temperatura na secagem do lodo ao ar.....	163
Figura 10.3 - Balanço de massa de secagem térmica e combustão do lodo da ETE Dr. Hélio de Seixo de Britto.	168
Figura 10.4 - Formas de preparo dos lodos de ETA e ETE em pavimentação nos estudos levantados.	170
Figura 10.5 -Intervalos de uso do lodo de ETA em função do local do pavimento nos estudos levantados.	174
Figura 10.6 -Intervalos de uso do lodo de ETE em função do local do pavimento nos estudos levantados.	174

Figura 10.7 - Intervalos de uso do lodo de ETA em função da forma de preparo nos estudos levantados.	175
Figura 10.8-Faixas de uso do lodo de ETE em função da forma de preparo nos estudos levantados.	176
Figura 10.9 -Intervalo total de aplicação de lodo ETA em pavimentação.....	177
Figura 11.1 -Intervalo total de aplicação de lodo ETE em pavimentação.....	178

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Caracterização química do lodo de ETE de diferentes ETE's.....	21
Tabela 1.2 - Caracterização química de lodo de ETE de diferentes localidades.	23
Tabela 1.3 - Quantidade de lodo de ETE gerado nos sistemas de tratamento.	24
Tabela 1.4 - Possíveis parâmetros de caracterização de lodos de ETA para destinação final.	29
Tabela 1.5 - Características do lodo de ETA utilizando sulfato de alumínio como coagulante.	30
Tabela 1.6 - Presença de metais no lodo originado da ETA em fase sólida.	30
Tabela 1.7- Granulometria dos materiais para uso em pavimentação.....	50
Tabela 1.8 - Filtros utilizados e taxa de aproveitamento dos artigos retornados na RBS.	71
Tabela 1.9 -Resultados dos Strings de busca utilizados na RBS.	72
Tabela 2.1 - Resultados dos filtros utilizados e taxa de aproveitamento dos artigos retornados na RBS para o String 1.....	73
Tabela 2.2 -Resultados dos filtros utilizados e taxa de aproveitamento dos artigos retornados na RBS para o String 2.....	73
Tabela 2.3- Total de trabalhos utilizados na presente revisão bibliográfica.	74
Tabela 2.4 - Caracterização física dos materiais Coelho et al., (2015).	77
Tabela 2.5 - Requisitos exigidos pelo DNIT, para camadas de subleito, sub-base e base em obras de pavimentação.	78
Tabela 2.6 - Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão do solo argiloso e da mistura solo argiloso-lodo (1:1).....	78
Tabela 2.7 - Resistência a compressão simples (RSC) aos 7 dias de idade das misturas solo argiloso-cimento e solo argiloso-cimento-lodo.....	78
Tabela 2.8 - Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão do solo arenoso e da mistura solo arenoso-lodo (1:0,25).....	79
Tabela 2.9 - Resistência a compressão simples (RSC) aos 7 dias de idade das misturas solo arenoso - cimento (10%).....	79
Tabela 3.1 - Misturas utilizadas no experimento de Delgado (2016).	80
Tabela 3.2 - Caracterização física dos materiais Delgado (2016).....	81
Tabela 3.3- Caracterização química dos materiais Delgado (2016).	81
Tabela 3.4 - Resultados obtidos das curvas de compactação dos materiais e misturas com lodo de ETA.	82
Tabela 3.5 -Caracterização física dos materiais (Lucena et al., 2012).....	84
Tabela 3.6 - Caracterização Química dos materiais (Lucena et al., 2012).....	85
Tabela 3.7 - Caracterização dos materiais (Lucena et al., 2014).	87

Tabela 3.8 - Tensão de Resistência a compressão simples (Lucena et al., 2014).	91
Tabela 3.9 - Tensão de Resistência a Tração Indireta Lucena et al., (2014).....	91
Tabela 4.1 - Valores máximos permitidos extraídos no teste de lixiviação.	95
Tabela 4.2 - Valores máximos permitidos extraídos no teste de solubilização.....	95
Tabela 4.3 - Caracterização dos materiais (Lucena et al., 2014).	96
Tabela 4.4 -Tensão de Resistência a compressão simples (Lucena et al., 2014).	100
Tabela 4.5 -Tensão de Resistência a Tração Indireta (Lucena et al., 2014).....	101
Tabela 4.6 - Valores máximos permitidos extraídos no teste de lixiviação.	104
Tabela 4.7 - Valores máximos permitidos extraídos no teste de solubilização.....	105
Tabela 4.8 - Misturas para o experimento piloto.	105
Tabela 4.9 - Misturas estudadas no experimento com estabilizantes.....	106
Tabela 5.1 - Caracterização física dos materiais Kelm (2014).	106
Tabela 5.2 - Caracterização química dos materiais Kelm (2014).	107
Tabela 5.3 - Resultados dos valores de módulo de resiliência das misturas e materiais estudados para o menor e maior nível de tensão confinante.	107
Tabela 5.4 -Caracterização física dos materiais (Perereira, 2012).	108
Tabela 5.5 - Caracterização química dos materiais Pereira (2012).	108
Tabela 5.6 - Resultados de FRX para o lodo de ETE, ETA e solo.	110
Tabela 5.7 -Resultados de resistência a tração indireta.....	113
Tabela 5.8 -Resultados de resistência ao dano por umidade (TSR).....	114
Tabela 5.9 -Resultados de módulo de resiliência (MR).....	114
Tabela 6.1 - Resultados de testes de deterioração.	115
Tabela 6.2 - Caracterização física dos materiais (Ali Dawood et al., 2019).	116
Tabela 6.3 -Caracterização Química dos materiais.	116
Tabela 6.4 -Resultados dos testes de Estabilidade Marshall para diferentes misturas de lodo de ETA.	117
Tabela 6.5 - Resultados dos testes de resistência a tração indireta para diferentes misturas de lodo de ETA.....	117
Tabela 6.6 -Caracterização química do lodo de ETA (Liu et al., 2020).	119
Tabela 6.7 - Traços das misturas do BCP com variação de conteúdo de lodo de ETA (Kg/cm ³).	121
Tabela 6.8 -Resistência e propriedades de durabilidade do BCP com variações de lodo de ETA.	122
Tabela 6.9 -Caracterização física e mecânica do lodo de ETE.	123
Tabela 7.1 -Variação da resistência a compressão e coesão com adição de cal no período de cura...	123

Tabela 7.2 -Caraterização física do solo tipo A-3 (AASHTO).....	130
Tabela 7.3 - Caraterização química e física do lodo de ETE.	131
Tabela 7.4 - Constituintes químicos encontrados nas camadas de solo SOLUBILIZADO no modelo reduzido contendo lodo de ETA e ETE.	135
Tabela 7.5 -Quantidade de energia evolvida na combustão das amostras puras e combinadas de lodo de ETA e ETE.....	169
Tabela 7.6 -Estimativa do custo de secagem do lodo de ETE.	169
Tabela 7.7 -Teores de lodo de ETA empregados nas misturas em pavimentação.	171
Tabela 7.8 -Teores de lodo de ETE empregados nas misturas em pavimentação	172

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 - Origem dos lodos gerados nas ETE's.....	22
Quadro 1.2 - Principais microrganismos encontrados no lodo de ETE.	23
Quadro 1.3 - <i>Strings</i> de busca utilizados na RBS.	70
Quadro 1.4 - Trabalhos de lodo de ETA em pavimentação encontrados por meio da RBS.	74
Quadro 1.5 - Trabalhos de lodos de ETE em pavimentação encontrados por meio da RBS.	75
Quadro 1.6 -Emprego dos materiais em pavimento a partir dos critérios do DNIT.	79
Quadro 1.7 -Caracterização física proposta pelos estudos de lodo de ETE em pavimentação (2012 a 2020).	137
Quadro 1.8 -Caracterização física proposta pelos estudos de lodo de ETA em pavimentação (2012 a 2020).	138
Quadro 1.9 -Caracterização mecânica proposta pelos estudos de lodo de ETE em pavimentação (2012 a 2020).	150
Quadro 2.1 - Caracterização mecânica proposta pelos estudos de lodo de ETA em pavimentação (2012 a 2020).....	151
Quadro 2.2 -Caracterização química proposta pelos estudos de lodo de ETE em pavimentação (2012 a 2020).	154
Quadro 2.3 - Caracterização química proposta pelos estudos de lodo de ETA em pavimentação (2012 a 2020).	155
Quadro 2.4 -Formas de preparo da amostra de lodos de ETA em pavimentação.	160
Quadro 2.5 -Formas de preparo da amostra de lodos de ETE em pavimentação.....	165

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
2. OBJETIVOS.....	19
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1 GERAÇÃO E TRATAMENTO DO LODO DE ETE.....	20
3.1.1 LODO DE ETE AERÓBIO	24
3.1.2 LODO DE ETE ANAERÓBIO.....	25
3.2 GERAÇÃO E TRATAMENTO DO LODO DE ETA	26
3.3 DESTINAÇÕES DO LODO DE ETA E ETE.....	31
3.4 REMOÇÃO DE ÁGUA DO LODO DE ETA E ETE	32
3.4.1. CONCEITOS DE REMOÇÃO DE ÁGUA DO LODO DE ETA E ETE.....	33
3.4.2. SECAGEM TÉRMICA NATURAL.....	35
3.4.3. SECAGEM TÉRMICA MECÂNICA	38
3.5 USOS BENÉFICOS DO LODO DE ETA E ETE.....	40
3.6 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	41
3.6.1. BASES E SUB-BASES FLEXÍVEIS E SEMI-RÍGIDAS.....	42
3.6.2. BASES E SUB-BASES GRANULARES.....	44
3.6.3. BASES E SUB-BASES ESTABILIZADAS (COM ADITIVOS).....	44
3.6.4. BASES E SUB-BASES RÍGIDAS	45
3.6.5. REVESTIMENTOS	45
3.6.6. REVESTIMENTOS FLEXÍVEIS BETUMINOSOS	47
3.6.7. REVESTIMENTOS FLEXÍVEIS POR CALÇAMENTO	47
3.6.8. REVESTIMENTOS RÍGIDOS.....	48
3.7 ESTUDOS GEOTÉCNICOS DOS PAVIMENTOS	48
3.7.1. ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	50
3.7.2. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DO SÓLIDOS	51
3.7.3. ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ (LL).....	53
3.7.4. ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE (LP)	55
3.7.5. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO EM EQUIPAMENTO MINIATURA.....	57
3.7.6. ENSAIO DE ÍNDICE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR).....	58
3.7.7. ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA	59

3.7.8. ENSAIO DE EQUIVALENTE DE AREIA	60
3.7.9. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA COMPRESSÃO SIMPLES DE AMOSTRAS INDEFORMADAS.....	62
4. METODOLOGIA.....	63
4.1 CONCEITOS SOBRE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS).....	63
4.2 APLICAÇÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS).	68
5. RESULTADOS	72
5.1 RESULTADOS DOS DADOS DE ENTRADA DA RBS: TRABALHOS SELECIONADOS PARA POSTERIOR ANÁLISE.....	72
5.2 ANÁLISE DO USO DO LODO DE ETA E ETE EM PAVIMENTAÇÃO	74
5.3 COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS APRESENTADOS NA RBS: SÍNTESE E ANÁLISE CRÍTICA.	136
5.3.1. AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO PARA USO DE LODO DE ETA E ETE EM PAVIMENTAÇÃO.....	136
5.3.2. AVALIAÇÃO DA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA USO DE LODO DE ETA E ETE EM PAVIMENTAÇÃO.....	159
5.3.3. AVALIAÇÃO DOS TEORES DE LODO DE ETA E ETE EMPREGADOS NAS MISTURAS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO.....	171
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	178
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	181

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil possui um panorama do ponto de vista da universalização do saneamento deficitário, mais especificamente na questão de água e esgoto, apesar das políticas públicas seguirem o caminho do fortalecimento, como o pacto do saneamento e a criação de leis ambientais relacionados ao tema.

Em relação ao cenário do saneamento, segundo dados do Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS, 2018), a taxa de atendimento aos serviços prestados para o abastecimento de água tratada é de 83,6% e de coleta de esgoto com é de 53,2 %, sendo que 74,5% do volume total de esgoto coletado tem sistema de tratamento.

Os diversos fatores, como a intensificação do volume de esgoto gerado nas cidades do país, o crescimento da população atendida pelas regiões de cidades com abastecimento de água, as limitações de áreas para a destinação final de resíduos sólidos e o custo elevado para operacionalizar a disposição adequada, tornam a gestão de resíduos sólidos bastante complexa, tanto para os gerados no tratamento de esgoto como no de água,

Considerando os percentuais de atendimento aos tratamento de água e de esgoto apresentados, tem-se ao longo do processo, nas Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) a produção de um resíduo, semissólido, pastoso, denominada lodo de ETA e lodo de ETE, respectivamente.

Sob a ótica da legislação, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010, estabelece diretrizes para que esses resíduos tenham uma destinação ambientalmente adequada, que inclui a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes. Sendo assim, somente os rejeitos podem ser encaminhados para disposição final em aterros, pois neste, se extinguiu todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos existentes e viáveis economicamente (BRASIL, 2010).

Segundo a ABNT NBR 10004/2004, o lodo de ETA e ETE é caracterizado como um resíduo sólido e de acordo com a maioria dos estudos relacionados à caracterização desse resíduo reportados na literatura, são classificados pela ABNT NBR 10005/2004 e NBR 10006/2004 como não tóxico de “Classe II-A” (não inerte).

Por essas razões, pesquisas realizadas desde o início da última década, têm avaliado a potencial destinação, tanto do lodo de ETA quanto de ETE, em camadas de pavimentação e no revestimento asfáltico. Para tanto, tem-se estudado diversas concentrações de lodo na porção de material misturado, em diferentes valores de sólidos totais consequentes do método de secagem térmica obtido, ou mesmo *in natura*, sendo testados com ou sem aditivos estabilizantes.

Com isso, observa-se um caminho de oportunidades para avançar nas questões de uso benéfico de lodo de ETA e ETE em pavimentação, propiciando a destinação ambientalmente adequada prevista em lei. Para tanto, há necessidade de avaliar alguns aspectos relevantes deste uso, bem como a influência

do método de secagem térmica utilizado, dos ensaios de caracterização dos materiais e percentuais de lodo na mistura. Sendo assim, verifica-se a importância de um melhor entendimento de estudos e pesquisas já realizadas, principalmente para avaliar quais os caminhos metodológicos, condições iniciais, ensaios realizados, resultados e possíveis relações com o desempenho do pavimento.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar as pesquisas da literatura sobre a destinação do lodo de ETE e ETA em pavimentação.

2.2 Objetivos específicos:

- Realizar o levantamento bibliográfico visando o uso dos lodos de ETA e ETE em camadas de pavimentos;
- Compilar os dados informativos a respeito das metodologias usadas nas pesquisas e resultados obtidos, com o intuito de:
 - a) Avaliar os ensaios de caracterização utilizados para análise da amostra, sob os parâmetros físicos, químicos, mecânicos e biológicos;
 - b) Avaliar as formas de secagem térmica utilizadas para preparo da amostra, visando o uso do lodo de ETA e ETE em pavimentação;
 - c) Avaliar os teores utilizados de lodo na mistura, visando o uso em camadas de pavimentos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A apresentação do conteúdo proposto nesta fundamentação teórica se inicia pela exemplificação dos processos de geração de lodo, tanto de ETA quanto de ETE, e seus processos de tratamento atuais. Na sequência tem-se a situação regional quanto a destinação ambientalmente adequada dos lodos. Posteriormente, apresentam-se os métodos de secagem térmica para lodos gerado em ETA e ETE, contextualizando com os conceitos definidos na literatura. Por fim, discorreu-se sobre a classificação dos pavimentos de acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

3.1 GERAÇÃO E TRATAMENTO DO LODO DE ETE

Os processos de tratamento de esgoto, assim como o tratamento de água, geram resíduos. O tratamento de esgotos difere do tratamento de água pela grande quantidade de processos biológicos de degradação/estabilização da matéria orgânica presente no esgoto (URBAN, 2016). De acordo com Von Sperling (2005), existem sistemas de tratamento de esgotos aeróbicos (lodos ativados, reatores aeróbicos com biofilmes, lagoas de estabilização aeróbicas) e anaeróbicos (filtro anaeróbio, reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente – UASB, lagoas de estabilização anaeróbicas).

A palavra lodo é utilizada para caracterizar os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos. O lodo gerado em ETE é o principal resíduo produzido no processo de tratamento de esgoto, possuindo características muito diferentes em comparação a sua composição inicial. Além disso, as características também mudam, além dos motivos já citados, em consequência do método de tratamento adotado, seja ele tratamento aeróbico e/ou anaeróbico.

A matéria orgânica é um dos fatores importantes no lodo de esgoto, pois pode apresentar altos índices de concentrações de DBO e DQO, além de fósforo, nitrogênio e metais pesados como o Zn, Cu, Ni, Pb, Hq e Cr (TAO et al. 2012). Existem também os lodos gerados pelo esgoto industrial, que podem apresentar vários tipos de poluentes tóxicos particulares, que alteram de acordo com o tipo de indústria e processo utilizado. Para efeito de exemplo, temos o lodo gerado pelas indústrias farmacêuticas, que possuem alta probabilidade de apresentar grandes concentrações de disruptores endócrinos e antibióticos (GALAN *et al.*, 2012).

Do ponto de vista da quantidade e complexidade, o lodo de esgoto é o principal resíduo gerado numa ETE. São compostos basicamente por 2% de matéria orgânica (células microbianas, óleos e graxas) gerada durante o tratamento de esgoto e 98 % de água. (SILVA, 2019). Em geral, essa biomassa contém aproximadamente 30% de proteínas, 40% de carboidratos e os 30% restantes são lipídios particulados (SAHINKAYA *et al.*, 2015).

Na Tabela 1.1 apresentam-se as caracterizações químicas do lodo de ETE de localidades diferentes, porém com processos semelhantes apesar das variações dos componentes do lodo.

Tabela 1.1 - Caracterização química do lodo de ETE de diferentes ETE's.

Atributo	Unidade	Barueri	Franca	Curitiba	Jundiaí	Barcelona
Umidade	%	71,2	82,7		76,2	
Sólidos Voláteis	%	56,8	72,5		69,0	85,2
pH		6,4	5,4	5,9	5,5	6,1
Carbono Orgânico	g kg ⁻¹	293	382	321	226	
Nitrogênio Total	g kg ⁻¹	42,1	68,2	49,1	21,2	42
Fósforo	g kg ⁻¹	26,9	12,9	3,7	4,5	7,2
Potássio	g kg ⁻¹	1	1	1,5	0,66	1,2
Cálcio	g kg ⁻¹	47,8	24,8	15,9	6,6	14
Enxofre	g kg ⁻¹	17,1	15,7		11,1	
Sódio	g kg ⁻¹	0,5	0,9		2,4	
Magnésio	g kg ⁻¹	4,5	2,2	6,0	1,3	2,2
Alumínio	mg kg ⁻¹	23.283	23.317		11.465	
Cádmio	mg kg ⁻¹	9,4	2	3,0		0,6
Chumbo	mg kg ⁻¹	348,9	140,5	123	136,4	34
Cobre	mg kg ⁻¹	953	240,9	325	547	167
Cromo	mg kg ⁻¹	1297,2	1230,3	140	97,5	28
Mercúrio	mg kg ⁻¹	<0,01	<0,01	1,0		1,4
Molibdênio	mg kg ⁻¹	<0,01	<0,01			
Níquel	mg kg ⁻¹	605,8	72,4	73	25,3	14
Selênio	mg kg ⁻¹	<0,01	<1			
Zinco	mg kg ⁻¹	3372	1198	728	839	459
Boro	mg kg ⁻¹	29,3	19,7		10,1	
Manganês	mg kg ⁻¹	418,9	232,5		425	
Ferro	mg kg ⁻¹	27.990	24.176		15.728	5.750

Fonte: Adaptado de Berttiol & Camargo (2006); Reis (2017).

Em princípio, a geração do lodo de ETE acontece em todos os processos de tratamento bioquímico ou biológico. Sua produção e origem estão relacionadas com o tipo de sistema utilizado para o tratamento de esgoto, conforme o Quadro 1.1.

Quadro 1.1 - Origem dos lodos gerados nas ETE's

LETE Gerado	Origem na ETE
Lodo primário	Tanque séptico; Decantadores primários
Lodo aeróbio (não estabilizado)	Lodos ativados convencional e; Reatores aeróbios com biofilme (alta carga)
Lodo aeróbio (estabilizado)	Lodos ativados aeração prolongada e; reatores aeróbicos com biofilme (baixa carga)
Lodo anaeróbio (estabilizado)	Lagoas de estabilização; Reatores UASB e Filtros anaeróbios
Lodo químico	Decantador primário com precipitação química e; Lodos ativados com precipitação de fósforo

Fonte: Andreoli *et al.*, (2001); Metcalf *et al.*, (2013).

O lodo bruto ou primário, gerado nos decantadores primários que recebem esgoto, são compostos por sólidos sedimentáveis do próprio esgoto. De modo geral, apresentam forte odor, quando principalmente submetidos a tempo elevado nos decantadores, apresentam coloração acinzentada, aspecto pegajoso, e de fácil digestão sob condições adequadas de operações da ETE (VON SPERLING, 2001).

Segundo Silva (2019), o lodo secundário ou biológico é o lodo gerado na etapa biológica do tratamento e sua composição é resultado da biomassa que se multiplicou a partir do esgoto afluente. Pode se acumular no sistema, sendo assim, deve ser removido para não sair junto com o efluente final. Em certos sistemas, os lodos primários e secundários são misturados e enviados para o tratamento de lodo, é o chamado lodo misto. No aspecto visual, apresenta-se aparência floculenta, coloração de marrom a preta, odor pouco ofensivo, quando fresco, e pode ser digerido sozinho ou misturado ao lodo primário. Para estes sólidos, há a necessidade de etapa de digestão posterior, pois não se encontram estabilizados, digeridos e podem apresentar microrganismos patogênicos.

Ainda segundo Silva (2019), o lodo que passou por estabilização biológica (aeróbia ou anaeróbia) é chamado de lodo digerido, não contém odor ofensivo e se apresenta com coloração marrom escuro. Este tipo de lodo não requer etapa de digestão posterior.

De acordo com van Haandel & Marais (1999), podem ser gerados lodos químicos quando a ETE incorpora etapas físico-químicas beneficiando o desempenho dos decantadores primários ou para remover algum nutriente no tratamento terciário. Normalmente é resultado da precipitação química com sais metálicos ou cal.

Apesar da variabilidade das características do lodo de ETE, alguns parâmetros físico-químicos, apresentados na Tabela 1.2, permitem a distinção e a comparação entre os tipos de lodo de ETE provenientes de tratamentos aeróbico e anaeróbico.

Tabela 1.2 - Caracterização química de lodo de ETE de diferentes localidades.

Características	Lodo primário tanque séptico (g/kg)	Lodo secundário	
		Lodo ativado (g/kg)	Lodo anaeróbio Estabilizado (g/kg)
Sólidos Totais	221	0,880	101
Sólidos Voláteis	280	0,777	682
Nitrogênio	21	0,047	60,8
Fósforo	-	4,13	21
Carbono Orgânico	155	0,165	325
pH	7,0	6,17	-

Fonte: Silva *et al.*, (2008); Magalhaes (2008); Adani & Tambone (2005) adaptado por Correia (2009).

Pode-se encontrar os mais variados microrganismos patogênicos no lodo de ETE, desde bactérias, vírus, protozoários e helmintos. A ocorrência e densidade desses microrganismos está relacionada ao quadro epidemiológico da comunidade local e do tratamento dado ao esgoto e ao lodo da ETE (CARRINGTON, 2001). No Quadro 1.2 pode-se constatar os principais microrganismos encontrados no lodo de ETE.

Quadro 1.2 - Principais microrganismos encontrados no lodo de ETE.

Bactérias	Vírus	Helmintos	Protozoários	Fungos
<i>Salmonella spp</i>	<i>Poliovírus</i>	<i>Taenia spp</i>	<i>Entamoeba histolytica</i>	<i>Aspergillus spp</i>
<i>Shigella spp</i>	<i>Hepatite A - vírus</i>	<i>Ascaris lumbricoides</i>	<i>Giardia lamblia</i>	<i>Aspergillus fumigatus</i>
<i>Escherichia coli</i>	<i>Rotavírus</i>	<i>Ancylostoma duodenale</i>	<i>Criptosporidium spp</i>	
<i>Clostridium perfringens</i>	<i>Parvovírus</i>	<i>Hymenolepis nana</i>	<i>Toxoplasma gondii</i>	
<i>Yersinia enterocolitica</i>	<i>Infuenza Virus</i>	<i>Toxocara spp</i>	<i>Sarcocystis</i>	
<i>Vibrio cholera</i>		<i>Stroglyoides stercolaris</i>		
		<i>Trichiuris trichiura</i>		

Fonte: Carrington (2001); USEPA (2003) citado por Correia (2009)

De acordo com Andreoli *et al.*, (2001), dentre os sistemas de tratamento de esgoto, as lagoas de estabilização são as que produzem menor volume de lodo, em comparação com os sistemas de lodo ativado convencional que produzem maior volume de lodo. O motivo para isso, se dá pelo fato de que

nas lagoas o lodo fica retido durante anos e sofre digestão e adensamento reduzindo assim seu volume e, no sistema de lodos ativados convencional, o tempo de permanência do lodo ou idade do lodo é mais reduzido. Além do mais, o metabolismo está diretamente ligado a essa questão de redução do volume através da digestão por lagoas de estabilização, devido aos processos de anabolismo e catabolismo.

Em sua maioria, ocorre mais formação de lodo quando utiliza-se sistemas de metabolismo aeróbico, o que explica a grande quantidade de lodo a ser descartado nos sistemas de lodos ativados. Nos sistemas anaeróbios, geralmente ocorre menor formação de lodo, conforme a Tabela 1.3, e o lodo se apresenta estabilizado, o que caracteriza como sistema vantajoso em relação à produção e disposição final do lodo (SILVA, 2019).

Na Tabela 1.3 apresenta-se quantidade de lodo de uma ETE em litros por habitante dia produzido em cada tipo de sistema escolhido para tratamento do esgoto.

Tabela 1.3 - Quantidade de lodo de ETE gerado nos sistemas de tratamento.

Tipo de Sistema	Volume de LETE Gerado (L/hab.d)
Lagoas Facultativas	0,05 - 0,15
Reator UASB	0,2 - 0,6
Lodos ativados convencional	3,1 - 8,2
Aeração prolongada	3,3 - 5,6
Lagoa anaeróbia	0,1 - 0,3
Filtro biológico de alta carga	1,4 - 5,2
Lagoa aerada facultativa	0,08 - 0,22

Fonte: Metcalf et al. (2013)

De acordo com Silva (2019), as características do lodo de ETE gerado e armazenado nas lagoas de estabilização, variam em função do tempo de retenção do lodo. A remoção do lodo de ETE gerado nas lagoas deve ser feita com planejamento, pois existe a possibilidade de possuir alterações nas características do lodo. As principais técnicas de remoção do lodo de lagoas podem ser classificadas em mecanizadas ou não mecanizadas e com paralisação ou sem paralisação do funcionamento da água.

3.1.1 LODO DE ETE AERÓBIO

Dentre os processos de sistemas de tratamento de esgoto com presença de oxigênio, de onde provém o lodo de ETE aeróbio, podemos citar o com lodos ativados e variantes, lagoa aerada, lagoa aeróbica, lagoa facultativa, filtros biológicos aeróbios, biofiltros aerados, entre outros. Durante o processo de biodegradação aeróbia, a matéria orgânica sofre degradação na presença de oxigênio através da ação de microrganismos aeróbios ou facultativos. A via mais rápida é o processo de

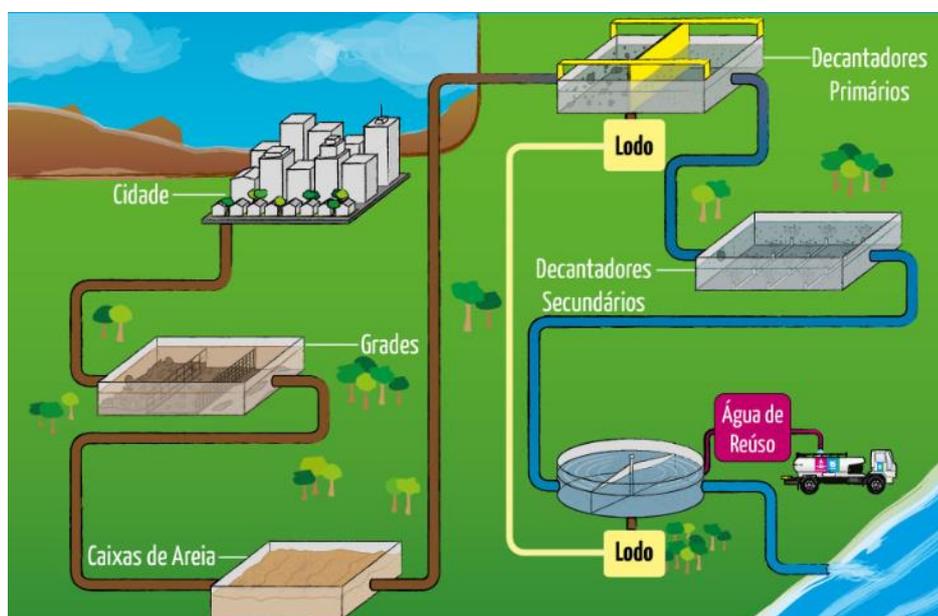
biodegradação aeróbio, porém o fornecimento de oxigênio deve ser ininterrupto (ANDREOLI; LARA; FERNANDES, 2001).

A matéria orgânica é removida através da adição de oxigênio no esgoto bruto por algumas horas, pelo processo de síntese em biomassa, pelo fato de a medida em que as bactérias metabolizam a matéria orgânica presente no esgoto, elas absorvem o oxigênio e liberam gás carbônico, multiplicando-se, adicionando grande produção de microrganismos ao lodo de ETE a ser biodegradado (HAMMER, 1979).

De acordo com Silva (2019), o lodo de ETE aeróbio, possui características distintas em reação ao lodo de ETE anaeróbio, inclusive características relacionadas a capacidade de desagamento e manejo.

Dentre os sistemas de tratamento numa ETE que resultam na produção de lodo aeróbio, temos na Figura 1.1 como exemplo, um esquema de como funciona o sistema por lodos ativados.

Figura 1.1 - Tratamento de esgoto por lodos ativados.



Fonte: Sabesp (2020)

3.1.2 LODO DE ETE ANAERÓBIO

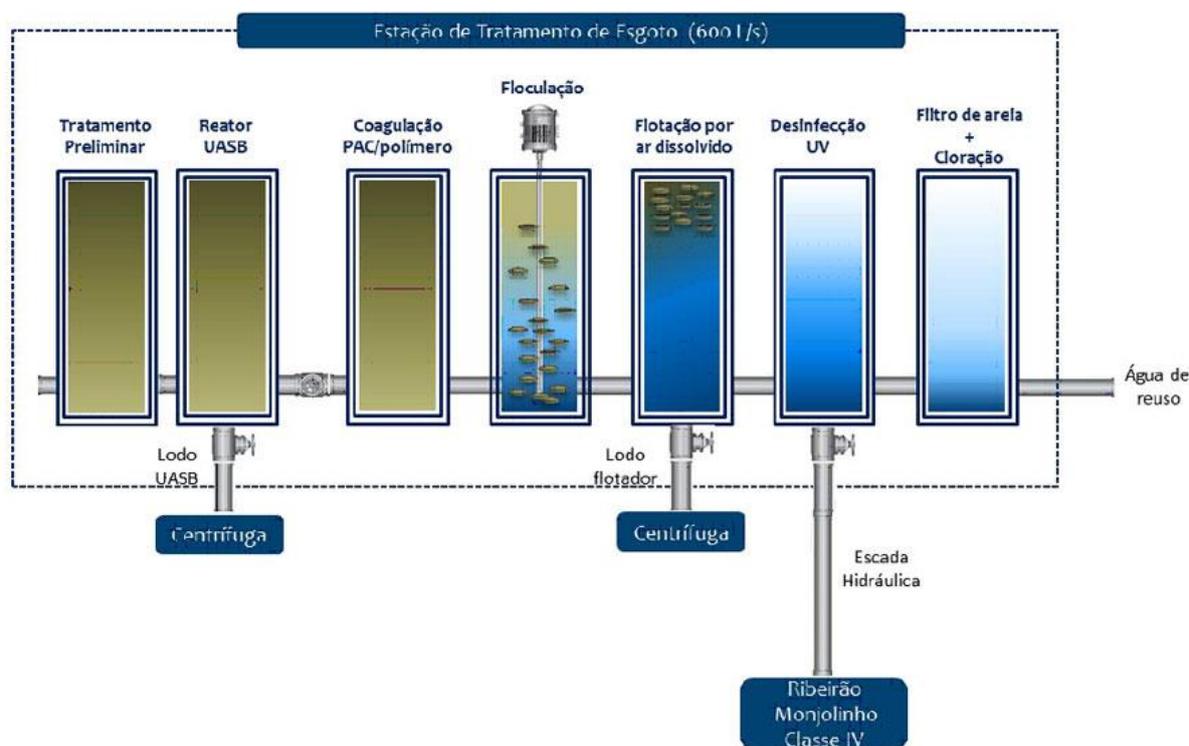
A Sanepar (1997), exemplifica o processo de biodegradação anaeróbia como inicialmente pela ausência de oxigênio, por meio da ação de microrganismos anaeróbios ou facultativos, e origina no momento em que o oxigênio dissolvido é consumido pelos microrganismos aeróbios.

Pode-se citar como exemplo de lodo de ETE anaeróbio o originado de reatores do tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB). Pelo fato dos processos acontecerem dentro do reator, ele dispensa

o uso de decantador primário e as etapas de adensamento e digestão. Entretanto, normalmente é necessária etapa de tratamento biológico complementar para atender aos requisitos de qualidade do efluente tratado (MORTARA, 2011).

De acordo com Silva (2019), dessa maneira, sistemas de tratamento que fazem uso de reatores UASB, necessitam apenas de desaguoamento e a secagem como processos de manejo do lodo de ETE. O lodo produzido no reator UASB já está adensado e digerido/estabilizado quando submetido ao desaguoamento. Encontram-se outras tipologias de tratamento que também geram lodo de ETE anaeróbio, como lagoas, filtros e reatores anaeróbios, entre outros. Na Figura 1.2, apresentam-se as etapas de um sistema convencional de uma ETE por reator UASB da cidade de São Carlos-SP.

Figura 1.2 - Tratamento de esgoto por reator UASB.



Fonte: SAAE São Carlos (2020).

3.2 GERAÇÃO E TRATAMENTO DO LODO DE ETA

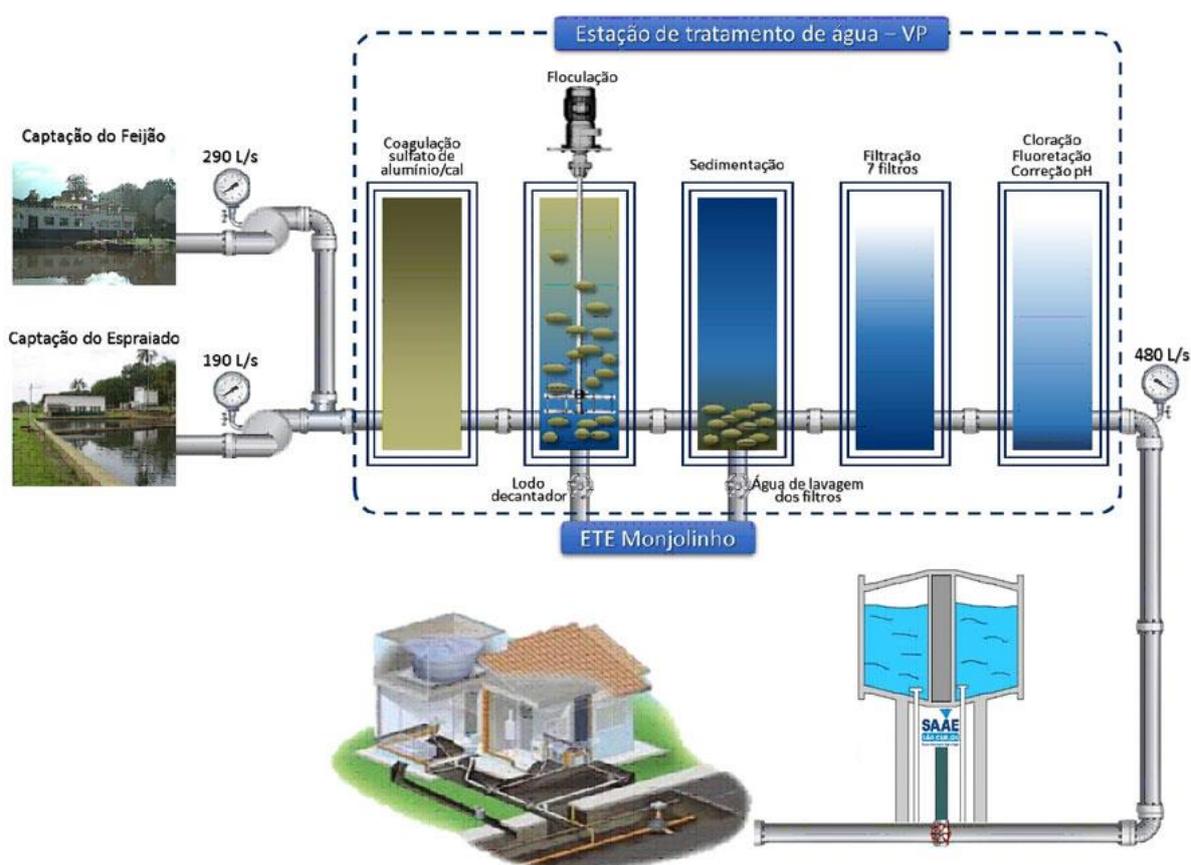
Segundo a AWWARF (2007), o processo de tratamento de água potável tem como meta a remoção de contaminantes, visando a distribuição para a população. Para cada tipo de método aplicado na ETA, o processo durante o tratamento gera diferentes tipos de resíduos: sólidos, líquidos ou gasosos.

De acordo com Libânio, (2010); Soares *et al.*, (2009), nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) brasileiras, o tratamento convencional é o mais utilizado para remoção de impurezas presentes

na água bruta, são compostos por três processos básicos: clarificação (coagulação, floculação e decantação/flotação), filtração e desinfecção.

Já segundo Tsutiya e Hirata, (2001); Di Bernardo e Sabogal-Paz, (2008), no Brasil os sistemas mais comuns utilizados são o convencional ou de ciclo completo. O sistema de ciclo completo é composto por coagulação, floculação, decantação ou flotação, filtração descendente, desinfecção e, conforme a necessidade, adição de flúor, ajuste de pH, dentre outros processos e operações. No quesito coagulantes, os mais utilizados são o sulfato de alumínio, hidróxido de ferro ou poli cloreto de alumínio (PAC). Além dos coagulantes, a casual utilização de cal, polímeros auxiliares a coagulação, oxidantes e carvão ativado nas ETA's alteram a composição dos lodos gerados. Na Figura 1.3 apresenta-se um exemplo de esquema de tratamento de água do tipo convencional da cidade de São Carlos-SP.

Figura 1.3 - Tratamento de água de tipo convencional.



Fonte: SAAE São Carlos (2020)

De acordo com Souza et al. (1999) e Soares *et al.*, (2009), a remoção dos sólidos presentes na água acontece nos decantadores, e por tal motivo, são nessas unidades que se gera o lodo. As características quantitativas e qualitativas desse resíduo variam de acordo com a qualidade da água bruta, o tipo e a quantidade de coagulante adicionado na etapa de coagulação, da eficiência dos

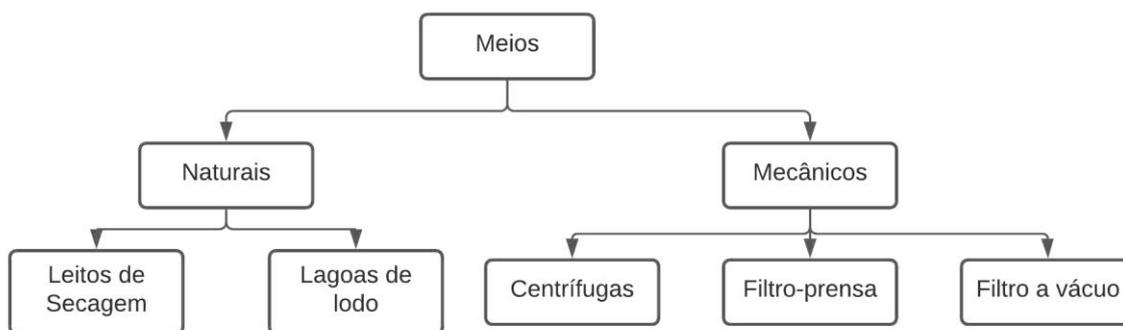
floculadores e decantadores. O lodo de ETA pode ser composto também de resíduos originados dos clarificadores, lavagem de filtros, recuperação da água de lavagem ou uma combinação dessas operações.

Segundo Cordeiro (1999), os lodos provenientes de decantadores possuem alto teor de umidade, geralmente superior a 95%, apresentando estado fluido, podendo também, conter elevada concentração de matéria orgânica. Portanto, o lodo de ETA é desaguado antes da disposição final, podendo esse processo ocorrer em leitos de secagem, adensadores, dentre outros mecanismos.

Dentre outras particularidades inerentes ao tratamento de lodos de ETA, podemos citar a variabilidade das características do resíduo e o potencial poluente dos mesmo em função da qualidade da água bruta e a variabilidade de produtos químicos e tecnologias usadas no processo de tratamento de água. Esses problemas fazem com que a solução acabe sendo individualizada, dificultando a definição e ações (REALLI, 1999; DI BERNARDO *et al.*, 2012).

O fluxo completo de tratamento de lodo, apresentado na Figura 1.4, contido no tratamento de água de ciclo completo, pode ser observado. Esse fluxo contém etapas como o adensamento, desaguamento e destinação ou disposição, dependendo das características do lodo (BERNARDO *et al.*, 2012).

Figura 1.4 - Formas de tratamento de lodo de ETA.



Fonte: Adaptado de Reali (1999)

Segundo Cordeiro (2001), os parâmetros utilizados na caracterização dos lodos de ETA podem estar associados com os aspectos ambientais necessários para sua disposição final, como o pH, sólidos, metais, biodegradabilidade, toxicidade, entre outros parâmetros. Além do mais, podem estar relacionados com os aspectos geotécnicos, como a remoção de água, para sua posterior utilização, o tamanho e distribuição das partículas, limites de consistência, resistência e sedimentabilidade.

A caracterização pode também mudar de acordo com o gerenciamento do lodo adotado, no processo de tratamento, de acordo com os fatores como a tecnologia de tratamento, tipo de dosagem de coagulante, características da floculação e filtração, características da dosagem de polímeros, uso de oxidante e carvão ativado pulverizado caso haja necessidade, método de limpeza dos decantadores e lavagem dos filtros, e demais de relevância específica (DI BERNARDO *et al.*, 2011).

De acordo com Varrelli (2008), a dosagem de polímeros pode influenciar na turbidez, alterando a concentração de lodo. O pH pode impactar na compressibilidade do lodo. A utilização de sais de ferro ou alumínio pode alterar as características do lodo, inclusive na concentração de sólidos.

Para Tsutiya e Hidrata (2001), é fundamental que a caracterização do lodo de ETA esteja associada com a alternativa de disposição/utilização desejada, e não apenas seguindo a caracterização de normas vigentes. Na Tabela 1.4 apresentam-se as possíveis parâmetros de caracterização de lodos de ETA que podem indicar a viabilidade de prováveis destinações adequadas ambientalmente.

Tabela 1.4 - Possíveis parâmetros de caracterização de lodos de ETA para destinação final.

Parâmetros Físicos	Unidade	Parâmetros Químicos	Unidade
Concentração de sólidos	%	Nitrogênio total	mg/kg
Cor		Fósforo total	mg/kg
Textura		Potássio	mg/kg
Teor de umidade	%	Nitrogênio Amoniacal	mg/kg
Granulometria	%	Nitrato/Nitrito	mg/kg
Limite de liquidez	% de umidade	Cálcio	mg/kg
Limite de plasticidade	% de umidade	Carbonato de Cálcio	%
Massa específica	kg/m ³	Metais	
Peso específico	kN/m ³	Radionuclídeos	
Retração		Matéria orgânica	
Ruptura por cisalhamento		Coliformes totais	
Perda ao fogo	%	pH	

Fonte: Adaptado de AWWA (1999) e Di Bernardo et al. (2012).

No item seguinte, serão apresentadas algumas caracterizações para lodos de ETA, como efeito de elucidar a forma como se comporta o lodo de ETA de acordo com um processo de tratamento específico.

Richter (2001), destaca que os lodos de ETA são predominantemente inorgânicos e que a concentração de sólidos totais do lodo, originados de tanques de decantação, situa-se na faixa de 1.000 a 40.000 mg/L e o lodo originado da lavagem de filtros, apresenta menor teor de sólidos, na ordem de 40 a 1.000 mg/L. De forma geral, a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) varia entre 30 a 300 mg/L. Na Tabela 1.5 exemplificam-se as porcentagens e taxas que compõem o lodo originado da coagulação com sulfato de alumínio.

Tabela 1.5 - Características do lodo de ETA utilizando sulfato de alumínio como coagulante.

Sólidos Totais (%)	Al ₂ O ₃ .5H ₂ O (%)	Inorgânicos (%)	Matéria Orgânica (%)	pH	DBO (mg/L)	DQO* (mg/L)
0,1-4	15-40	35-70	15-25	6-8	30-300	30-5000

DQO*: Demanda Química de Oxigênio/ DBO*: Demanda Bioquímica de Oxigênio.

Fonte: Richter (2001).

Cordeiro (1993), em seu estudo, realizou testes para se determinar a concentração dos metais de lodo de ETA na fase sólida. Os lodos analisados foram produzidos em três ETAs, localizadas no Estado de São Paulo. Os resultados são apresentados na Tabela 1.6.

Tabela 1.6 - Presença de metais no lodo originado da ETA em fase sólida.

Metais	ETA 1 (mg/L)	ETA 2 (mg/L)	ETA 3 (mg/L)
Alumínio	3695,00	391,00	325
Bário	-	0,22	0,18
Cádmio	0,14	0,02	0,02
Cálcio	142,00	-	0,08
Chumbo	2,32	0,20	0,30
Cloreto	-	35,00	36,30
Cobre	1,47	0,12	0,20
Cromo Total	3,82	0,06	0,09
Ferro Total	3381,00	129	166
Ferro Solúvel	0,00	6,14	0,12
Magnésio	27,00	2,87	1,38
Manganês	1,86	7,80	3,44
Manganês Solúvel	-	4,57	1,00
Níquel	2,70	0,14	0,12
Potássio	49,97	7,37	7,55
Sódio	311,00	29,30	63,00
Zinco	2,13	0,70	0,98

Fonte: Adaptado de Cordeiro (1993).

Segundo Cordeiro *et al.*, (2013), a destinação dos resíduos de ETA continua significando um importante problema, pois na prática, boa parte dos resíduos continuam retornando ao corpo receptor, que fornece a água bruta as estações.

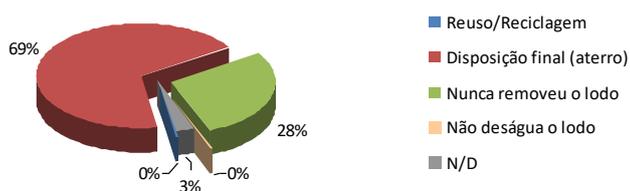
3.3 DESTINAÇÕES DO LODO DE ETA E ETE

De acordo com a NBR 10004/2004, tanto o lodo de ETA quanto o de ETE são classificados como resíduos sólidos, e para Silva *et al.*, (2012) e Lucena *et al.*, (2014) são classificados como não tóxico de “Classe II-A” (não inerte).

A Lei nº 12305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), determina que o resíduo sólido deve possuir uma disposição final ambientalmente adequada, e define isso como a destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes.

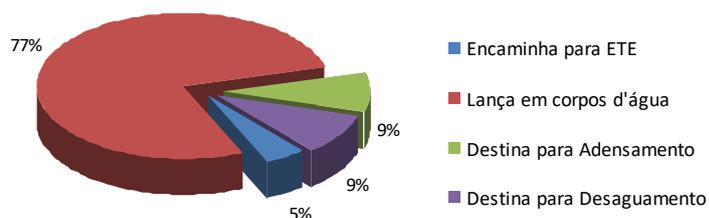
Em seu estudo, Achon *et al.*, (2016), apresentou um panorama geral das destinações dos lodos de ETA e ETE, em uma mesma Sub-Bacia Hidrográfica localizada no Estado de São Paulo, baseado nas diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei 12305/2010 e analisou os desafios da gestão destes resíduos no Brasil. Como resultado, obteve os gráficos apresentados nas Figuras 1.5, 1.6, 1.7 e 1.8.

Figura 1.5 - Destinação do lodo de ETA em 22 ETAs de uma mesma sub-bacia localizada no Estado de São Paulo, Brasil.



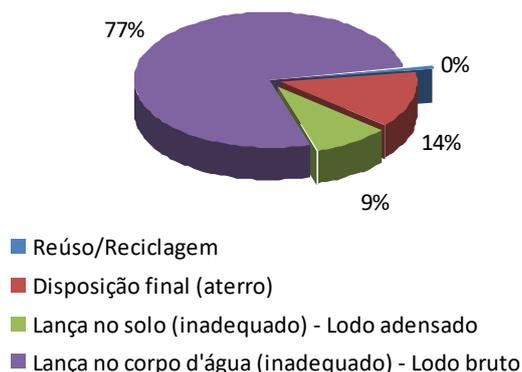
Fonte: Achon, (2016).

Figura 1.6 - Disposição final do lodo de ETA em 22 ETAs de uma mesma sub-bacia localizada no Estado de São Paulo, Brasil.



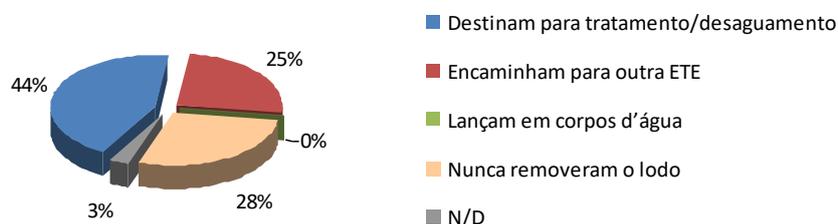
Fonte: Achon, (2016).

Figura 1.7 - Destinação do lodo de ETE em 32 ETEs de uma mesma sub-bacia localizada no Estado de São Paulo, Brasil.



Fonte: Achon, (2016).

Figura 1.8 - Disposição final do lodo de ETE em 32 ETEs de uma mesma sub-bacia localizada no Estado de São Paulo, Brasil.



Fonte: Achon, (2016).

3.4 REMOÇÃO DE ÁGUA DO LODO DE ETA E ETE

Segundo o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo (2014), a gestão dos resíduos representa de 20% a 60% dos custos operacionais de uma planta de tratamento, e o objetivo de se buscar a universalização do saneamento no estado aumentará paulatinamente as quantidades de lodo geradas.

A remoção de água do lodo, tanto de ETA quanto de ETE, é um processo essencial, do ponto de vista gerencial do lodo, pois boa parte de seu volume é constituído por água, e que precisa ser extraída de sua massa de acordo com cada possível destinação proposta para esses resíduos. Devendo assim, estar de acordo com os padrões de qualidade final do produto ao qual o lodo será inserido. Garantindo sua destinação adequada ambientalmente, preconizado pela Lei nº 12305/2010.

Segundo Achon *et al.*, (2008), as tecnologias para redução do volume de lodo gerado pelas ETA's, através da remoção de água livre e nos interstícios dos sólidos, são classificadas por: Sistemas

Mecânicos (por exemplo centrífugas, filtros-prensa, prensa-desaguadora, filtros e vácuo) e Sistemas Naturais (por exemplo lagoas de lodo e os leitos de secagem).

Todavia, de acordo com Kuroda *et al.*, (2014), para o desaguamento do lodo de ETA, os sistemas naturais têm obtido maior importância em comparação aos sistemas mecânicos, por conta de seu menor custo de implantação e manutenção, facilidade de operação e pelo desprezo de recursos como energia elétrica e produtos químicos, diminuindo os custos de gestão.

No caso do desaguamento do lodo de ETE, através de sistemas de secagem naturais, os leitos de secagem são citados e recomendados pela NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. E de acordo com Posseti *et al.*, (2015), a secagem térmica tem sido destacada como o método capaz de otimizar rotinas e reduzir custos operacionais, característicos do ponto de vista do gerenciamento. Devido a essa técnica proporcionar, ao mesmo tempo, a diminuição do volume e a higienização dos materiais, não necessitando o uso de produtos químicos.

3.4.1. CONCEITOS DE REMOÇÃO DE ÁGUA DO LODO DE ETA E ETE

Segundo David (2002), a remoção de água é o processo no qual se remove um líquido aderido a um sólido, para um meio gasoso estabelecido por meio da vaporização térmica, ocasionado pela temperatura inferior à de ebulição do líquido na pressão do sistema.

Para Pinheiro (2012), essa remoção de umidade nada mais é que empregar calor ao lodo, com o objetivo de evaporar a umidade contida nele, e conseqüentemente, elevar a concentração de sólidos totais.

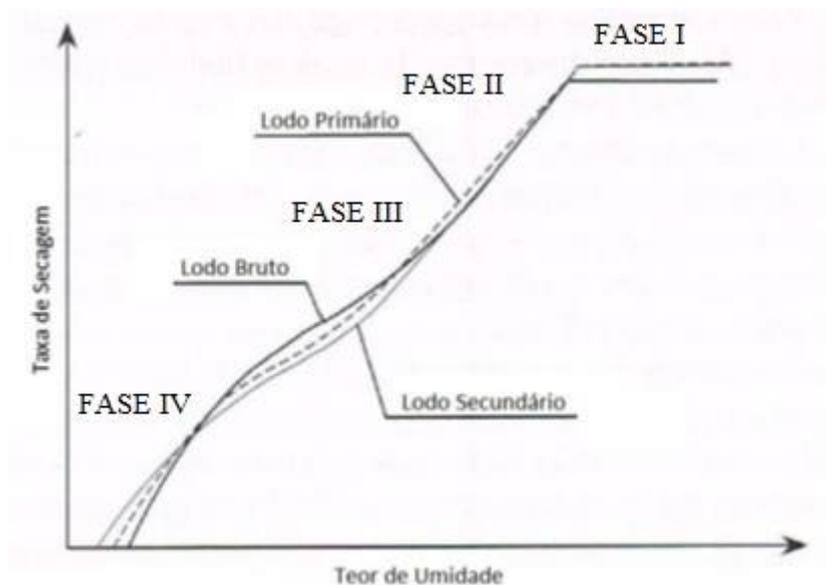
Segundo Sanin *et al.* (2010), a remoção de água retira também organismos patogênicos e estabiliza o lodo pela inserção de calor, eliminando assim as etapas de estabilização biológica e higienização do tratamento, obtendo um lodo com mais estabilidade e higienizado.

O processo de remoção de umidade acontece através da transferência de calor e massa entre o lodo e o ar, por meio de movimentos da umidade da área mais concentrada para a área de menor concentração, sendo a difusão o fenômeno causador desse movimento. Entretanto, a transferência de umidade não é linear até o encerramento da secagem, a taxa da mesma pode variar em relação ao tipo de lodo e secador. (SANIN *et al.*, 2010).

Segundo Sanin *et al.*, (2010), existem quatro etapas durante o processo de remoção de água. Na primeira, de uma maneira geral, a taxa de secagem se mantém constante, pois ela não apresenta remoção da água livre presente no lodo. Durante a segunda etapa, apresenta-se uma taxa decrescente de secagem, que significa a remoção da água intersticial. Na terceira etapa, a taxa de secagem permanece decrescendo, e a água vicinal ou de superfície começa a ser removida, que é a camada de moléculas de água ligadas a superfície das partículas sólidas por ligações de hidrogênio. Por último na quarta etapa, a taxa passa para zero, representando que toda a água que deveria ser removida a temperatura atual já

foi evaporada, mantendo no lodo somente a água quimicamente ligada. Um esquema das fases de variação da taxa de secagem pode ser visto na Figura 1.9.

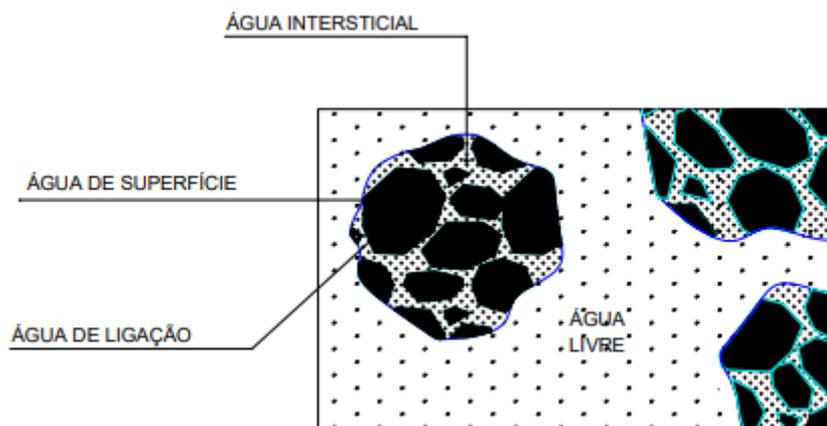
Figura 1.9 - Fases de remoção de água do lodo.



Fonte: Adaptado de Sanin, *et al.*, (2010).

A Figura 2.1 exemplifica de forma análoga ao gráfico anterior, as águas presentes numa partícula de lodo genérica, de modo que cada uma é retirada por fases de remoção de umidade diferentes.

Figura 2.1- Distribuição da água no lodo.



Fonte: TSANG & VESILIND (1990) apud IDE (1994).

Ainda segundo Sanin *et al.*, (2010) a energia essencial para o aquecimento irá variar por conta da umidade inicial e final do lodo, equipamento adotado, eficiência do equipamento, o aproveitamento ou reaproveitamento da energia vinda de outro processo dentro da estação de tratamento, etc.

Para David (2002), o objetivo principal da secagem térmica é a diminuição da quantidade de água presente na massa de lodo, com a intenção de reduzir o custo de transporte caso seja necessário o transporte para outra área, além de remover organismos patogênicos presentes. Os teores de sólidos podem chegar até a ordem de 90% a 95%, reduzindo assim substancialmente a massa dos lodos.

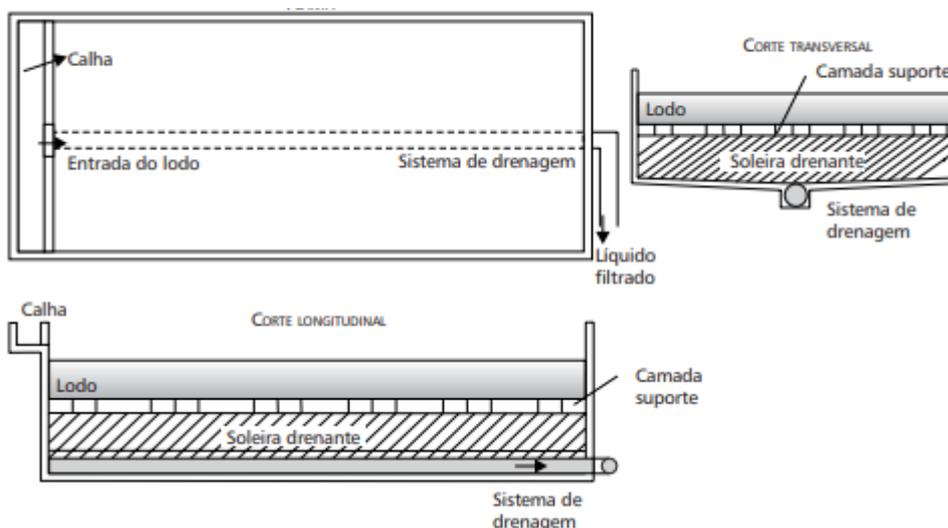
Ainda segundo o mesmo autor, existe uma diferença quanto classificação de procedimentos, os processos mecânicos de separação entre um sólido e um líquido, como prensagem, filtração e centrifugação, devem ser considerados como desaguamento, deixando o termo secagem para etapas que possuem a separação do líquido de um sólido por evaporação.

3.4.2. SECAGEM TÉRMICA NATURAL

O processo de secagem térmica natural ocorre por meio de leitos de secagem, que segundo Achon *et al.*, (2008) tem sido utilizada para retirada da água presente nos resíduos de estações de tratamento de águas residuárias e de abastecimento, desde a primeira metade do século XX., e a partir dessa época, vem sofrendo poucas alterações em sua estrutura física.

Segundo Gonçalves (2001), o leito de secagem é regulamentado pela NB 570/1990 – Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário – ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), nele são indicados normalmente em cidades de pequeno porte, com ETE's com população equivalente até 20.000 habitantes, localizadas em áreas afastadas da zona urbana. A drenagem e a evaporação atuam no processo remoção de água do lodo no leito, nas primeiras 72 horas, a drenagem tem papel fundamental na eliminação do líquido, após esse tempo, o lodo possui uma consistência pastosa e a perda de líquido passa a ocorrer pela evaporação superficial. Além das características físicas do lodo, as condições climáticas também influenciam o comportamento deste tipo de processo. Na Figura 2.2 tem-se um esquema de leito de secagem, de acordo com os parâmetros normativos.

Figura 2.2- Esquema de um leito de secagem de lodo.



Fonte: Gonçalves (2001).

Cordeiro (1993) e (2001), avaliou em seu estudo a alternativa de modificação do leito de secagem tradicional, e verificou que a inserção de manta geotêxtil sobre a camada filtrante do leito, promovia a retirada mais eficiente da água livre dos lodos. Os resultados alcançados, demonstraram que a espessura da camada filtrante e da areia não eram importantes na remoção da água livre.

Cordeiro (2001) propôs um leito modificado, de modo que a areia foi retirada e o leito constituído de uma camada de brita 01 com 5 cm e sobre ela manta geotêxtil. Como resultado, obteve-se uma diminuição do tempo de drenagem da água livre, recebendo a denominação de leito de drenagem.

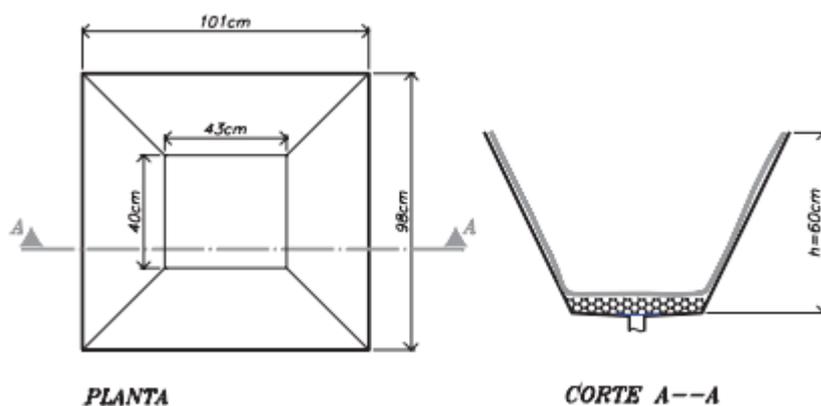
Achon e Cordeiro (2004), avaliaram os sistemas naturais de redução de volume, comparando um sistema de lagoas de lodo de uma ETA convencional de ciclo completo, com o leito de drenagem. Observaram que, na lagoa de lodo, a remoção de água era mais difícil, por conta de sua concepção, levando semanas ou até meses para secagem do lodo. O que não ocorreu com os leitos de drenagem, verificando reduções de 75% a 85% do volume de lodo em 7 dias. Sendo assim, constataram que o desempenho e conseqüentemente, o potencial de aplicação do leito de drenagem, são superiores as lagoas de lodo em vários aspectos. Nas Figuras 2.3 e 2.4 apresentam-se o modelo do protótipo, denominado leito de drenagem, utilizado e suas dimensões projetadas.

Figura 2.3 - Protótipo de leito de drenagem desenvolvido por Cordeiro (2001).



Fonte: Achon *et al.*, (2008).

Figura 2.4 - Dimensões do leito de drenagem usado nos ensaios por Cordeiro (2001).



Fonte: Achon *et al.*, (2008).

O método de secagem natural por lagoas de lodo, segundo Achon *et al.*, (2008), pode ser utilizado quando há disponível uma área de menor custo. Ela ocorre em três fases: retirada da água sobrenadante, evaporação e transpiração. Em seu projeto, contém: sistema de tubulações para entrada do lodo e saída do decantado, sistema de bombeamento, caso haja necessidade, e equipamentos para remoção mecânica do lodo. Quando a remoção do líquido sobrenadante não é mais possível, por meio das instalações do sistema, essa passa a ser retirado por evaporação. Esse tempo de secagem pode ter uma variação considerável, de acordo com as condições climáticas do período e de operação.

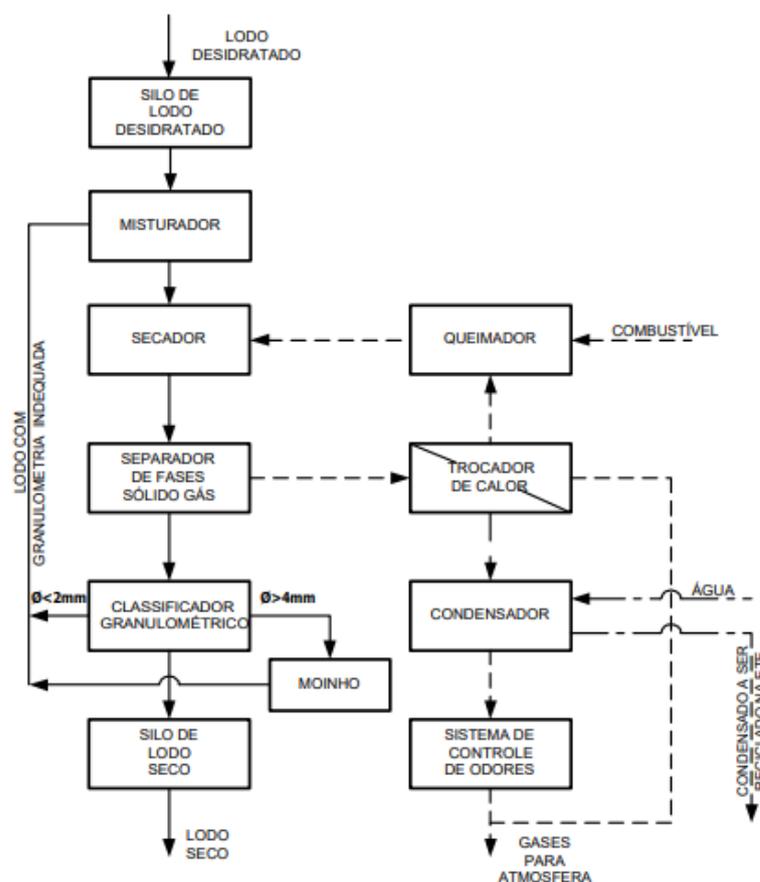
3.4.3. SECAGEM TÉRMICA MECÂNICA

A secagem mecânica ocorre através de equipamentos automatizados, que utilizam da energia gerada pelos mesmos em forma de calor, para retirada da água do lodo e redução de seu volume para transporte e disposição final, ambientalmente adequado.

David (2002) ressalta que um sistema de secagem térmica mecânica é constituído não apenas pelo secador, mas também por outros dispositivos como: silos de armazenagem do lodo com remoção de umidade e seco, sistema de mistura e alimentação de lodo, moinho, peneiras, queimador de combustível para geração de calor, condensador, sistema de remoção de pó, sistema de controle de odores e gases emitidos para a atmosfera, e, por fim, equipamentos para transporte ou transferência do lodo entre os diversos componentes.

Na Figura 2.5 mostra-se um esquema de um sistema de secagem térmica mecânica, para lodo de ETE, que tem o objetivo secar e granular o lodo entre 2 a 4 mm, transformando-o em um biossólido para uso como fertilizante na agricultura.

Figura 2.5 - Esquema de um sistema de secagem.



Fonte: CEEJ (1998) apud David (2002)

Existem três formas de secagem térmica mecânica, para Pinheiro (2012), utilizadas pelos equipamentos, mostrados a seguir:

a) Por convecção: Também chamada de secagem direta, é quando existe contato direto entre o lodo e os meios de transferência de calor, como os gases aquecidos.

b) Por condução: Denominado também como secagem indireta, o lodo não fica em contato direto com a fonte de calor, ocorrendo através de placas de troca térmica.

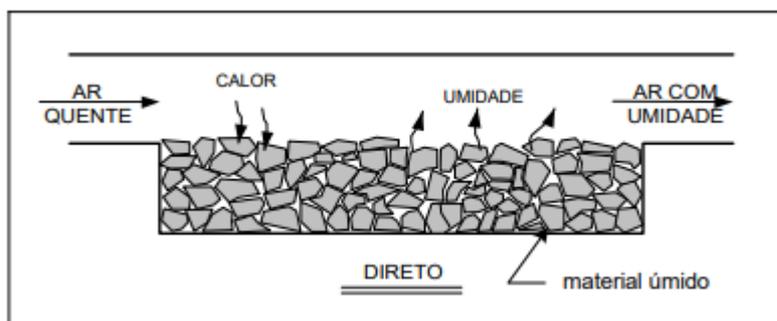
c) Por radiação: Emprega energia radiante como fonte de calor.

Sperling *et al.*, (2001), diz que a secagem se divide apenas em dois grupos, o de secagem direta e indireta. Porém, para todos os sistemas, há a necessidade de equipamentos de confinamento e tratamento dos vapores e poeira disponibilizados pelos secadores, prevenindo a emissão destes gases nocivos ao ambiente.

Sanin *et al.*, (2010), relata ainda os secadores mistos, onde a secagem acontece em convecção e também por condução.

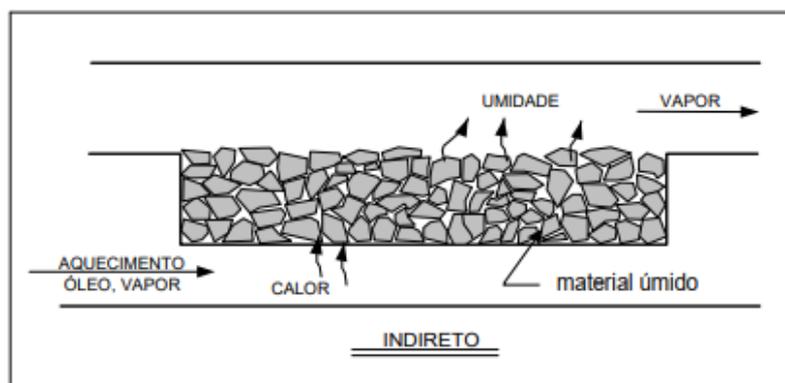
David (2002) classifica os secadores mecânicos apenas em: secadores diretos, indiretos e por radiação, conforme as Figuras 2.6 e 2.7.

Figura 2.6 - Secagem direta.



Fonte: David (2002).

Figura 2.7- Secagem indireta.



Fonte: David (2002).

Para esses conceitos de secagem mecânica, atualmente, existem diversos modelos de secadores disponíveis, podemos citar: secadores rotativos, secadores transportados por esteira, secadores por transporte pneumático, secadores por soleiras múltiplas, secadores pulverizadores, secadores de leito fluidizado e etc.

Segundo David (2002), a secagem térmica mecânica é um processo de custo elevado, do ponto de vista da operação, pois além da necessidade de combustível para geração de calor, necessita de mão de obra especializada para manuseio e controle. Durante o processo de secagem, o lodo é aquecido para promover a evaporação de água, sendo levado até um ponto abaixo ao de remoção da matéria orgânica, sendo assim, apenas água é removida.

3.5 USOS BENÉFICOS DO LODO DE ETA E ETE

De acordo com Urban (2019), o lodo de ETA por conta de suas propriedades minerais, em parte composta por argilominerais, teve sua aplicação avaliada em estudos, com maior ou menor assertividade no setor ceramista (MONTEIRO et al., 2008; SILVA e FUNGARO, 2011; TARTARI et al., 2011; CORNWELL e ROTH, 2011; KIZINIEVIC et al., 2013; SILVA et al., 2015), em obras geotécnicas (RAGHU et al., 1987; SOCKANATHAN, 1991; WANG et al., 1992; FADANELLI e WIECHETECK, 2010; BASHAR et al., 2016), na fabricação de blocos de concreto para vedação (CHÁVEZ-PORRAS et al., 2008); na fabricação de cimento Portland (HOPPEN et al., 2006; KYNCL, 2008; DAHHOU et al., 2018); na aplicação em áreas degradadas (TEIXEIRA e MELO, 2007; MOREIRA et al., 2009); como condicionador de solo na silvicultura -eucaliptos (CORNWELL et al., 2000), como condicionador (LAI e LIU, 2004; YANG et al., 2006; BABATUNDE e ZHAO, 2009) e na agricultura (VERLICCHI e MASOTTI, 2001; BOTERO et al., 2009); o lodo de ETA pode ter efeito benéfico em sistemas de esgoto no controle de H₂S (AWWARF, 2007) e na remoção de fósforo (GEORGANTAS e GRIGOROPOULOU, 2005; MORTULA e GAGNON, 2007; BABATUNDE e ZHAO, 2010; CHAO et al., 2011; GIBBONS e GAGNON, 2011; ZHAO et al., 2011). A recuperação de coagulantes também é um uso tecnicamente viável (KYNCL, 2008; SILVA e DANIEL, 2010; DASSANAYAKE et al., 2015), mas não há relato sobre experiências em escala real de longo prazo.

Pesquisas relacionados à área de geotecnia foram realizados com lodos de ETA e ETE desde a década de 1990, esses estudos tiveram como proposta: I) Obter parâmetros de projetos para aterros exclusivos; II) Verificar o comportamento geotécnico de dados em aterros sanitários; III) Avaliar seu uso em obras de terra. (URBAN, 2019).

De acordo com Urban (2019), Balkaya (2015), indica o uso de ETA, sozinho ou misturado com zeólitas, para a construção de diques, *Wetlands*, unidades de confinamento de sedimentos contaminados, sub-base de pavimentos e camada de cobertura e de revestimento de aterro sanitário.

Babatunde e Zhao (2007) também citam o uso de lodo de ETA incorporado em mistura betuminosa em obras de pavimentação, como material estabilizado na sub-base de rodovia.

Para o caso do lodo de ETE, as destinações possíveis deste resíduo sólido devem ser avaliadas com cautela, para que não tenha risco ambiental e sanitário; (URBAN, 2019).

Segundo Urban (2019), o uso mais utilizado para o lodo de ETE é na reciclagem agrícola, porém desconsiderando as formas de disposição final (aterro sanitário) e formas de tratamento como a incineração, outras são relatadas na literatura: recuperação de áreas degradadas; matéria-prima de composto orgânico; aplicação em telhados verdes; controle de erosão; utilização em solo de silvicultura; uso em fornos de cimento; fabricação de materiais de construção; pavimentação; cobertura diária e final de aterro sanitário (BEECHER, 2008; CHEN e KUO, 2016). Chen et al. (2018) também apontam potencial técnico e econômico para o uso como matéria-prima na produção de biodiesel.

3.6 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS

No Brasil, o órgão responsável pela manutenção, ampliação, construção, fiscalização e elaboração de estudos técnicos para resolução de questões relacionadas ao sistema federal de viação como de tráfego multimodal de pessoas e bens, nos modais ferroviário, hidroviário e rodoviário, em nível federal, é o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, o DNIT. Nos estados da federação, é o Departamento de Estradas de Rodagem, o DER e em nível municipal, os órgãos municipais.

Portanto, é a partir desses órgãos que se define a estrutura de pavimentação, as características, propriedades, procedimentos e métodos utilizados nas rodovias brasileiras, assim como os padrões de qualidade, de acordo com cada tipo de tráfego, seja ele leve, intermediário ou pesado.

Em seu manual de pavimentação, o DNIT (2006), define como pavimento de uma rodovia uma superestrutura que contém um sistema de camadas de espessuras finitas, inseridas sobre um espaço infinito, definido como a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é denominado subleito.

De acordo com o DNIT (2006), os pavimentos são classificados em:

-Flexível: onde acontece a deformação elástica significativa em todas as camadas pelo carregamento aplicado, sendo assim, a carga diminui sua intensidade conforme o aumento da profundidade.

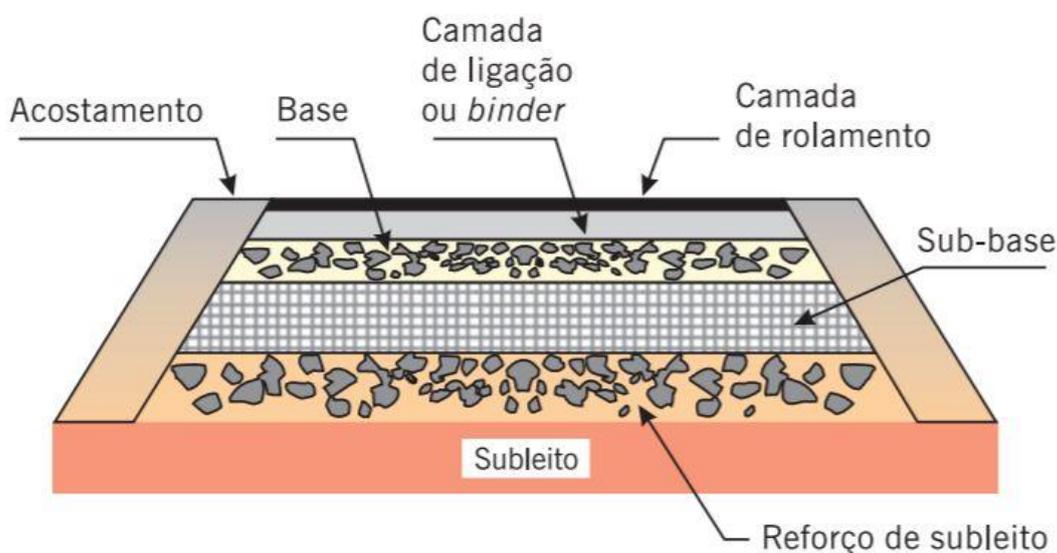
-Semi-rígido: é descrito como uma base cimentada por algum aglutinante com características cimentícias como exemplo, camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.

-Rígida: é um revestimento que absorve todas as tensões originadas do carregamento sobre ele. Sendo assim, possui uma alta rigidez em relação as camadas abaixo dela.

Segundo Bernucci (2010), as estruturas dos pavimentos são constituídas de camadas assentadas sobre uma fundação, denominada subleito, e seu comportamento estrutural está relacionado à espessura de cada uma das camadas, à rigidez destas e do subleito, assim como as relações entre as diferentes camadas do pavimento.

Os pavimentos flexíveis são constituídos por uma camada superficial de revestimento asfáltico, sobre uma camada de base, de sub-base e de reforço de subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem aditivos a base de cimento. A partir do volume de tráfego, da resistência do subleito, da rigidez e espessura das camadas, e condições ambientais, uma ou mais camadas podem ser retiradas. (BERNUCCI, 2010). Na Figura 2.8 apresenta-se um esquema estrutural de como é um pavimento flexível tipicamente utilizado.

Figura 2.8- Estrutura típica de um pavimento flexível.



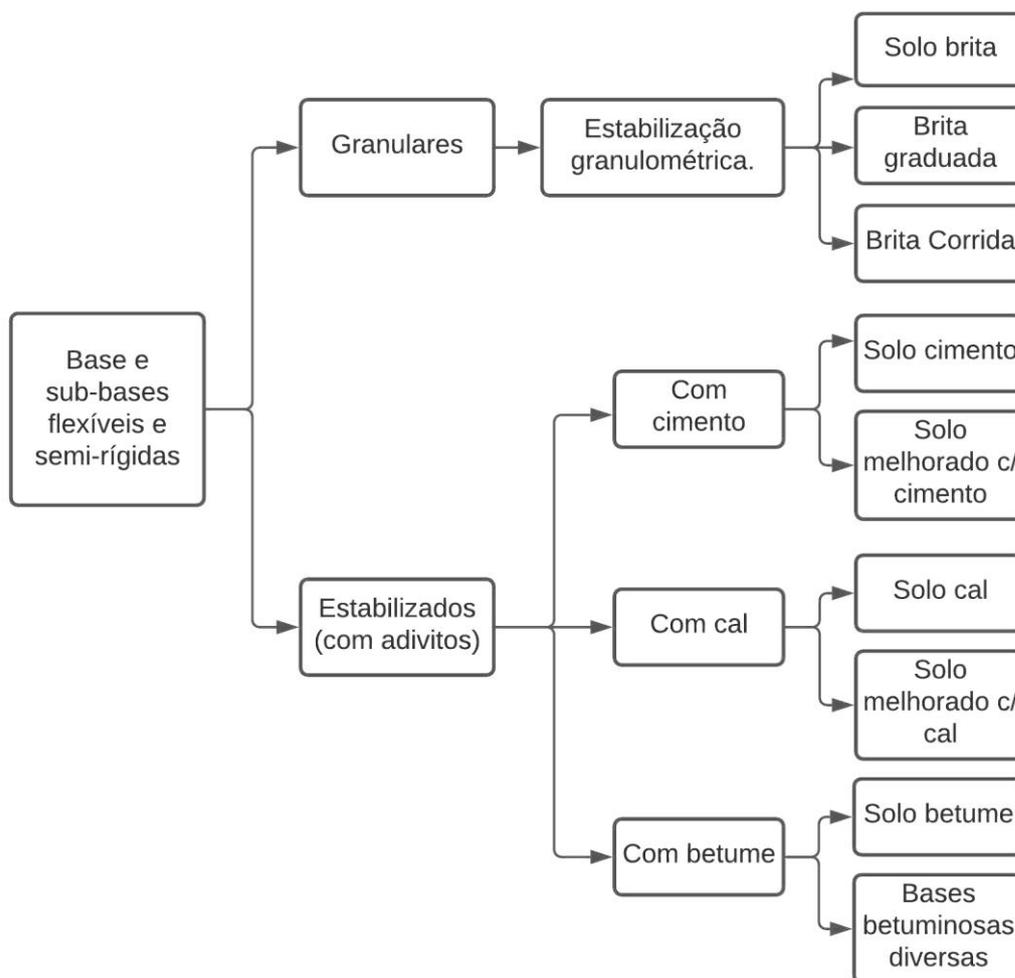
Fonte: Adaptado de Bernucci (2010).

Segundo Bernucci (2010), diversos autores têm empregado a terminologia de pavimentos semirrígidos para aqueles com revestimentos asfálticos que possuam em sua base ou sub-base materiais cimentados, que também são solicitados à tração.

3.6.1. BASES E SUB-BASES FLEXÍVEIS E SEMI-RIGIDAS

De acordo com DNIT (2006), as bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas podem ser classificadas nos seguintes tipos, conforme a Figura 2.9.

Figura 2.9 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas.



Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

Segundo Bernucci (2010), os materiais mais empregados em pavimentação da classe dos granulares e solos são: brita graduada simples (BGS) e bica ou brita corrida; macadame hidráulico; macadame a seco; misturas estabilizadas granulometricamente; solo-agregado; solo natural; solo melhorado com cimento ou cal, ressaltando a existência também de outros materiais de uso corrente em pavimentação, originados da reutilização e reciclagem, são eles: escória de alto-forno; agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil e demolições; rejeitos de extração de rochas ornamentais; mistura asfáltica fresada etc.

Para os materiais cimentados, pode-se citar: brita graduada tratada com cimento (BGTC); solo-cimento; solo-cal; solo-cal-cimento; concreto rolado (CCR – concreto compactado a rolo), para as misturas asfálticas são: solo-asfalto; solo-emulsão; macadame betuminoso e base asfáltica de módulo elevado. (BERNUCCI, 2010).

3.6.2. BASES E SUB-BASES GRANULARES

De acordo com DNIT (2006), existem dois tipos: com estabilização granulométrica e macadames hidráulico e seco. Na estabilização granulométrica, sua constituição é caracterizada por solos, britas e rochas, de escória de alto forno, e por fim pela mistura desses materiais. As camadas, são de totalmente granulares, sempre flexíveis, e estabilizadas granulometricamente pela compactação de um material ou mistura de materiais que possuem granulometria compatível e índices geométricos específicos, de acordo com as especificações.

O macadame hidráulico é definido como uma camada de brita de graduação aberta de tipo especial (ou brita tipo macadame), onde após sua compressão, tem seus vazios ocupados pelo material de enchimento, constituídos de pó de pedra ou também por solos de granulometria e plasticidade apropriadas, já o macadame seco, ao ser desnecessário a irrigação, simplifica o processo construtivo, evitando o encharcamento do subleito (DNIT, 2006).

3.6.3. BASES E SUB-BASES ESTABILIZADAS (COM ADITIVOS)

Estas camadas possuem, em sua maioria, procedimentos tecnológicos e construtivos similares às granulares por estabilização granulométrica, porém com diferenças em apenas alguns detalhes, segundo o DNIT (2006), que são citados a seguir:

-Solo-Cimento: mistura compactada de solo, cimento Portland e água, devendo satisfazer a certos parâmetros de densidade, durabilidade e resistência, como resultado tem-se um material duro, cimentado, de elevada rigidez à flexão. Sendo seu teor de cimento adotado na ordem de 6% a 10%.

-Solo melhorado com cimento: obtida através da adição de pequenos teores de cimento, 2% a 4%, com o objetivo de modificar o solo na questão de maior plasticidade e sensibilidade a água, sendo considerado uma mistura flexível.

-Solo-Cal: uma mistura de solo, cal e água, algumas vezes cinzas volante, uma pozolana artificial. Sendo seu teor cal mais frequente de 5% a 6%, seu processo de estabilização acontece por três maneiras, por modificação do solo, por carbonatação e por pozolanização, de acordo com o teor de cal usado, a natureza do solo utilizado e o teor de cinza volante. São considerados misturas semi-rígidas.

-Solo melhorado com cal: predomina os efeitos quando se obtém um solo flexível, com teores de cal inferiores ao citados anteriormente;

-Solo-Betume: uma mistura de solo, água e material betuminoso, sendo considerado uma mistura flexível;

-Bases betuminosas diversas: São descritas como revestimentos betuminosos, pois as técnicas construtivas e os materiais empregados são idênticos.

3.6.4. BASES E SUB-BASES RÍGIDAS

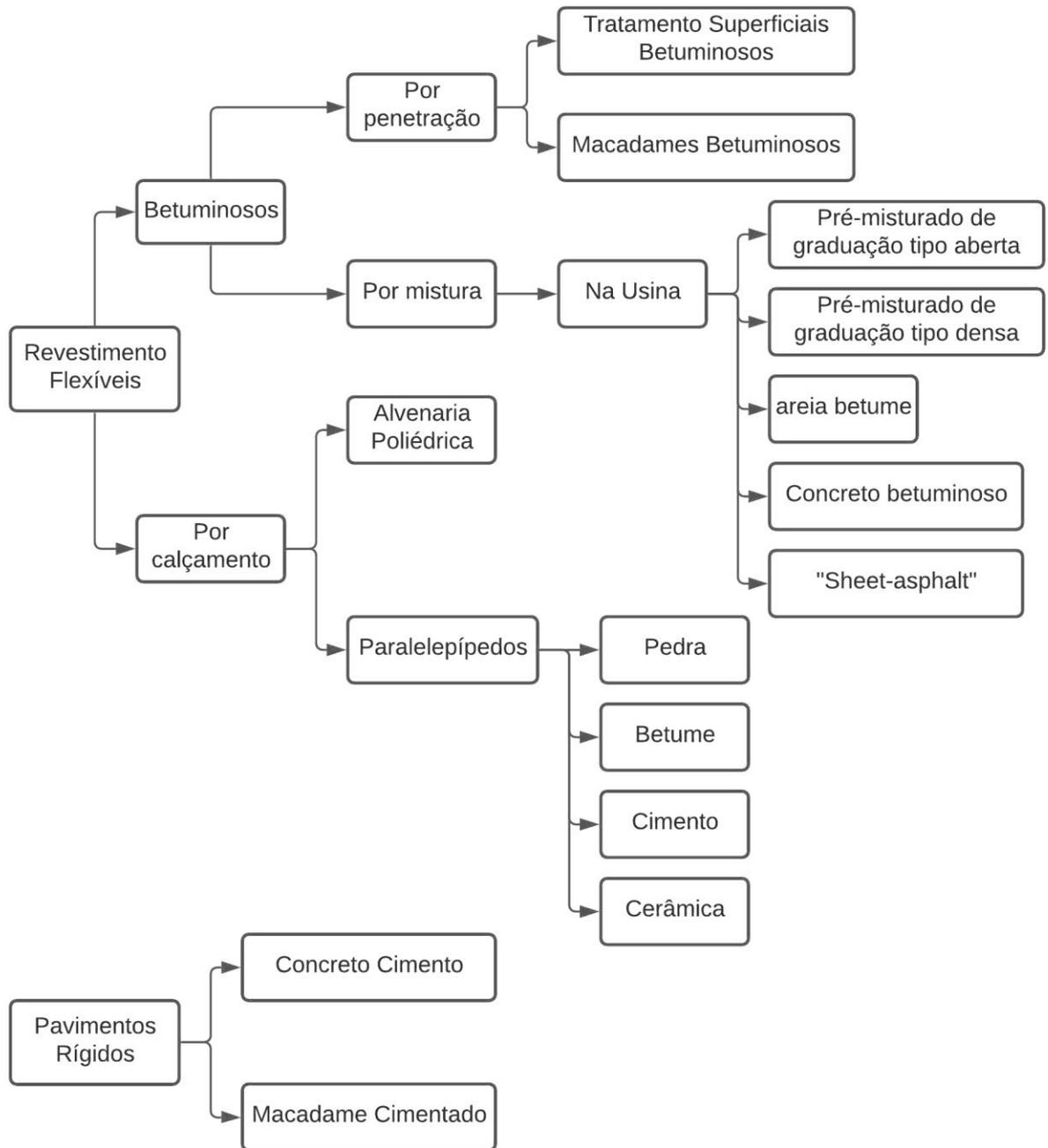
São camadas de concreto de cimento, possuem elevada resistência a tração, importante para o dimensionamento do pavimento, e podem ser classificadas em dois tipos de concreto, de acordo com o DNIT (2006):

- Concreto plástico: próprio para serem adensados por vibração manual ou mecânica;
- Concreto magro: similar aos usados em fundações, no que se refere ao pequeno consumo de cimento, mas com consistência devida a compactação com equipamentos rodoviários.

3.6.5. REVESTIMENTOS

De acordo com DNIT (2006), os revestimentos podem ser classificados nos seguintes tipos, conforme apresenta-se na Figura 3.1.

Figura 3.1- Classificação dos revestimentos.



Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

De acordo com Bernucci (2010), o revestimento é a camada que tem como função receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática, sendo assim, ela deverá ser o mais impermeável possível e resistir aos esforços de contato com o pneu no pavimento, em movimento. Esforços esses que variam de acordo com a carga e a velocidade dos veículos.

O material do revestimento tem a opção de ser fabricado em usina específica (misturas usinadas), fixa ou móvel, ou preparado na própria pista (tratamentos superficiais). Os revestimentos são

também categorizados quanto ao tipo de ligante: a quente com o uso de Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP), ou a frio com o uso de Emulsão Asfáltica (EAP). As misturas podem ser classificadas quanto a distribuição granulométrica em: densas, abertas, contínuas e descontínuas. BERNUCCI (2010).

3.6.6. REVESTIMENTOS FLEXÍVEIS BETUMINOSOS

Segundo o DNIT (2016) os revestimentos betuminosos são compostos por um conjunto de agregados e materiais betuminosos. Essa associação pode ser realizada por duas formas: penetração e mistura.

- Revestimentos por Penetração: Este tipo contém duas maneiras diferentes, por penetração invertida e por penetração direta.

- Revestimentos Betuminosos por Penetração Invertida: São os revestimentos feitos por meio de uma ou mais aplicações de material betuminoso, com uma sequência de mesmo número de operações de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometrias adequadas.

De acordo com o número de camadas tem-se os denominados, tratamento superficial simples, duplo ou triplo.

-Revestimentos Betuminosos por Penetração Direta: São feitos por meio do espalhamento e compactação de camadas de agregados com granulometria adequada, sendo cada camada posterior a compressão sujeito a uma aplicação de material betuminoso e recebendo, por fim, uma camada final de agregado miúdo. Como exemplo deste tipo de revestimento, temos o Macadame Betuminoso.

-Revestimentos por Mistura: Nesta categoria, o agregado é pré-envolvido com o material betuminoso, antes da compressão. Existem dois tipos de método construtivo utilizado, o pré-misturado a frio, quando os tipos de agregados e ligantes possibilitam o espalhamento em temperatura ambiente, e o pré-misturado a quente, quando o ligante e o agregado são misturados e espalhados na pista ainda quentes.

3.6.7. REVESTIMENTOS FLEXÍVEIS POR CALÇAMENTO

De acordo com o DNIT (2006), estes tipos de pavimento estão em desuso nas rodovias atualmente, por conta da intensificação do uso de pavimentos asfálticos e de concreto. Uma das causas para este efeito é o fato de que, de uma maneira geral, a sua execução se delimita a pátios de estacionamento, vias urbanas e alguns acessos viários.

- Alvenaria Poliédrica: Constituem-se de camadas de pedras irregulares (dentro de certas tolerâncias), assentadas e comprimidas sobre um colchão de regularização, composto de material granular apropriado; as juntas são tomadas com pequenas lascas de pedras e com o próprio material do colchão.

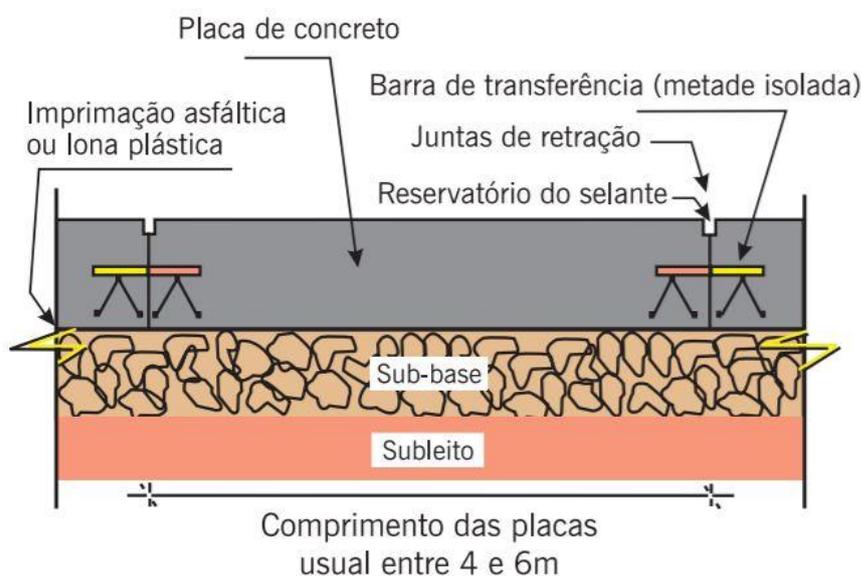
-Paralelepípedos: São compostos por blocos regulares, assentadas sobre um colchão de regularização formado por material granular. As juntas entre os paralelepípedos podem ser envoltas com o mesmo material do colchão de regularização, pedrisco, materiais ou misturas betuminosas ou com argamassa de cimento Portland. São comuns também os blocos intertravados de concreto, denominado “*blockrets*”, com a mesma forma de execução dos paralelepípedos, porém necessita de cautela adequada a cada caso, para garantir o intertravamento e a consequente distribuição de tensões entre blocos adjacentes.

3.6.8. REVESTIMENTOS RÍGIDOS

Segundo o DNIT (2006) o concreto de cimento, ou apenas “concreto” é composto por uma mistura rica de cimento Portland, areia, agregado graúdo e água, distribuído numa camada adequadamente adensada. Essa camada tem a função de revestimento e também de base do pavimento.

A Figura 3.2 apresenta uma estrutura típica das camadas de um pavimento com revestimento rígido.

Figura 3.2 - Estrutura típica de um pavimento com revestimento rígido.



Fonte: Bernucci (2010).

3.7 ESTUDOS GEOTÉCNICOS DOS PAVIMENTOS

Para a elaboração de um projeto executivo de pavimentação rodoviária o DNIT (2006) recomenda a realização de uma etapa denominada estudos geotécnicos, nada mais é do que ensaios de caracterização física e mecânica com o intuito de avaliar se os materiais que serão empregados nas

camadas dos pavimentos, possuem qualidade adequada para atender aos requisitos mínimos exigidos para que a rodovia seja submetida ao tráfego. Sendo assim, este estudo é dividido em duas partes:

- Estudos do Subleito;
- Estudos de Ocorrências de Materiais para Pavimentação.

O estudo do subleito, caracteriza e avalia os solos das diversas camadas e traça os perfis dos solos para efeito do projeto de pavimento. O estudo das ocorrências de materiais de pavimentação caracteriza e avalia os materiais de jazidas como meio de matéria-prima para o uso na execução das camadas de reforço do subleito, sub-base, base e revestimento, conforme o projeto do pavimento.

Os ensaios realizados para os estudos geotécnicos de acordo com o DNIT (2006), são:

- Granulometria;
- Limite de liquidez (LL);
- Limite de plasticidade (LP);
- Compactação;
- Massa específica aparente “in situ”;
- Índice de Suporte Califórnia (ISC);
- Expansibilidade.

Para os materiais de subleito, o DNIT (2006) exige o ensaio de compactação AASHTO Normal, com grau mínimo de compactação de 100%, sendo o ISC obtido em corpos de prova moldados nas condições de umidade ótima e densidade máxima conforme o ensaio. Os materiais de reforço do subleito, deverão possuir características melhores do que subleito, comprovados pelos ensaios de ISC, granulometria, LL e LP. Os materiais para uso em sub-base granulometricamente estabilizada, deverá possuir um $ISC \geq 20$ e índice do Grupo $IG = 0$ para qualquer tipo de tráfego. A base estabilizada granulometricamente deverá possuir um LL máximo de 25%, Índice de Plasticidade (IP) máximo de 6% e Equivalente de Areia mínimo de 30%, caso o $LL > 25\%$ e/ou $IP > 6$, tem-se a opção de usar o solo em base estabilizada, porém com um Equivalente Areia maior que 30%, satisfazendo as condições de ISC e dentro das faixas granulométricas citadas a frente na Tabela 1.7. Os demais parâmetros físicos deverão atender os seguintes valores:

- $ISC \geq 80\%$ (para qualquer tipo de tráfego), $ISC = 60\%$ quando possuir justificativa econômica devido a ausência de materiais, com a garantia de complementar a estrutura do pavimento solicitada pelo dimensionamento por meio da construção de outras camadas betuminosas;

- Expansão máxima = 0,5%;

Tabela 1.7- Granulometria dos materiais para uso em pavimentação.

Tipos Peneira	I				II	
	A	B	C	D	E	F
% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-
1"		75-90	100	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	...	-
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25

Fonte: DNIT (2006).

3.7.1. ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Este procedimento é normatizado pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), pelo método de ensaio DNER-ME 080/94 e ABNT NBR 7181:2018. Neste ensaio a amostra recebida do campo é seca ao ar pelo uso do aparelho secador, de modo que a temperatura da amostra não exceda 60°C, a menos que experiência prévia mostre que uma maior temperatura não mudou as características da amostra. A seguir, desagregam-se completamente os torrões no almofariz com a mão de gral recoberta de borracha ou com auxílio de dispositivo mecânico, de maneira a evitar reduzir ao máximo o tamanho natural das partículas individuais do solo.

Reduz-se todo o material preparado com o repartidor de amostras ou pelo quarteamento, até se obter uma amostra representativa de cerca de 1500 g para solos argilosos ou 2000 g para solos arenosos ou pedregulhosos; do restante do material é separada uma porção para determinação da umidade higroscópica.

O peso da amostra representativa obtido anteriormente, com aproximação de 5 g, é anotado como peso total da amostra seca ao ar.

Tomam-se cerca de 50 g de material seco ao ar que passa na peneira de 2,0 mm e determina-se sua umidade pela Equação 1 a seguir:

$$h = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

Onde:

h – Teor de umidade, em porcentagem;

Ph - Peso do material úmido;

Ps – Peso do material seco em estufa a 105°C – 110°C, até consistência de peso.

Realiza-se as pesagens com aproximação de 0,01 g.

Coloca-se a amostra representativa obtida no almofariz com capacidade de 5 kg de solo com água esfregando as mãos a fim de desagregar os torrões de solo existentes. Verte-se a amostra com a água de lavagem através das peneiras de 2,0 mm e de 0,075 mm, colocadas uma sobre a outra, tomando-se a precaução de remover para as citadas peneiras, com auxílio de jato de água, o material que ainda permaneceu no recipiente. A peneira de 2,0 mm é usada somente com o objetivo de evitar que o material de diâmetro maior venha sobrecarregar a de 0,075 mm, danificando sua malha. Transfere-se novamente as frações da amostra retidas nas peneiras mencionadas, sempre com o auxílio do jato de água para o recipiente e repete as operações de lavagem no recipiente e nas peneiras, como antes descritas, até que a água de lavagem se apresente limpa.

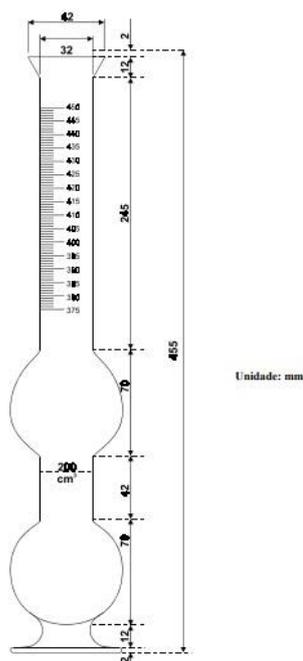
As frações de amostra que são retidas nas peneiras de 2,0 mm e de 0,075 mm, após lavadas com água corrente diretamente nestas peneiras, são transferidas com o auxílio de jato de água para a cápsula de porcelana de 500 ml e secas em estufa a 105°C – 110°C até constância de peso.

Realiza-se na sequencia o peneiramento do material seco contido na cápsula de porcelana, na série desejada de peneiras, no caso para agregado miúdo a peneira de 4,8 mm em diante e pesando com aproximação de 0,1 g as frações das amostras retidas nas peneiras consideradas.

3.7.2. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DO SÓLIDOS

Este procedimento é normatizado pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), pelo método de ensaio DNER-ME 194/98 e ABNT NBR 6508:1984. Estabelece para o ensaio o uso de uma balança com capacidade mínima de 1 kg e sensibilidade de 1g ou menos e um frasco de vidro Chapnam de 450 cm³ ou 450 mL conforme a Figura 3.3.

Figura 3.3- Frasco Chapnam.



Fonte: Anexo A-DNER-ME 194/98

A amostra é seca em estufa (105 a 110 °C), até a consistência de massa. No frasco, coloca-se água até a marca de 200 cm³, e deixa em repouso para que a água presa as faces internas do frasco escoem totalmente, posteriormente introduz-se 500 g desse agregado úmido seco no frasco (entende-se agregado miúdo, os grãos que passa na peneira ABNT 4,8mm durante o processo de granulometria), o qual é agitado para a eliminação das bolhas de ar que estão presentes no frasco. A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco indica o volume em cm³ ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo, alertando para que as faces internas devem estar completamente secas e sem grãos aderentes.

Por fim, a massa específica é determinada pela Equação 2:

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \dots\dots\dots (2)$$

Onde:

γ = massa específica do agregado miúdo, expressa em g/cm³;

L=leitura no frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo).

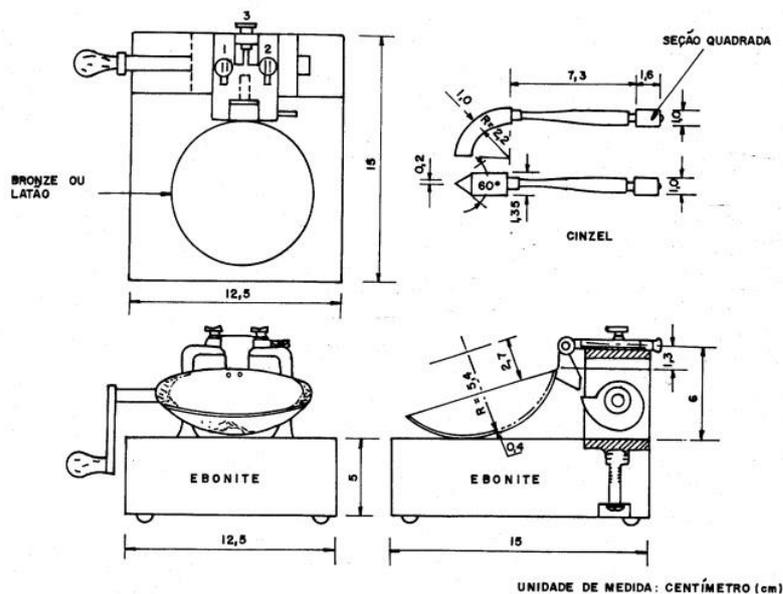
Sendo que duas determinações consecutivas são feitas com a mesma amostra de agregado miúdo, não diferindo entre si mais de 0,05 g/cm³.

O resultado é expresso com três algarismos significativos.

3.7.3. ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ (LL)

Este procedimento é normatizado pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), pelo método de ensaio DNER-ME 122/94 e pela ABNT NBR 6459:2017, onde estabelece o uso do aparelho de Casagrande para determinação do limite de liquidez, conforme Figura 3.4.

Figura 3.4 - Aparelho de Casagrande.

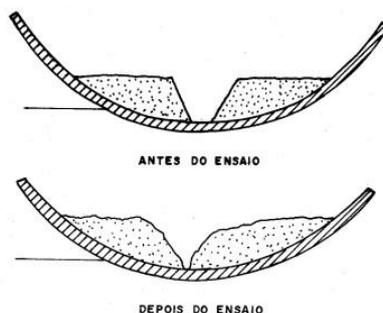


Fonte: Anexo Normativo -DNER-ME 122/94

Após a calibragem correta do aparelho Casagrande, coleta-se uma amostra de lodo de cerca de 70 g para o ensaio. Coloca-se a amostra na cápsula de porcelana, e acrescenta cerca de 15 cm³ a 20 cm³ de água destilada e homogeneiza-se a mistura com a espátula. Futuras adições de água são da ordem de 1 a 3 cm³, procede a perfeita homogeneização da mistura que se apresenta com uma massa plástica. O tempo de homogeneização é entre 15 e 30 min. Toma-se uma porção suficiente da mistura preparada e coloca na concha em torno do ponto correspondente ao de contato entre a concha e a base do aparelho. Espalha-se a seguir a massa plástica, de tal modo que a massa ocupe aproximadamente 2/3 da superfície da concha. Emprega-se o menor número possível de passadas da espátula, para evitar a formação de bolhas de ar no interior da massa. Alisa-se com a espátula a massa de solo, até que se apresente com 1 cm de espessura no ponto de máxima espessura. O excesso de massa de solo é retirado da concha do aparelho e colocado na cápsula de porcelana, antes referida.

Produz-se uma canelura na massa da amostra segundo o plano de simetria do aparelho, usando o cinzel, de tal modo que a espessura na parte central seja de 1 cm, de acordo com a Figura 3.5.

Figura 3.5 - Canelura na massa.



Fonte: Anexo Normativo -DNER-ME 122/94

Para o uso do cinzel, no caso de amostra com componentes argilosos, é passado uma única vez, pressionando a ponta do mesmo contra a concha, de modo que se obtém uma canelura regular, limpa e com as dimensões da seção transversal do cinzel. Golpeia-se contra a base do aparelho, pelo acionamento da manivela, a concha contendo a massa da amostra com a velocidade de duas voltas por segundo, até que as duas bordas inferiores da canelura se unem na extensão de 1 cm. Sendo proibida girar a manivela com a mão do operador sobre a base do aparelho.

Transfere-se com a espátula para o recipiente onde seria armazenado a amostra, o dissecador, uma porção colhida em ambos os lados da canelura e transversalmente a ela, abrangendo-se a porção em que se verifica a união das bordas: pesa-se imediatamente o conjunto recipiente mais solo, levando-o a seguir para uma estufa a 105°C-110°C para determinação da umidade. As determinações são com aproximação de 0,01 g. De acordo com a Equação (1), mencionada anteriormente.

$$h = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

Onde:

h – Teor de umidade, em porcentagem;

Ph – massa de solo úmido;

Ps - massa de solo seco em estufa a 105°C-110°C, até a consistência de massa.

Retira-se a amostra remanescente da concha, transferindo-a para a cápsula de porcelana. Repete as operações três vezes com adições de água gradativamente crescentes, com o objetivo de se obter uma massa da amostra de consistência que permita pelo menos uma determinação do número de golpes em cada um dos seguintes intervalos: 25-35, 20-30 e 15-25.

O limite de liquidez, expresso em teor de umidade, será o valor da abscissa do ponto da reta correspondente à ordenada de 25 golpes.

Na impossibilidade de se conseguir abertura de uma canelura na massa de solo existente na concha ou o seu fechamento com 25 golpes, considera-se a amostra como não apresentando limite de liquidez.

O limite de liquidez é determinado segundo, as Equações (3), (4) e (5) a seguir.

$$LL = h \frac{(N)}{25} 0,156 \dots\dots\dots(3)$$

Ou

$$LL = h \times K_{(N)} \dots\dots\dots(4)$$

Onde:

h - Teor de umidade (%), correspondente a N golpes;

N -Número de golpes na determinação de um ponto de ensaio;

LL- Limite de liquidez (%)

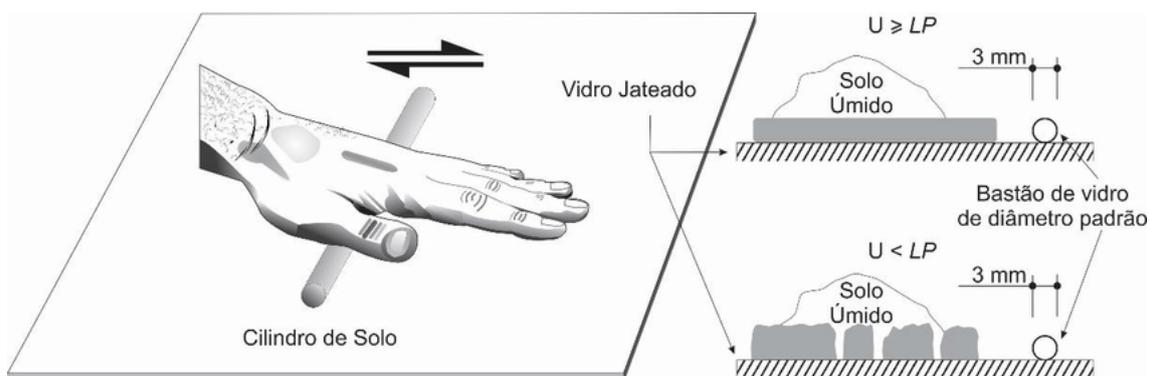
$$K_{(N)} = \frac{(N)}{25} 0,156 \dots\dots\dots(5)$$

3.7.4. ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE (LP)

Este procedimento é normatizado pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), pelo método de ensaio DNER-ME 082/94 e pela ABNT NBR 7180:2016.

Coloca-se a amostra na cápsula e junta-se com a água destilada em quantidade suficiente para se obter massa plástica, adicionando a água aos poucos e misturando continuamente com a espátula até homogeneizar completamente a massa. Posteriormente, separa-se em torno de 20 g da massa obtida e modela-se na forma elipsoidal. Rola-se a massa entre os dedos e a face esmerilhada da placa de vidro, com pressão suficiente, e molda-se na forma de um cilindro de diâmetro uniforme. O número de rolagem está compreendido entre 80 e 90 por minuto, considerando uma rolagem como o movimento da mão para frente e para trás, retomando ao ponto de partida. Quando o diâmetro do cilindro do solo atingir 3 mm, quebra-se em seis ou oito partes, amassa com os dedos os pedaços até se obter uma massa de forma elipsoidal. Proceder-se novamente a rolagem até que se forme um cilindro de 3 mm de diâmetro repetidamente de maneira que o cilindro de solo se desagrega sob pressão requerida para rolagem e não for mais possível formar um novo cilindro de solo. A Figura 3.6 exemplifica este processo.

Figura 3.6 - Procedimento de rolagem do solo.



Fonte: Molina, JR Walter 2017

Após fragmentar o solo, transfere-se imediatamente os seus pedaços para o recipiente e determina-se a umidade pela equação (1):

$$h = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

Onde:

h – Teor de umidade, em porcentagem;

Ph – massa de solo úmido;

Ps - massa de solo seco em estufa a 105°C-110°C, até a consistência de massa.

Fez-se as pesagens com a aproximação de 0,01 g.

Repete-se as operações anteriores até que se obtém três valores que não diferem da respectiva média de mais 5%.

O Limite de Plasticidade LP é expresso pela média dos teores de humidade obtidos.

Ao final, define-se seu Índice de Plasticidade IP, definido de acordo com a NBR 7180:2016, na equação (6) a seguir:

$$IP = LL - LP \dots \dots \dots (6)$$

Onde:

IP – é o índice de plasticidade;

LL – é o limite de liquidez;

LP – é o limite de plasticidade.

3.7.5. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO EM EQUIPAMENTO MINIATURA

Este procedimento é normatizado pelo método de ensaio da NBR 7182:2020 e DNER – ME 228/94 (DNIT, 1994b). O aparelho de compactação miniatura é aferido, para se conseguir determinar a altura do corpo de prova e calcula-se a constante de aferição K_a do conjunto compactador-soquete pela Equação (7):

$$K_a = A_c \pm L_a \dots\dots\dots(7)$$

Onde:

A_c = a altura do cilindro padrão em 0,01 mm ;

L_a = a leitura do extensômetro acima da haste do soquete em 0,01 mm.

A amostra é preparada, destorroada, homogeneizada e seca em estufa a não mais que 60°C. Após peneirar novamente a mistura na peneira de 2 mm, o material que passou é separado em 5 porções de 500 g e adicionado em cada uma delas água até se obter porções de umidades crescentes, de acordo com o tipo de solo coletado, permitindo assim traçar a curva de compactação. Acondiciona-se a amostra na bacia plástica de 3 L dentro do saco plástico de polietileno, hermeticamente vedado, por um período de 24 horas. Realiza o ensaio propriamente dito, com energia de compactação normal e intermediária, retira-se o soquete e inverte o corpo de prova, aplicando o mesmo número de golpes para energias normal e intermediária. Após o processo, efetua-se a leitura do extensômetro e calcula-se a altura A do corpo de prova em milímetros conforme a equação (8):

$$A = 0,01 \times (K_a \pm L_e) \dots\dots\dots(8)$$

Onde:

A = Altura do corpo de prova, em mm, com aproximação de 0,1 mm;

K_a = Constante de aferição do conjunto compactador-soquete utilizado, em 0,01 mm;

L_e = Leitura do extensômetro, em 0,01 mm.

Posteriormente, calcula-se o teor de umidade h, de cada porção utilizada na compactação, pela equação (9) a seguir:

$$h = \frac{(M_h - M_s) \times 100}{M_s} \dots\dots\dots(9)$$

Onde:

h = Teor de umidade da amostra em porcentagem, com aproximação de 0,1%;

M_h = Massa de solo úmido;

M_s = Massa de solo seco em estufa na temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 0$

Assim como, a massa específica aparentemente seca do solo compactado (MEAS), pela equação (10):

$$\text{MEAS} = \frac{100 \times M_h}{(100+h) \times V} \dots\dots\dots(10)$$

Onde:

M_h = Massa de solo úmido;

h = Teor de umidade da porção compactada;

V = volume do corpo de prova compactado, que é igual à área de seção interna do molde (geralmente $19,6 \text{ cm}^2$) multiplicada pela altura A do corpo de prova, expressa em cm, com aproximação de 0,001 cm. Após obtido os resultados acima, são elaboradas as curvas de compactação.

3.7.6. ENSAIO DE ÍNDICE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR)

O Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR – *California Bearing Ratio*) é a relação entre a pressão exercida por um pistão de diâmetro padronizado necessária à penetração no solo até determinado ponto (0,1” e 0,2”) e a pressão necessária para que o referido pistão penetre igual profundidade num solo-padrão de brita graduada. Este procedimento é normatizado pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), pelo método de ensaio DNIT-ME 172/2016 e pela ABNT NBR 9895:2017.

Segundo Souza (2007), neste ensaio é aferido a resistência a penetração de uma amostra saturada segundo o método de Proctor. Sendo assim, é inserido um pistão de diâmetro 49,6 mm, o qual penetra na amostra a uma velocidade de 1,27 mm/min. Em suma, o ensaio possui três etapas: compactação do corpo de prova, colocação do corpo-de-prova em imersão para obtenção da curva de expansão e medida da resistência à penetração. Para realização da curva de compactação da amostra, determina-se pelas Equações (11), (12) e (1), a expansão pela Equação (13) e por fim o Índice Suporte Califórnia (CBR) pela Equação (14).

$$\mu_h = \frac{P'_h}{V} \dots\dots\dots(11)$$

Onde:

μ_h = Massa específica aparentemente úmida;

$P'h$ = Massa do solo úmido compactado em gramas;

V = volume do solo úmido compactado em cm^3 .

$$\mu_s = \mu_h \times \frac{100}{100+h'} \dots\dots\dots(12)$$

Onde:

μ_s = Massa específica aparentemente seca do solo compactado;

μ_h = Massa específica aparentemente úmida;

h = Teor de umidade do solo compactado:

$$h = \frac{Ph-Ps}{Ps} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

Onde:

h – Teor de umidade, em porcentagem;

Ph – massa de solo úmido;

Ps - massa de solo seco em estufa a 105°C - 110°C , até a consistência de massa.

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{\text{Leitura final}-\text{Leitura inicial no extensômetro}}{\text{altura inicial do corpo de prova}} \times 100 \dots\dots\dots(13)$$

$$\text{ISC} = \frac{\text{Pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{Pressão Padrão}} \times 100 \dots\dots\dots(14)$$

3.7.7. ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O Módulo de Resiliência (MR), segundo Norback (2018) é conceituado como a relação entre a carga cíclica aplicada e a deformação elástica ou recuperável do material, sendo um parâmetro que caracteriza o comportamento elástico dos materiais sob carregamento repetido laboratorial ou pelas ações das cargas dos veículos repetidas sobre o pavimento. Para obter este parâmetro é realizado o triaxial de carga repetida, normatizado pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), pelo método de ensaio DNIT-ME 134/2010 e pela ABNT NBR 16018/2012.

O MR é calculado a partir da relação entre a tensão desvio σ_d (diferença entre a tensão σ_1 e σ_3) pulsante durante, pela deformação resultante, resiliente ou recuperável, ϵ_r , expressa pela Equação (15).

$$\text{MR} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \dots\dots\dots(15)$$

Onde:

MR = Módulo de Resiliência (Mpa);

$\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3)$: tensão desvio aplicada repetidamente (Mpa);

σ_1 = Tensão principal maior;

σ_3 = Tensão principal menor ou tensão de confinamento;

$\epsilon_r = \frac{\delta h}{H_0}$: Deformação específica axial resiliente (mm/mm);

δh = Deslocamento resiliente registrado (mm);

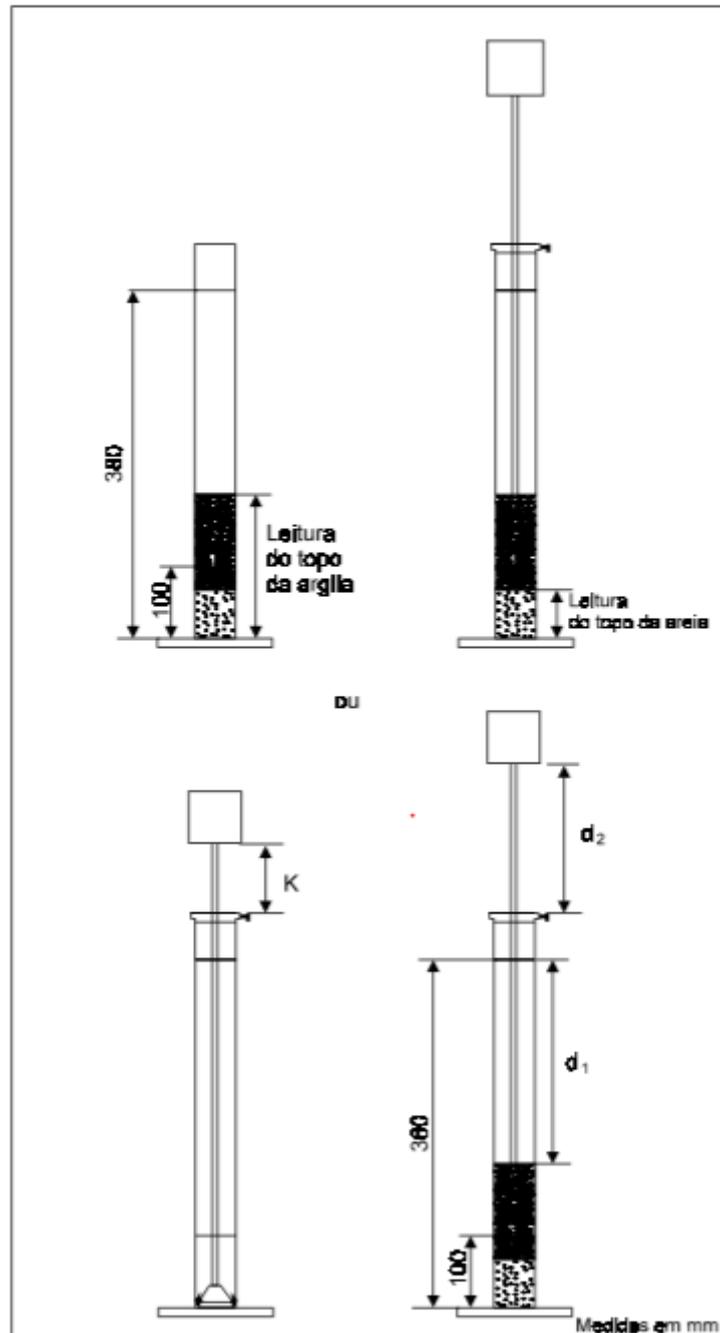
H_0 = Altura de referência do medidor de deslocamentos – LVDT (mm).

3.7.8. ENSAIO DE EQUIVALENTE DE AREIA

Este procedimento é normatizado pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), pelo método de ensaio ABNT NBR 12052/1992 e DNER-ME 054/97, que tem por objetivo determinar o equivalente de areia de solos ou agregados miúdos. De acordo com o DNER, Equivalente Areia (EA) nada mais é que a relação volumétrica referente a razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, numa proveta, nas condições determinadas pelo ensaio.

Após os períodos determinados de agitação e repouso da amostra na proveta, realiza-se a medição dos níveis de topo de argila e areia, com auxílio da haste com disco, ilustrados na Figura 3.7, o calcula do equivalente areia é feito segundo a Equação (16) e (17).

Figura 3.7 - Esquema de realização de medidas.



Fonte: DNER-ME 054/97.

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \times 100 \dots\dots\dots(16)$$

Ou

$$EA = \frac{d_2 - k}{380 - d_1} \times 100 \dots\dots\dots(17)$$

Onde:

d_1 = Distância do traço de referência superior da proveta ao nível da suspensão argilosa, em mm;

d_2 = Distância do topo do disco que se apoia na boca da proveta à base inferior do cilindro do pistão quando a sapata estiver apoiada na areia, em mm;

k = Constante do aparelho (caso particular da distância d_2) quando a sapata do pistão estiver assente no fundo da proveta, em mm;

3.7.9. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA COMPRESSÃO SIMPLES DE AMOSTRAS INDEFORMADAS

Este procedimento é normatizado pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), pelo método de ensaio ABNT NBR 12770/1992 e DNER-IE 004/94, que tem por objetivo descrever a forma como se determina a resistência a compressão não confinada de amostras indeformadas de solos coesivos, na umidade natural.

Segundo o DNER nesta norma., resistência a compressão de um solo coesivo nada mais é do que o valor de pressão referente à carga que rompe um corpo-de-prova cilíndrico de solo submetido à carregamento axial. Quando esta resistência a compressão não atinge a carga máxima de ruptura, é calculada pelo valor da pressão referente à carga no qual acontece deformação específica do corpo-de-prova de 20%. O ensaio é realizado conforme as duas opções existentes, através do controle da velocidade de deformação do corpo-de-prova e medição da carga aplicada correspondente (deformação controlada) ou pelo controle da carga aplicada ao corpo-de-prova e medindo a deformação correspondente (carga controlada). Em alguns tipos de aparelhos, a deformação é aferida por um defletômetro e a carga por um anel dinamométrico. Outro que pode ser utilizado é o elaborado pelo “*Road Research Laboratory*”, em que a relação carga/deformação é anotada auto graficamente. As Equações (1), (18), (19) e (20) definem os valores de tensão e deformação da amostra ensaiada.

$$h = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

Onde:

h – Teor de umidade, em porcentagem;

Ph – massa de solo úmido;

Ps - massa de solo seco em estufa a 105°C-110°C, até a consistência de massa.

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \dots \dots \dots (18)$$

Onde:

ϵ = Deformação específica;

ΔH = Decréscimo de altura do corpo-de-prova;

H_0 = Altura inicial do corpo-de-prova.

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \dots\dots\dots(19)$$

Onde:

A = Área corrigida, em cm^2 ;

A_0 = Área inicial do corpo-de-prova, em cm^2 ;

ε = Deformação específica.

$$p = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(20)$$

p = Pressão, em kN/m^2 ;

P = carga aplicada ao corpo-de-prova, em kN ;

A = Área corrigida do corpo-de-prova, em m^2 .

4. METODOLOGIA

4.1 CONCEITOS SOBRE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS).

Para esta pesquisa foi proposto o método de revisão bibliográfica sistemática, que segundo Bereton et al., (2005), possibilita ao pesquisador uma análise criteriosa e fundamentada das pesquisas produzidas em um tema determinado. A Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) é uma ferramenta para mapear trabalhos no tema de pesquisa específico, para que o autor esteja possibilitado a produzir uma síntese do conhecimento acerca do assunto (BIOLCHINI et al., 2007). Ainda segundo o autor, para tal efeito é preciso escolher um procedimento, um grupo de passos, técnicas e ferramentas específicas.

Segundo Levy e Ellis (2006), a revisão bibliográfica sistemática acontece por meio de um processo como sequência de passos e atividades, conceito este definido por Sethi e King, (1998) apud Levy e Ellis (2006). Para cumprir esta proposta, Levy e Ellis (2006) definiram três fases: Entrada; Processamento e Saída. A fase 1 de “entrada” significa as informações iniciais que serão processadas, como artigos clássicos na área de estudo, livros-texto que compilam conhecimentos na área de estudo e artigos de referência indicados por especialistas. Há também um plano de condução da RBS, um documento descritivo em relação ao processo, as técnicas e as ferramentas que serão utilizadas ao decorrer da fase 2 de “processamento”, que ao final irá produzir a fase 3 “saídas”, e com isso os relatórios, síntese dos resultados e etc. A Figura 4.1 ilustra essas fases proposta por Levy e Ellis (2006).

Figura 4.1- Fases de uma revisão bibliográfica efetiva.

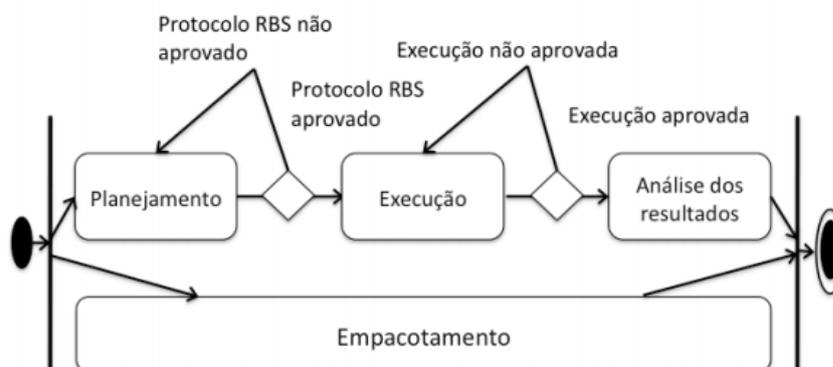


Fonte: Adaptado de Levy e Ellis (2006).

Esse modelo substantia a utilidade de se efetuar a RBS de modo cíclico, através das seis etapas apresentadas na Figura 4.1, em que se obtém uma melhoria no conhecimento científico sobre o assunto à medida em que se repete esses ciclos, quantas vezes for necessário.

A literatura também apresenta outra abordagem a respeito da RBS, dessa vez proposta por Biolchi et al. (2007). Na Figura 4.2 apresentam-se fases deste processo, semelhante a proposta de Levy e Ellis (2006), sendo que neste modelo, os autores não propõem a necessidade de andamento da RBS de maneira cíclica. Na fase de planejamento, são delimitados os objetivos para desenvolvimento de um protocolo da RBS, detalhando assim a questão central da pesquisa, objetivos, palavras-chave, *strings* de busca e o método de execução. Após a aprovação do protocolo, inicia-se a etapa de execução. Nesta fase identifica-se, seleciona e avalia os estudos primários, de acordo com os critérios de inclusão e exclusão determinados no protocolo da RBS. Após a seleção dos artigos primários, os dados são coletados e agrupados ao decorrer da fase de análise dos resultados.

Figura 4.2 - Representação do processo sistemático para revisão bibliográfica.



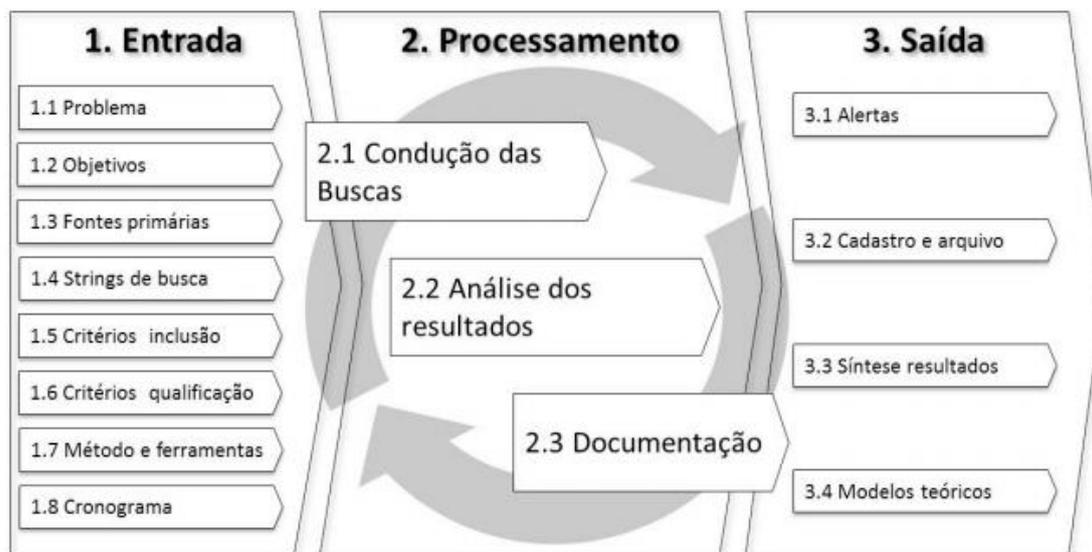
Fonte: Adaptado de Biochini et al. (2007).

A partir de uma breve pesquisa nas bases de dados nacionais e internacionais (*Scopus, Engineering Village, Web of Science e Google Scholar*) de artigos dos últimos 5 anos (2015-2020), o uso de RBS em trabalhos na área de reuso de lodo de ETE e ETA, assim como pesquisas encontradas em demais assuntos relacionadas a resíduos sólidos urbanos, tem como premissa a aplicação de um método próprio de revisão bibliográfica, de acordo com o critério do autor e necessidade de pesquisa. Porém, esse método não é apresentado de modo a servir como roteiro para aplicações por outros autores, caso necessite de uma ferramenta de RBS para utilização. Durante essa busca de artigos nesse período, não foi encontrado nenhum trabalho que tratasse da questão específica de aplicação de uma RBS para pesquisas em uso de lodo de ETA e ETE em pavimentação e apresentasse como ferramenta para possíveis usos futuros por outros autores.

Sendo assim, Conforto et al. (2011) propôs um roteiro para RBS na área de gestão de operações, como foco em pesquisas nos temas de “desenvolvimento de produtos” e “gerenciamento de projetos”. O roteiro foi denominado como *RBS Roadmap* e foi elaborado com base em pesquisas realizadas por Biochini et al. (2007), Levy e Ellis (2006) e Dyba e Dingsøyr (2008).

O *RBS Roadmap* possui sua estrutura em fases e etapas, sendo 15 etapas em 3 fases (Entrada, Processamento e Saída). Na Figura 4.3 tem-se as fases e etapas do *RBS Roadmap*.

Figura 4.3 - Modelo para condução da revisão bibliográfica sistemática -RBS Roadmap.

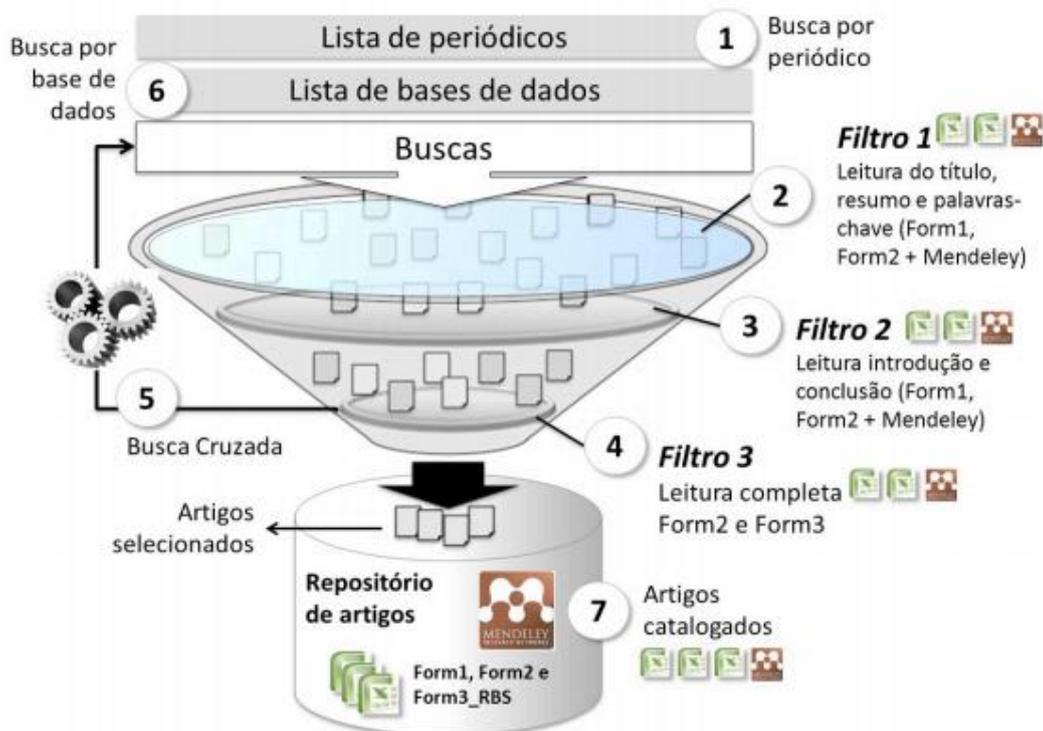


Fonte – Conforto et al., (2011).

Conforme pode-se observar na Figura 4.3, em resumo temos na Fase 1 (entrada) a delimitação do problema na etapa 1.1, definido hipóteses para a RBS, buscando ao final respostas para refutar ou corroborar com as mesmas em estudos já divulgados. Os objetivos na etapa 1.2 são os mesmos dos projetos de pesquisa, sendo claros e factíveis, com rigor na sua definição, pois serão o fundamento para análise dos artigos encontrados. A partir dos objetivos, pode-se definir os critérios de inclusão dos artigos no estudo. As fontes primárias da etapa 1.3 são os artigos nos periódicos ou bases que auxiliam na construção das palavras-chave para montagem do *String* de busca e reconhecimento dos principais autores e trabalhos de relevância para o tema. Os *Strings* de busca da etapa 1.4 podem ser feitos a partir do estudo preliminar dos artigos e através da consulta de especialistas e pesquisadores, sendo um processo de definição, teste e adaptação. Para os critérios de inclusão, na etapa 1.5 são necessários considerar os objetivos da pesquisa, caso não estejam alinhados com os mesmos os trabalhos serão excluídos ao longo dos filtros de leitura. A etapa 1.6 referente aos critérios de qualificação, tem sua utilidade como meio de validação da importância do artigo para o estudo, sendo necessário avaliar no mesmo os métodos de pesquisa utilizados, a quantidade de citações do artigo, o fator de impacto da revista, dentre outros, podendo variar de acordo com o objetivo da RBS. O método e ferramentas na etapa 1.7 diz respeito a definição do método de busca e ferramentas que estão relacionadas com as etapas para condução das buscas, definição dos filtros de busca, como serão realizados a busca nos periódicos e base de dados e como os resultados serão armazenados. Na etapa 1.8 o cronograma define os equipamentos, planejando a compra de softwares caso necessário e as parcerias, sendo sua duração variável dependendo do tema, desde o planejamento até a finalização, pode ser mensurada através do tempo gasto na pesquisa em cada periódico ou na leitura de textos conforme os filtros de busca.

A Fase 2 diz respeito ao processamento, onde as etapas 2.1, 2.2 e 2.3 da Figura 4.3 devem acompanhar um processo contendo 7 passos, conforme ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Procedimento iterativo da Fase 2 de processamento, RBS Roadmap.



Fonte: Conforto et al., (2011).

Como pode-se observar na Etapa 2.1 da Figura 4.3 são realizadas as buscas, compostas pelos passos 1, 5 e 6 da Figura 4.4. Na Etapa 2.2 da Figura 4.3 são feitas a leitura e análise dos resultados, que significa os filtros de leitura, compreendidos pelos passos 2, 3 e 4 da Figura 4.4. No filtro 1, apenas o título, resumo e palavras-chave são lidos; no filtro 2 faz a leitura da introdução e conclusão, lendo novamente o título, resumo e palavras-chave, os artigos que não atendem aos critérios de inclusão são eliminados nessa revisão; no filtro 3 inicia-se o processo de leitura completa e a busca cruzada, que são localizados a partir da leitura de um artigo selecionado pela RBS. A Etapa 2.3 da Figura 4.3 são documentadas as informações e quantidade de artigos encontrados por periódico, quantidade de artigos excluídos e quantidade de artigos encontrados na busca cruzada apresentado na Figura 4.4. Pode-se optar pelo uso de um software de gestão de referências bibliográficas, como o Mendeley, para facilitar o processo.

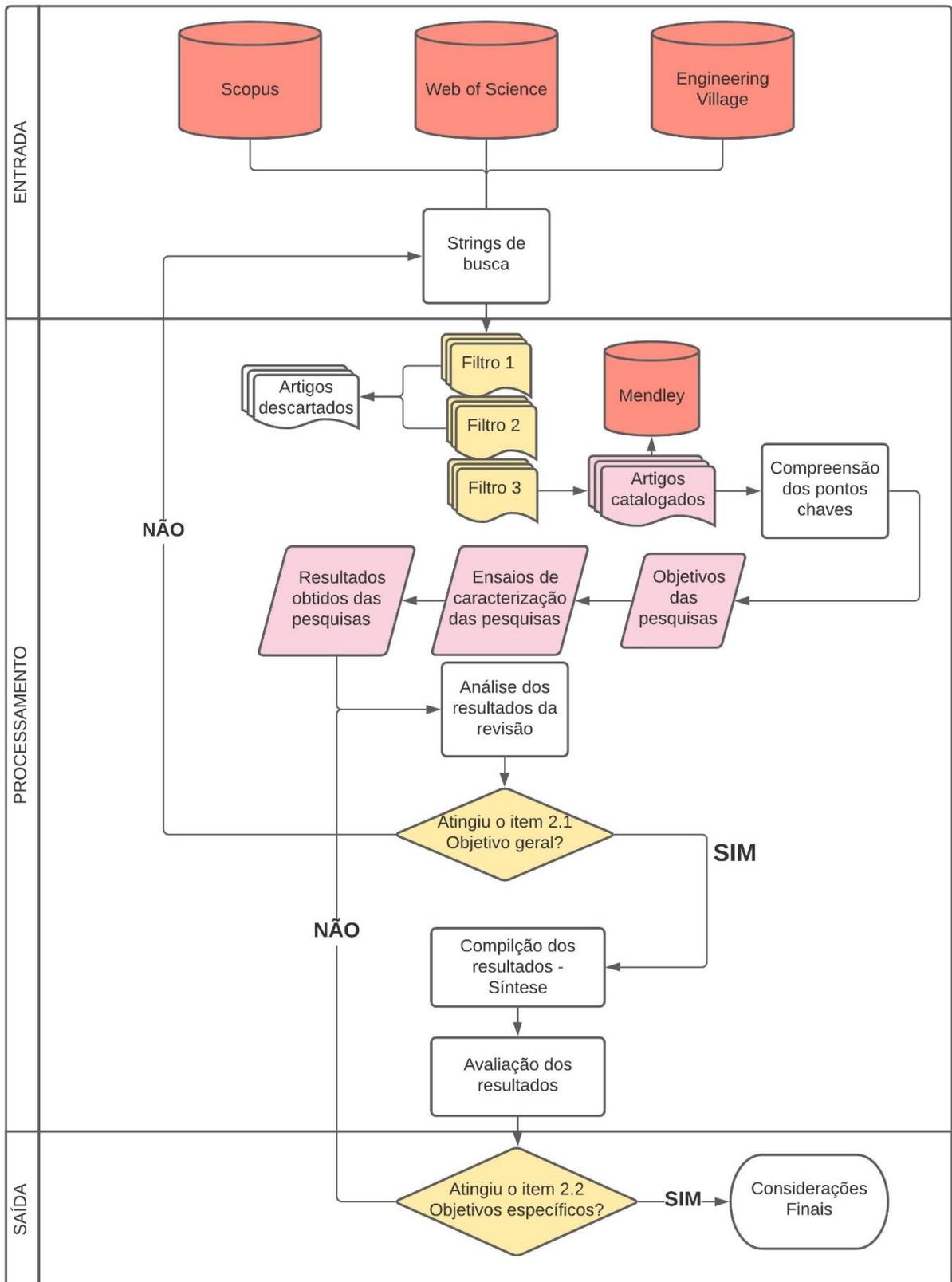
Na Fase 3, denominada saída, são criados na Etapa 3.1 da Figura 4.3 os alertas nos principais periódicos identificados no decorrer da RBS, recebendo por e-mail um aviso de publicações em edições de revistas futuras, relacionadas ao assunto pesquisado. A Etapa 3.2 da Figura 4.3 consiste no Cadastro e arquivo, sendo os artigos selecionados pelo filtro 3 da Figura 4.4, analisados e interpretados, serão

incluídos no repositório de artigos da pesquisa. Na Etapa 3.3 da Figura 4.3, Síntese e Resultados, produz-se um relatório como uma síntese da bibliografia estudada, sendo um texto sobre o assunto que poderá assumir o formato de um item de revisão bibliográfica que posteriormente será acrescentada na tese ou dissertação em questão. Por último, a Etapa 3.4 da Figura 4.3 corresponde aos modelos teóricos e definição de hipóteses, que são o resultado final da RBS, tendo como embasamento os resultados da RBS e a síntese dos temas estudados. Caso forem embasadas em hipóteses pré-definidas, nessa etapa estas podem ser avaliadas e confrontadas com os resultados obtidos, verificando se serão refutadas ou corroboradas.

4.2 APLICAÇÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS).

De forma mais específica, a fim de explicar todas as lacunas possivelmente deixadas por esse método conceitual utilizado por Conforto et al. (2011) e adaptar- para o assunto a respeito do uso de ETA e ETE em pavimentação, foi produzido um fluxograma para metodologia adotada nesta pesquisa, conforme apresentado na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Fluxograma da metodologia proposta para esta pesquisa.



Fonte: Autor (2021).

Conforme apresentado no fluxograma da Figura 4.5 e a partir do roteiro proposto por Conforto et. al, (2011) denominado RBS *Roadmap*, estruturou-se o método para a presente pesquisa, composto por 3 Fases: entrada, processamento e saída.

Na fase de entrada, tem-se as bases de dados através do qual realizou-se as buscas, sendo elas Scopus, Web of Science e Engineering Village. Para realizar as buscas de maneira a se obter o maior número de artigos com relevância dentro do tema, produziu-se os *Strings* de busca, de modo a auxiliar na construção desses *Strings* e mapear os autores mais importantes da área de estudo, realizou-se uma pesquisa preliminar de artigos nas bases de dados Google Scholar e *SciELO*. Após a etapa de pesquisa preliminar, estruturou-se os *Strings* e avaliou os resultados retornados, através dos condicionantes AND e OR, dentro do período de 2012 a 2020 (últimos 8 anos).

O Quadro 1.3 apresenta os *Strings* de busca utilizados neste presente trabalho de RBS. Na coluna de artigos retornados, as variáveis A, B, C, D, E e F dizem respeito ao número de artigos encontrados após aplicar os respectivos *strings* de busca construídos (1º e 2º) nas bases indexadoras de periódicos científicos.

Quadro1.3 - *Strings* de busca utilizados na RBS.

Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) - Fase 1: Entrada		
Base de dados	String de busca	Artigos retornados
Engeneering Village	1º ((Sewage Sludge OR Water Sludge) AND (Paving OR Asphalt OR Highway OR Pavement))	A
	2º ((Sewage Sludge OR Water Sludge OR Ash Sludge) AND (Asphalt Pavements OR Paving OR Pavement OR Base AND Sub base))	B
Web of Science	1º ((Sewage Sludge OR Water Sludge) AND (Paving OR Asphalt OR Highway OR Pavement))	C
	2º ((Sewage Sludge OR Water Sludge OR Ash Sludge) AND (Asphalt Pavements OR Paving OR Pavement OR Base AND Sub base))	D
Scopus	1º ((Sewage Sludge OR Water Sludge) AND (Paving OR Asphalt OR Highway OR Pavement))	E
	2º ((Sewage Sludge OR Water Sludge OR Ash Sludge) AND (Asphalt Pavements OR Paving OR Pavement OR Base AND Sub base))	F

Fonte: Autor (2021).

Na fase de processamento, com os artigos encontrados, aplicou-se 3 filtros de leitura nos trabalhos. Para o Filtro 1 fez-se a leitura do título, resumo e palavras-chave. Para o Filtro 2 a leitura da introdução e conclusão, leu-se novamente o título, resumo e palavras-chave, sendo os artigos que não atendiam aos critérios de inclusão foram descartados nessa revisão; os critérios de inclusão foram os itens descritos nos itens 2.1 e 2.2 deste trabalho, ou seja, os objetivos gerais e específicos. Por último, aplicou-se o Filtro 3, a leitura completa dos artigos. Os trabalhos que passaram pelo Filtro 3 foram catalogados e armazenados no gestor de referências no Mendley para facilitar o processo de citações no texto e produção da referência bibliográfica. Na Tabela 1.8 tem-se a estrutura dos filtros e a taxa de

aproveitamento final para o *String* utilizado. Os resultados das equações de n_1 , n_2 e n_3 dizem respeito a quantidade de artigos selecionados após o Filtro 1, onde a , b e c significam o número de artigos descartados por base indexadora nesta etapa. N_1 , N_2 e N_3 são resultados encontrados após o Filtro 2, onde a' , b' e c' significa o número de artigos descartados por base indexadora nesta etapa. N_1' , N_2' e N_3' são resultados encontrados após o Filtro 3, onde a'' , b'' e c'' significa o número de artigos descartados por base indexadora nesta etapa. Os resultados das equações de $T_{A,B}$, $T_{C,D}$ e $T_{E,F}$ dizem respeito ao quanto desses resultados totais de buscas nas bases indexadoras de periódicos científicos foram realmente aproveitados, conforme propostas do presente trabalho.

Tabela 1.8 - Filtros utilizados e taxa de aproveitamento dos artigos retornados na RBS.

Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) - Fase 2: Processamento (<i>String n</i>)				
	Filtro 1 (Título, Resumo e Palavras chave)	Filtro 2 (Introdução e Conclusão)	Filtro 3 (Leitura completa)	Resultados
	Número de artigos selecionados	Número de artigos selecionados	Número de artigos catalogados e armazenados	Taxa de aproveitamento da busca (%)
Engeneering Village	$n_1 = A+B - a$	$N_1 = n_1 - a'$	$N_1' = N_1 - a''$	$T_{A,B} = \frac{[N_1' / (A+B)]}{100} \times 100$
Web of Science	$n_2 = C+D - b$	$N_2 = n_2 - b'$	$N_2' = N_2 - b''$	$T_{C,D} = \frac{[N_2' / (C+D)]}{100} \times 100$
Scopus	$n_3 = E + F - c$	$N_3 = n_3 - c'$	$N_3' = N_3 - c''$	$T_{E,F} = \frac{[N_3' / (E+F)]}{100} \times 100$

Fonte: Autor (2021).

O método propôs aplicar a revisão dos itens que se julgam cruciais das bibliografias levantadas, a partir da compreensão da literatura, que são: os objetivos propostos, a metodologia aplicada, entendida como os ensaios de caracterização adotados nos parâmetros físicos, químicos, biológicos e mecânicos e, por fim, os resultados obtidos. Após esse processo, realizou-se uma análise dos resultados da revisão produzida, de modo a atingir o item 2.1 dos objetivos propostos, que foi analisar as pesquisas da literatura sobre a destinação do lodo de ETE e ETA em pavimentação. Na sequência, foram compilados esses resultados obtidos em tabelas comparativas, comparando os dados a respeito das pesquisas para atingir o item 2.2 dos objetivos específicos propostos que são os itens a), b) e c), que tratam a respeito das avaliações dos ensaios de caracterização, formas de secagem e teores do lodo na mistura. Ao final das discussões produzidas em torno dessa síntese, foram feitos os apontamentos necessários para as considerações finais a respeito do uso do lodo de ETE e ETA em pavimentação.

5. RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DOS DADOS DE ENTRADA DA RBS: TRABALHOS SELECIONADOS PARA POSTERIOR ANÁLISE.

Nas Tabela 1.9, 2.1 estão apresentados os resultados da Fase 1 e 2 de busca nas bases indexadoras de periódicos científicos escolhidas, a partir da criação de dois *strings* de busca.

Escolheu-se utilizar dois *strings*, pois conforme resultados apresentados na Tabela 2.2, na Fase 2, o número de artigos catalogados e armazenados após o Filtro 3 ao aplicar o *string 2*, para as três bases de dados, reduziu até chegar ao ponto de nenhum artigo ser aproveitado para o presente trabalho. Sendo assim, pode-se concluir que o *string* alcançou a sua construção ótima, pois o número de artigos repetidos entre as três bases de dados aumentou após o *string 2* em comparação ao *string 1*.

Tabela 1.9 -Resultados dos Strings de busca utilizados na RBS - Fase 1.

Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) - Fase 1: Entrada		
Base de dados	String de busca	Artigos retornados
Engeneering Village	1º ((Sewage Sludge OR Water Sludge) AND (Paving OR Asphalt OR Highway OR Pavement))	65
	2º ((Sewage Sludge OR Water Sludge OR Ash Sludge) AND (Asphalt Pavements OR Paving OR Pavement OR Base AND Sub base))	104
Web of Science	1º ((Sewage Sludge OR Water Sludge) AND (Paving OR Asphalt OR Highway OR Pavement))	68
	2º ((Sewage Sludge OR Water Sludge OR Ash Sludge) AND (Asphalt Pavements OR Paving OR Pavement OR Base AND Sub base))	129
Scopus	1º ((Sewage Sludge OR Water Sludge) AND (Paving OR Asphalt OR Highway OR Pavement))	56
	2º ((Sewage Sludge OR Water Sludge OR Ash Sludge) AND (Asphalt Pavements OR Paving OR Pavement OR Base AND Sub base))	15

Fonte: Autor (2021).

Tabela 2.1 - Resultados dos filtros utilizados e taxa de aproveitamento dos artigos retornados na RBS para o String 1 – Fase 2.

Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) - Fase 2: Processamento (<i>String 1</i>)				
	Filtro 1 (Título, Resumo e Palavras chave)	Filtro 2 (Introdução e Conclusão)	Filtro 3 (Leitura completa)	Resultados
	Número de artigos selecionados	Número de artigos selecionados	Número de artigos catalogados e armazenados	Taxa de aproveitamento da busca (%)
Engeneering Village	5	5	3	5
Web of Science	2	2	2	3
Scopus	3	3	1	5

Fonte: Autor (2021).

Tabela 2.2 - Resultados dos filtros utilizados e taxa de aproveitamento dos artigos retornados na RBS para o String 2 – Fase 2.

Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) - Fase 2: Processamento (<i>String 2</i>)				
	Filtro 1 (Título, Resumo e Palavras chave)	Filtro 2 (Introdução e Conclusão)	Filtro 3 (Leitura completa)	Resultados
	Número de artigos selecionados	Número de artigos selecionados	Número de artigos catalogados e armazenados	Taxa de aproveitamento da busca (%)
Engeneering Village	7	4	1	1
Web of Science	5	2	2	2
Scopus	4	3	0	0

Fonte: Autor (2021).

Ao analisar a Tabela 2.1 e 2.2 na coluna taxa de aproveitamento de busca, que diz respeito a quantidade de artigos aproveitados em relação ao total de trabalhos retornados na busca feita pela Fase 1, apresentado na Tabela 1.9, observa-se que em ambos os *strings* de busca aplicados a quantidade de pesquisas selecionadas foram de 3 e 5% do total encontrado nas bases indexadoras de periódicos científicos, sendo que ao aplicar o *string 2* na base de dados *Scopus* não foi possível aproveitar nenhum trabalho encontrado no *Scopus*. Na Tabela 2.3 apresenta-se o total de trabalhos utilizados na presente revisão bibliográfica separados por portfólio bibliográfico.

Tabela 2.3- Total de trabalhos utilizados na presente revisão bibliográfica.

Relação do portfólio bibliográfico	
Total da RBS	11
Total da busca preliminar	4
Total de trabalhos na dissertação	15

Fonte: Autor (2021).

Como pode-se observar na Tabela 2.3, o presente estudo, utilizando as buscas preliminares para montagem dos *Strings* nas bases de dados *Google Scholar* e *Scielo*, juntamente com a aplicação da RBS com o *String 1* e *String 2* nas bases de dados *Engineering Village*, *Web of Science* e *Scopus*, obteve um total de 15 trabalhos que julgou-se relevantes para a utilização na revisão bibliográfica, para realizar a análise e avaliação do uso do lodo de ETA e ETE em pavimentação.

5.2 ANÁLISE DO USO DO LODO DE ETA E ETE EM PAVIMENTAÇÃO

Os testes para uso do lodo de ETA e ETE em camadas de pavimento rodoviário são resultados de pesquisas encontradas nos últimos oito anos e partem do princípio da mistura de solo, emulsão asfáltica ou concreto com o lodo em diferentes frações, seja este bruto, apenas desaguado, seco em processos naturais ou mecânicos e/ou calcinado, em alguns casos com aditivos estabilizantes de cimento pozolânico, cal hidratada ou emulsão asfáltica. Considerou-se também o comportamento mecânico de acordo com a camada do pavimento e tipos de tráfego, por meio dos ensaios preconizados pelas normas dos órgãos regulamentadores, sejam nacionais ou internacionais. Nos Quadros 1.4 e 1.5 são apresentados de forma sucinta os 15 trabalhos selecionados por meio dos filtros 1,2, e 3 aplicados.

Quadro 1.4 - Trabalhos de lodo de ETA em pavimentação encontrados por meio da RBS.

PUBLICAÇÕES				
LODO ETA				
n°	AUTORES	Ano	LOCAL	Aplicação
1	Rodrigo Vaz Coelho; Fernando Shigueu Tahira; Fernando Fernandes; Heliana Barbosa Fontenele; Raquel Souza Teixeira	2015	Londrina-PR (ETA Cafezal)	Mistura ao solo para base, sub-base e subleito.
2	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela	2012	Igarassu-PE (ETA Botafogo)	Mistura ao solo para base e sub base.

3	Jessica Vannesa Colmenares Delgado	2016	Nova Iguaçu-RJ (ETA Guandu)	Mistura ao solo para base e sub base.
4	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela	2014	Igarassu-PE (ETA Botafogo)	Mistura ao solo para base e sub base.
5	J.G Bastidas-Martínez, J.Camapum de Carvalho, L.C Lucena, M.M.Farias, H.A Rondón-Quintana.	2020	ETA de Brasília-DF	Material de enchimento na mistura asfáltica a quente.
6	Sahar A. Ali Dawood, Hayder Abbas Obaid, Tameem Mohammed Hashim e Hadeel Kareem Jasim	2019	Iraque (ETA Al Hilla)	Material como filler na mistura asfáltica a quente.
7	Yue Liu, Yan Zhuge, Christopher W.K. Chow, Alexandra Keegan, Danda Li, Phuong Ngoc Pham, Jianyin Huang, Rafat Siddique.	2020	Austrália (ETA Happy Valley)	Substituição de agregado miúdo em blocos de concreto para pavimentação.

Fonte: Autor (2021).

Quadro 1.5 - Trabalhos de lodos de ETE em pavimentação encontrados por meio da RBS.

PUBLICAÇÕES				
LODO DE ETE				
nº	AUTORES	Ano	LOCAL	Aplicação
1	Tamile Antunes Kelm, Laura Maria Goretti da Motta, Mariluce de Oliveira Ubaldo.	2014	Rio de Janeiro – RJ (ETE do Caju)	Mistura ao solo para base e sub base
2	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela.	2012	Recife-PE (ETE Cabanga)	Mistura ao solo para base e sub base
3	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela.	2014	Recife-PE (ETE Cabanga)	Mistura ao solo para base e sub base

4	Kiev Luiz Pereira	2012	Natal-RN (Empresa limpa fossa – lagoa de estabilização anaeróbia)	Mistura ao solo para base e sub base
5	J.G Bastidas-Martínez, J.Camapum de Carvalho, L.C Lucena, M.M.Farias, H.A Rondón-Quintana.	2020	ETE de Brasília-DF	Material de enchimento na mistura asfáltica a quente
6	Kaling Taki, Saurabh Choudhary, Sharad Gupta, Manish Kumar	2019	Gandhinagar – Índia (ETE Jaspur)	Mistura ao solo com aditivo estabilizante de cal para base
7	Deng-Fong Lin, Huan-Lin Luo, Darn-Horng Hsiao, Chien-Ta Chen, Ming-Du Cai.	2016	Tawain (ETE não identificada)	Mistura ao solo com aditivo estabilizante de cimento e nano SiO ₂ para subleito
8	Hamza Güllü e Halil İbrahim Fedakar	2016	Turquia (ETE Gaziantep)	Mistura ao solo para sub base
9	Yuan Zhang, Zhen Leng, Fuliou Zou, Lei Wang, Season S. Chen, Daniel C.W. Tsang	2017	Tuen Mun -Hong Kong (ETE T-Park)	Síntese de zeólita A a partir do lodo de ETE para uso de aditivo na mistura asfáltica a quente.

Fonte: Autor (2021).

Conforme Quadro 1.4, Coelho *et al.* (2015) propôs a aplicação do lodo da ETA de Cafezal, em Londrina-PR, misturado ao solo para uso como base, sub-base e subleito de pavimento. O lodo inicialmente foi desaguado em leito de drenagem, com geotêxtil e camada de brita como suporte. Na sequência foi seco ao ar e ensacado sem destorroamento. Não foram realizados neste estudo ensaios de caracterização química do lodo. Na Tabela 2.4, a seguir, pode-se observar que os parâmetros físicos ensaiados para o lodo e os solos foram feitos anteriormente a Coelho *et al.* (2015), no mesmo laboratório em que o autor realizou seus ensaios posteriores, por diversos autores ao longo dos anos (2011 a 2013) e estes resultados foram aproveitados por Coelho *et al.* (2015).

Tabela 2.4 - Caracterização física dos materiais segundo Coelho *et al.* (2015).

Caracterização física dos materiais.			
Características Físicas	Lodo	Solo argiloso	Solo arenoso
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,75	3,03	2,69
Limite de Liquidez (%)	NP	51,80	31,00
Limite de Plasticidade (%)	NP	38,27	15,00
Índice de Plasticidade (%)	NP	13,53	16,00
Argila (%)	0,0	55,50	13,50
Silte (%)	0,0	23,50	15,50
Areia Fina (%)	0,5	20,73	44,00
Areia Média (%)	2,0	0,27	27,00
Areia Grossa (%)	2,5	0,00	0,00
Pedregulho (%)	95,0	0,00	0,00
Classificação textural	Pedregulho arenoso	argila siltosa	areia fina siltosa

Fonte: Adaptado de Beraldo *et al.* (2011); Silva *et al.* (2011); Tahira e Teixeira (2013) *apud* Coelho *et al.* (2015).

Como pode-se observar, o lodo de ETA estudado ao longo dos 5 anos pelos autores citados na Tabela 2.4 possui massa específica similar aos solos da mistura, apesar de não ser plástico e classificado como um pedregulho arenoso, devido 95% de sua composição ser de pedregulho.

Vale ressaltar a possível interferência nos resultados de caracterização dos materiais, considerando o distanciamento de tempo entre os dados coletados, tanto para os solos quanto para o lodo de ETA, sendo misturados e ensaiados seus parâmetros mecânicos durante os cinco anos desde o primeiro ensaio de caracterização física realizado.

Nesta pesquisa, o lodo de ETA seco foi misturado com dois tipos de solo, arenoso e argiloso, e com ou sem adição de cimento, nas seguintes configurações: a) solo argiloso com traço unitário em massa de 1:1 (solo-lodo) com adição de 6% e 10% de cimento; b) solo arenoso com traço unitário em massa de 1:0,25 (solo-lodo), sem adição de cimento. Depois de compactados, foram medidos seu Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão, para misturas que não usaram o cimento, com valores admissíveis de acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006) citados na Tabela 2.5, e Resistência a Compressão Simples (RCS), para misturas com cimento, com resistência admissível mínima de 2,1 Mpa.. Nas Tabelas 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 apresentam os resultados obtidos de RSC e ISC nas misturas de 1:1 e 1:0,25 solo-lodo com ou sem a adição de aditivo estabilizante de cimento (10%).

Tabela 2.5 - Requisitos exigidos pelo DNIT para camadas de subleito, sub-base e base em obras de pavimentação.

Requisitos DNIT	ISC mínimo (%)	Expansão máxima (%)	RSC mínima (Mpa)
Base	80	0,5	2,1
Sub-base	20	1,0	-
Subleito	2	2,0	-

Fonte: Manual do DNIT (2006) adaptado por Coelho et al., (2015).

Tabela 2.6 - Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão do solo argiloso e da mistura solo argiloso-lodo (1:1).

Descrição do material	ISC (%)	Expansão (%)	Grau de compactação (%)	Desvio de umidade ótima (%)
Solo argiloso	18,56	0,15	101	1,0
Solo argiloso-lodo (1:1)	10,67	1,27	99	0,2

Fonte: Beraldo et al., (2011).

Segundo Coelho *et al.* (2015) o valor superior de ISC e inferior de expansão foi para o solo argiloso, porém a mistura de solo argiloso-lodo (1:1) apresentou um ISC reduzido e expansão elevado, resultado este já esperado devido ao índice de vazios da mistura solo-lodo ser maior que apenas com o solo.

Tabela 2.7 - Resistência a compressão simples (RSC) aos 7 dias de idade das misturas solo argiloso-cimento e solo argiloso-cimento-lodo.

Descrição do material	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (Mpa)	Coefficiente de variação (%)
Mistura solo argiloso-cimento (10%)	0,46	0,58	0,55	0,53	0,06	0,11
Mistura solo argiloso-lodo-cimento (1:1 -10%)	0,23	0,29	0,29	0,27	0,03	0,11

Fonte: Coelho et al., (2015).

De acordo com Coelho et al., (2015), esta diminuição da resistência do material foi decorrente a ausência de coesão entre as partículas, apesar de não se destorroar o lodo e, conseqüentemente, ocorrer uma melhora na granulometria do solo argiloso, seus grãos eram lisos, o que dificultou a reação pozolânica com o cimento.

Tabela 2.8 - Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão do solo arenoso e da mistura solo arenoso-lodo (1:0,25).

Descrição do material	ISC (%)	Expansão (%)	Grau de compactação (%)	Desvio de umidade ótima (%)
Solo argiloso	10,86	0,48	99,46	-0,9
Solo argiloso-lodo (1:1)	4,62	1,44	95,56	-0,3

Fonte: Tahira e Teixeira (2013).

Avaliando a Tabela 2.8, pode-se observar que o solo apresentou maior resistência à penetração que a mistura solo-lodo de ETA, fato este decorrente da massa específica máxima do solo ser maior que a mistura solo-lodo de ETA, assim como, a expansão elevada na mistura solo-lodo de ETA por conta do menor índice de vazios quando comparado com o solo, ocasionando maior penetração de água e consequentemente elevando-se a expansão. (COELHO *et al.* 2015).

Tabela 2.9 - Resistência a compressão simples (RSC) aos 7 dias de idade das misturas solo arenoso - cimento (10%).

Descrição do material	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (Mpa)	Coefficiente de variação (%)
Mistura solo arenoso-cimento (10%)	2,53	2,70	2,88	2,70	0,17	0,06

Fonte: Tahira e Teixeira (2013).

Na Tabela 2.9 pode-se observar que o valor de RSC da mistura média de 2,70 MPa superou o valor exigido pelo DNIT, de 2,1 MPa, com um coeficiente de variação reduzido de 0,06%, devido a baixa dispersão dos resultados.

No Quadro 1.6, a seguir, apresenta-se os resultados obtidos de acordo com os parâmetros regulamentadores do DNIT. As misturas dos dois solos com lodo de ETA foram aprovadas para uso na camada de subleito e as misturas com cimento apenas foi aprovada para emprego de base de pavimento e o de solo arenoso com 10 % de cimento, segundo Coelho *et al.* (2015).

Quadro 1.6 -Emprego dos materiais em pavimento a partir dos critérios do DNIT.

Material	Base	Sub-Base	Subleito
Solo argiloso	Reprovado	Reprovado	Aprovado
Mistura Solo argiloso-Lodo (1:1)	Reprovado	Reprovado	Aprovado
Mistura Solo argiloso-cimento (10%)	Reprovado	-	-

Mistura solo argiloso-lodo-cimento (1:1 - 10%)	Reprovado	-	-
Solo arenoso	Reprovado	Reprovado	Aprovado
Mistura Solo arenoso-lodo (1:0,25)	Reprovado	Reprovado	Aprovado
Mistura Solo arenoso-cimento (10%)	Aprovado	-	-

Fonte: Coelho *et al.* (2015).

Delgado (2016) teve como objetivo o emprego do lodo de ETA de Guandu, em Nova Iguaçu-RJ, em camada de sub-base de pavimento, com a menor alteração possível do resíduo, ou seja, usando lodo *in natura*, para evitar custos com gastos energéticos e viabilizar seu emprego. Sendo assim, usou um lodo com 94% de umidade em relação ao peso total da amostra seca. Foram utilizadas um total de sete misturas, com pó de pedra, solo arenoso, solo argiloso, aditivado com cimento ou não, de acordo com a porcentagem de lodo usado, conforme apresentado pela Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Misturas utilizadas no experimento de Delgado (2016).

Mistura	Materiais			Cimento	Lodo com 94% de umidade (%)
	Pó de pedra (%)	Solo arenoso (%)	Solo argiloso (%)		
P95L5	95	-	-	-	5
P90L10	90	-	-	-	10
P85L15	85	-	-	-	15
P85L15Ci2	85	-	-	2	15
S95L5	-	95	-	-	5
S90L10	-	90	-	-	10
C95L5	-	-	95	-	5

Fonte: Delgado (2016).

Segundo Delgado (2016), apesar da umidade do lodo de ETA ser aparentemente alta (Tabela 3.1), não apresentava quantidade de água visível para as misturas, devido este valor de umidade ser influenciado pela água intersticial e vicinal contida no lodo. Porém, esta alta umidade foi considerada no momento de realizar os cálculos como água de mistura. O ensaio de determinação de umidade foi realizado em estufa a 40°C com ventilação forçada até obter peso constante. Apesar de 40° C não seja o padrão, o autor decidiu determinar a umidade inicial desta forma pelo fato de saber que o lodo contém matéria orgânica, após caracterização química realizada, e desejava-se obter a umidade real. Desta maneira, observou-se que a primeira amostra de lodo coletado nos decantadores possuía um teor de sólidos totais de 6,6% (umidade aproximada de 1400%).

Delgado (2016) realizou a caracterização física (Tabela 3.2), química (Tabela 3.3) e ambiental dos materiais e do resíduo e estudou seu comportamento mecânico, por meio de ensaios de compactação

e triaxial de cargas repetidas, o Módulo de Resiliência (MR), cujos resultados estão apresentados na Tabela 3.4 e Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente.

Tabela 3.2 - Caracterização física dos materiais segundo Delgado (2016).

Caracterização física dos materiais.					
Características Físicas	Lodo ETA 1ª coleta	Lodo ETA 2ª coleta	Pó de pedra	Solo arenoso	Solo argiloso
Limite de Liquidez (%)	-	-	-	-	33
Limite de Plasticidade (%)	NP	NP	NP	NP	12
Índice de Plasticidade (%)	-	-	-	-	21
Massa específica real dos grãos (g/cm ³) – NBR 6508/1984	2,085	2,099	2,689	2,619	2,643
Argila (%)	11	6	2	5	25
Silte (%)	83	84	9	18	15
Areia Fina (%)	6	10	16	22	22
Areia Média (%)	0	0	29	25	22
Areia Grossa (%)	0	0	32	21	11
Pedregulho (%)	0	0	12	9	5
Classificação textural	Silte inorgânico	Silte inorgânico	Pedregulho fino e areia	Areia siltosa	Solo argiloso

Fonte: Adaptado de Delgado (2016).

Tabela 3.3- Caracterização química dos materiais segundo Delgado (2016).

Caracterização Química dos materiais.					
Características Químicas	Lodo ETA 1ª coleta	Lodo ETA 2ª coleta	Pó de pedra	Solo arenoso	Solo argiloso
Matéria Orgânica (%)	14,45	16,68	-	-	-
Compostos encontrados em maior quantidade por FRX* (%)	SiO ₂ (29,4%), Al ₂ O ₃ (37,5%) e Fe ₂ O ₃ (23,5%)	SiO ₂ (26,9%), Al ₂ O ₃ (33,6%) e Fe ₂ O ₃ (29,8%)	SiO ₂ (71,7%), Al ₂ O ₃ (9,9%) e K ₂ O (5,8%)	SiO ₂ (89,9%), Al ₂ O ₃ (5,6%) e K ₂ O (3,1%)	SiO ₂ (83,1%), Al ₂ O ₃ (10,2%) e Fe ₂ O ₃ (3,4%)
Minerais encontrados em maior quantidade por DRX* (Intensidade)	Moscovita, caulinita e gipsita	Moscovita, caulinita e gipsita	Dequite, quartzo e abite	Quartzo e caulinita	Quartzo e caulinita

FRX* Espectrofotometria por fluorescência de raios-X, DRX* Difração de raios-X.

Fonte: Adaptado de Delgado (2016).

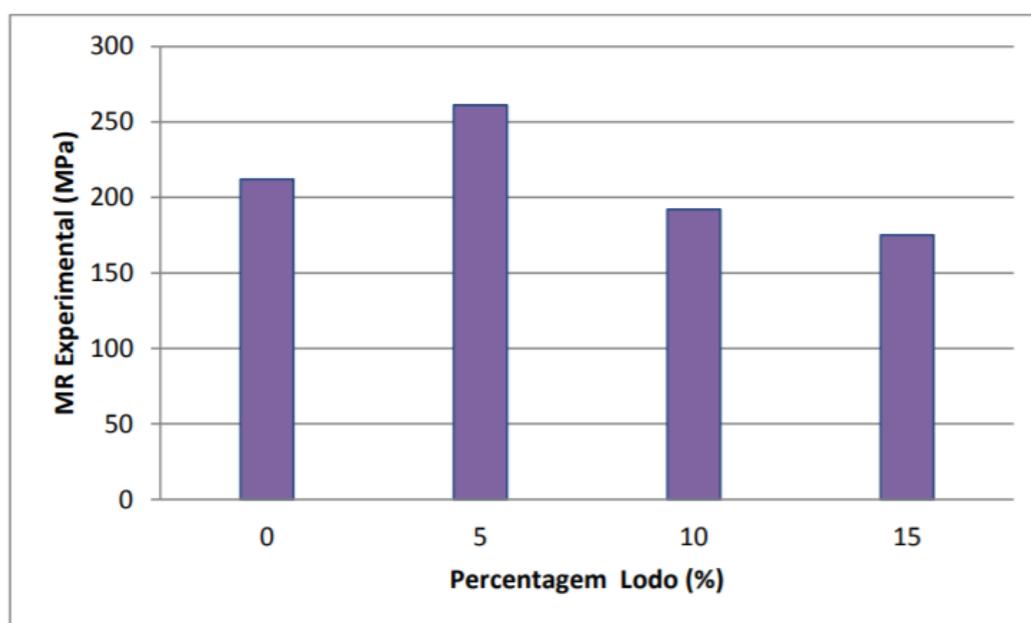
Segundo Delgado (2016) a matéria orgânica foi determinada pelo método do carbono orgânico, seguindo o procedimento do Manual de Métodos de Análise de Solo da EMPRAPA. O teor de carbono encontrado foi multiplicado por 1,724, obtendo-se o teor de matéria orgânica.

Tabela 3.4 - Resultados obtidos das curvas de compactação dos materiais e misturas com lodo de ETA.

Material/Mistura	Umidade ótima admitida (%)	MEAS máxima (g;cm ³)
P100	7,0	1,88
P95L5	13,0	1,70
P90L10	13,0	1,56
P85L15	18,50	1,45
P85L15Ci2	4,50	2,01
S95L5	10,80	1,82
S90L10	15,0	1,67
C100	9,80	1,94
C95L5	14,50	1,78

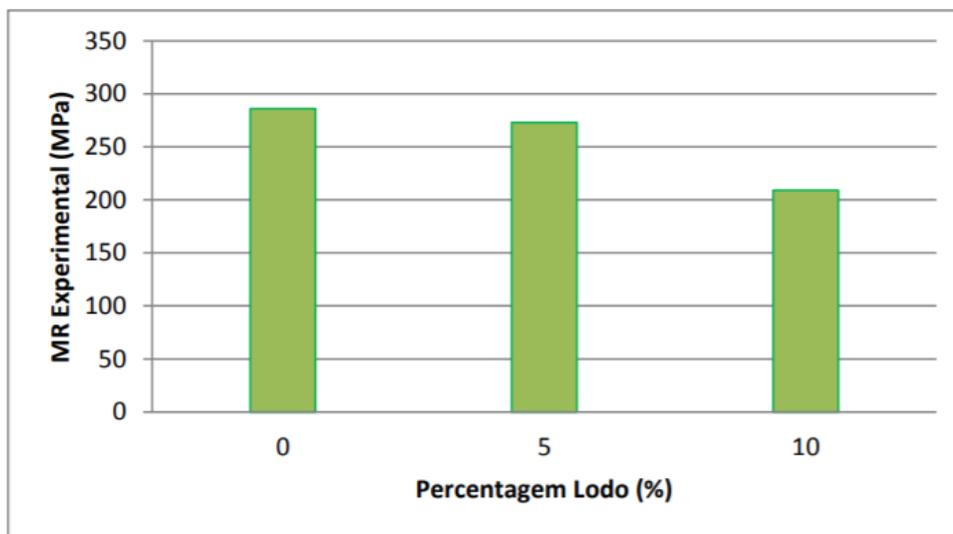
Fonte: Adaptado de Delgado (2016).

Figura 4.6 - Variação do módulo de resiliência com o teor de lodo de ETA para o material pó de pedra.



Fonte: Adaptado de Delgado (2016).

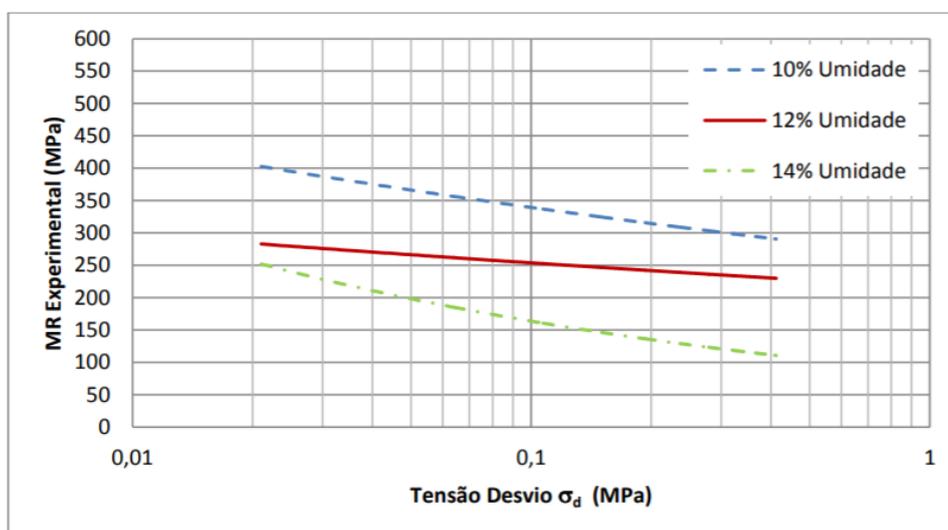
Figura 4.7 - Variação do módulo de resiliência com o teor de lodo de ETA para o material solo arenoso.



Fonte: Adaptado de Delgado (2016).

No caso do solo argiloso, segundo Delgado (2016), devido ao teor de finos na mistura com o lodo de ETA seu comportamento mecânico não foi favorável no que diz respeito ao MR. Conforme observa-se na Figura 4.8, ao aumentar a umidade seu MR reduziu, vale ressaltar que, para o teor de umidade de 12% os valores de MR foram quase constantes, mesmo com o aumento da tensão confinante e da tensão desvio, por este material ter uma quantidade significativa de argila ao elevar a tensão desvio seu MR tende a reduzir, caso oposto ao que ocorre com as areais.

Figura 4.8- Comparação do comportamento resiliente da mistura solo argiloso e lodo de ETA.



Fonte: Adaptado de Delgado (2016).

Para a mistura com maior teor de lodo (15%) foi adicionado 2% de cimento, por ser um material granular. Através dos ensaios mecânicos realizados por Delgado (2016), nota-se que a mistura com comportamento mais satisfatório foi de lodo com pó de pedra na porcentagem de 5%, conforme Figura 4.6, sem adição de agente estabilizador. Sendo assim, tem-se uma alternativa viável do emprego do lodo de ETA *in natura*, em sub-base, combinado com pó de pedra, diminuindo os custos e apresentando uma disposição final ambientalmente adequada.

Lucena *et al.* (2012) propôs a caracterização e avaliação do uso de lodos de ETA e ETE, de Igarassu-PE e Recife-PE, respectivamente, para uso em base e sub-base de pavimentos, de acordo com os parâmetros estabelecidos por normas do Brasil e EUA. Para isso, foram feitos ensaios de caracterização química, física e mecânica, esse último através de ensaios de Índice de Suporte Califórnia (CBR), com misturas de solo granular tipo A-2-4 e lodo de ETA e ETE, coletadas do leito de secagem da estação, nas porcentagens de 5%, 10%, 15% e 20% e Módulo de Resiliência (MR), nas porcentagens de 20% de lodo de ETA e 10% de lodo de ETE. Nas Tabelas 3.5 e 3.6 são apresentadas as características físicas e químicas encontradas pelos ensaios realizados com os materiais de lodo de ETA, ETE e solo fino siltoso..

Tabela 3.5 - Caracterização física dos materiais segundo Lucena *et al.*, 2012.

Caracterização física dos materiais.			
Características Físicas	Lodo de ETA	Lodo de ETE	Solo fino siltoso
Limite de Liquidez (%)	-	90	23,0
Limite de Plasticidade (%)	NP	77,9	17,0
Índice de Plasticidade (%)	-	12,1	21,0
Umidade (%)	53,0	22,6	16,0
Massa específica real dos grãos (g/cm ³)	2,40	2,11	2,60

Fonte: Adaptado de Lucena *et al.*, (2012).

Tabela 3.6 - Caracterização Química dos materiais segundo Lucena *et al.*, 2012.

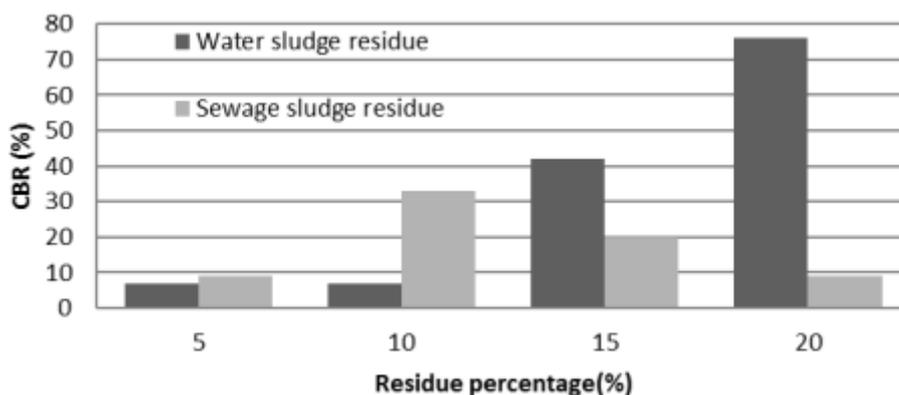
Caracterização Química dos materiais.			
Características Químicas	Lodo	Lodo	Solo fino
	ETE	ETA	Siltoso
Compostos encontrados em maior quantidade por FRX* (%)	SiO ₂ (34,11) ^a , (28,54) ^b , Al ₂ O ₃ (15,82) ^a , (13,24) ^b e Fe ₂ O ₃ (13,31) ^a , (11,13) ^b , SO ₃ (12,18) ^a , (10,19) ^b , CaO (11,52) ^a , (9,64) ^b , P ₂ O ₅ (6,82) ^a , (5,70) ^b	SiO ₂ (33,11) ^a , (29,66) ^b , Al ₂ O ₃ (37,28) ^a , (33,29) ^b e Fe ₂ O ₃ (26,04) ^a , (23,33) ^b	-
Minerais encontrados em maior quantidade por DRX* (Intensidade)	Caulinita, mica, quartzo, silicato de alumínio e gibsita	Caulinita, quartzo, anortita e illita	-

FRX* Espectrofotometria por fluorescência de raios-X, DRX* Difração de raios-X.
a - sem perda por queima, b- com perda por queima.

Fonte: Adaptado de Lucena et al., (2012).

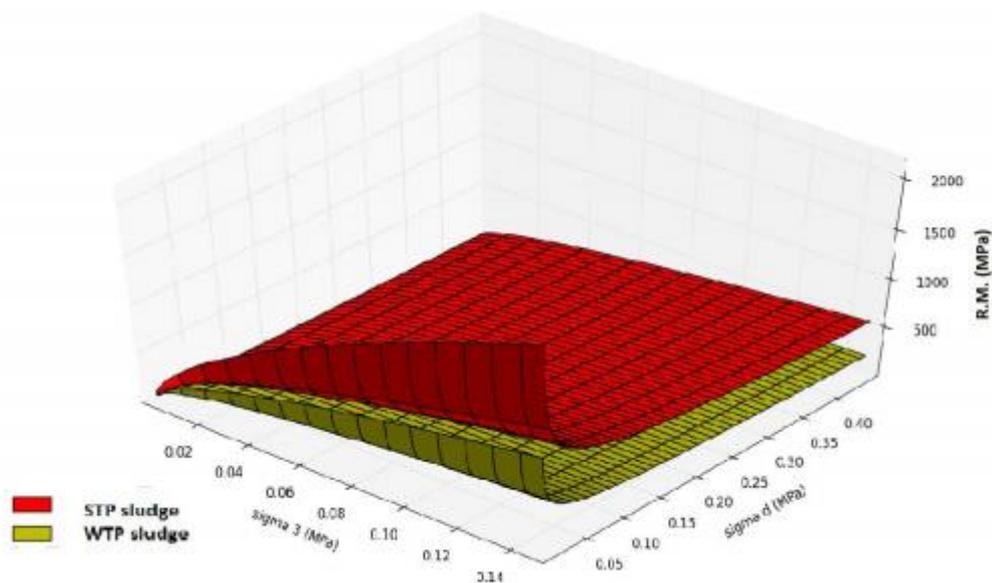
Os resultados apresentados por Lucena *et al.* (2012) demonstram que, no ponto de vista do CBR, os valores de 20% de lodo de ETA e 10% de lodo de ETE, misturados no solo, apresentaram os melhores índices de resistência mecânica, e posteriormente testado essas misturas ótimas, quanto ao MR. Sendo assim, apresentaram-se aptos ao uso em base e sub-base de pavimentos, em tráfego intermediário para lodo de ETA e tráfego leve para lodo de ETE, de acordo com os parâmetros do DNIT. Testes com mistura de 25% de lodo de ETA foram feitas, e obteve-se resultados de CBR abaixo da mistura com 20% de lodo de ETA, apresentando a hipótese de uma porcentagem máxima de emprego do lodo na mistura, por conta do efeito prejudicial a estabilização do solo pela elevada concentração do coagulante sulfato de alumínio. Na Figura 4.9 e 5.1 tem-se os resultados de CBR e MR encontrados nas misturas solo-lodo encontradas.

Figura 4.9 -Testes de CBR com as misturas de solo-lodo.



Fonte: Lucena et al., (2012).

Figura 5.1 -Testes de MR com as misturas de solo-lodo de ETA 20% e ETE 10%.



Fonte: Lucena et al., (2012).

Com os resultados obtidos pelo estudo citado anteriormente por Lucena *et al.*(2012), indicando que o teor de 10% de lodo de ETE na mistura possuía parâmetros ideais para o uso em sub-base de pavimentação para tráfego leve, em uma análise posterior, Lucena et al. (2014) propôs o percentual de 10% de lodo de ETE misturado ao mesmo solo utilizado anteriormente em Lucena et al. (2012) com aditivos estabilizantes, como cimento, cal e emulsão asfáltica, nas porcentagens de 2, 4, 6 e 8%, no intuito de avaliar a resistência do solo modificado. A Tabela 3.7 apresenta as características físicas e químicas encontradas através dos ensaios realizados nos materiais do solo e lodo de ETE.

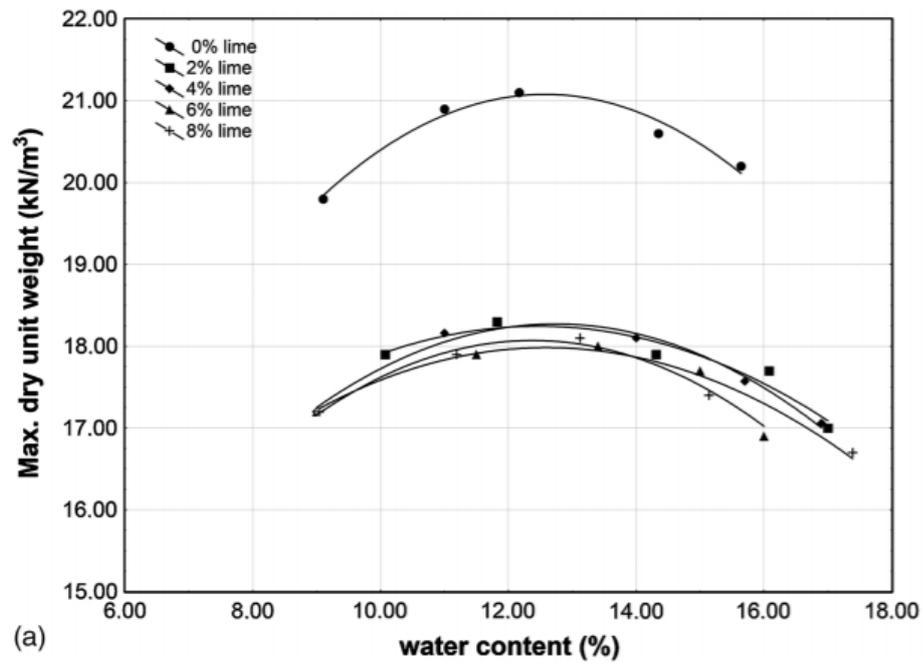
Tabela 3.7 - Caracterização dos materiais segundo Lucena et al.(2014).

Propriedades	Valores	
	Solo	Lodo de ETE
Propriedades físicas		
Umidade	16%	22%
Limite de liquidez	23%	40%
Limite de plasticidade	17%	27%
Índice de plasticidade	6%	13%
Massa específica	2,60 g/cm ³	1,95 g/cm ³
Partículas		
Areia	91%	50%
Silte	7%	22%
Argila	2%	28%
Propriedades químicas		
Silica (SiO ₂)	49,30%	28,54%
Alumina (Al ₂ O ₃)	35,30%	13,24%
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	10,91%	11,13%
Outros óxidos	2,37%	30,90%
Perda por queima	2,30%	16,33%

Fonte: Lucena et al., (2014).

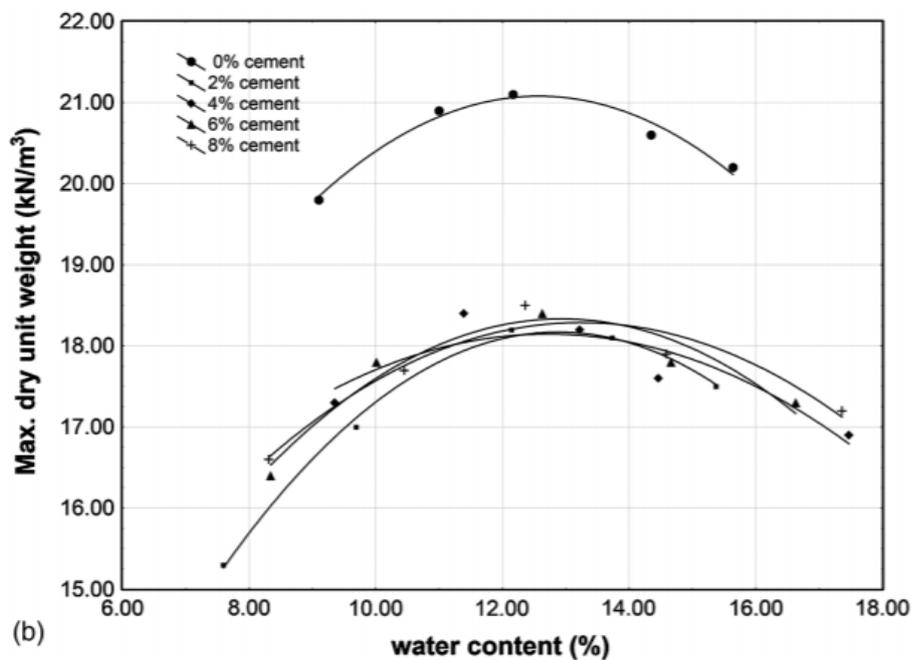
De acordo com Lucena *et al.* (2014) os materiais de solo e lodo de ETE mais aditivos estabilizantes foram sujeitos a ensaios de compactação (Figura 5.2, 5.3 e 5.4), índice de suporte Califórnia (CBR) (Figura 5.5), resistência a compressão não confinada (Tabela 3.8), resistência a tração indireta (Tabela 3.9), módulo de resiliência (Figura 5.6) e testes de deterioração (Figura 5.7 e 5.8). Testes mecânicos foram usados para estimar a mistura ótima de lodo com solo. Os testes mecânicos mostraram que a mistura com 10% de lodo de ETE e 8% de aditivo de cimento, possuía a maior resistência mecânica dentre todas as amostras, apesar das outras porcentagens atenderem aos critérios de uso em pavimentos, resultando em um projeto mais econômico. Os resultados obtidos indicaram que a estabilização das misturas de solo e lodo de ETE possuem o potencial para ser usado na indústria de pavimentação.

Figura 5.2- Curva de compactação na mistura com cal segundo Lucena *et al.*



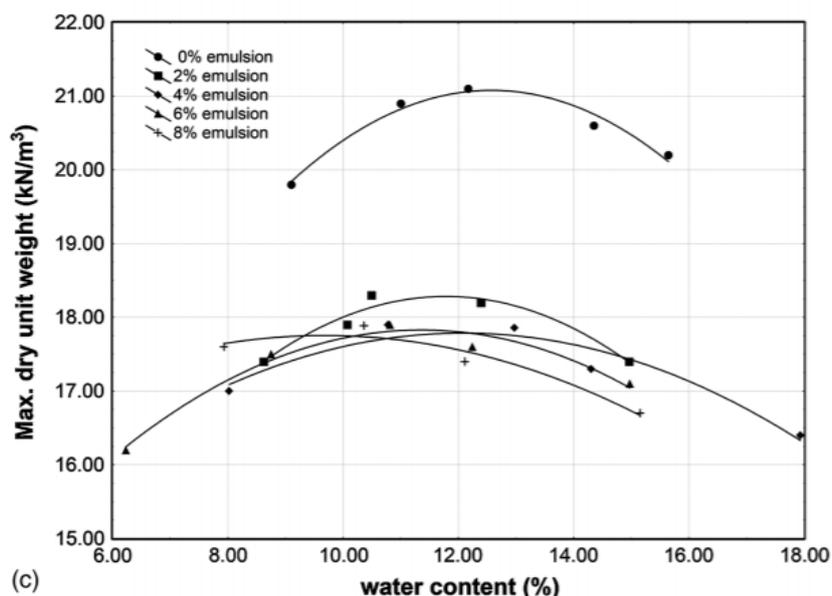
Fonte: Lucena et al., (2014).

Figura 5.3 - Curva de compactação na mistura com cimento segundo Lucena *et*



Fonte: Lucena et al., (2014).

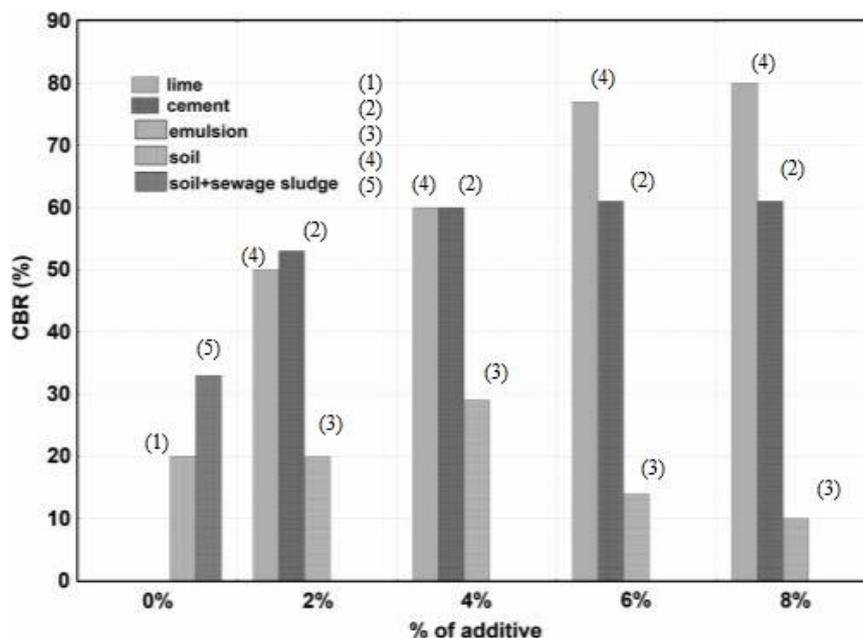
Figura 5.4 - Curva de compactação na mistura com emulsão asfáltica segundo



Fonte: Lucena et al., (2014).

De acordo com Lucena *et al.* (2014) o peso unitário seco máximo diminuiu com a adição de aditivo, enquanto o conteúdo ideal de água aumentou. O peso máximo da unidade seca diminuiu com a aeração do solo durante o processo de mistura. Dependendo do aditivo, pode-se diminuir em 4 a 10% por 1% de aditivo adicionado. Segundo Mitchell e Hooper (1961) *apud* Lucena et al., (2014) esse fato é afetado pelo comportamento de floculação-dispersão, a adição de cal e cimento afeta o campo eletrostático entre as partículas do solo e como resultado, aumenta a taxa de vazios. A emulsão tem peso específico inferior quando comparada ao solo, o que pode explicar a redução (JACINTHO 2010, *apud* LUCENA ET AL., 2014). Essa redução pode ser resultado da dissipação da compactação de energia pela emulsão, sendo que a emulsão impede que a energia de compactação modifique a estrutura do solo, pois absorve parte do esforço de compactação. Como resultado, a mistura geral acaba com uma densidade mais baixa.

Figura 5.5 - Testes de CBR com o solo, aditivos de cal, cimento, emulsão asfáltica e misturas com o lodo de ETE segundo Lucena *et al.* (2014).



Fonte: Adaptado de Lucena et al., (2014).

De acordo com Lucena et al., (2014), a mistura de solo-lodo de ETE-cal pode ser usada para camadas de base de asfalto. A adição de 2% de cal foi indicada para tráfego leve ($N < 10^6$), 4 e 6% para tráfego moderado ($10^6 < N < 5 \times 10^6$) e 8% para tráfego pesado ($N > 5 \times 10^6$). Quanto à adição de cimento, verifica-se que a base foi estabilizada com 2% de cimento para tráfego baixo e 4% para tráfego moderado. A adição de 6–8% de cimento não foi indicada porque não melhora a resistência do material e apresentaria custos de construção mais elevados. Os valores de CBR (55 a 60%) com adição de cimento foram semelhantes aos encontrados por Eren e Filiz (2009) *apud* Lucena et al., (2014). A adição de emulsão asfáltica não produz melhora na capacidade de carga do solo. As misturas com emulsão apresentaram valores de CBR inferiores às misturas sem emulsão. A Figura 5.5 mostrou que os valores de CBR diminuem à medida que o conteúdo da emulsão aumenta. Araya et al. (2012) *apud* Lucena et al., (2014) relataram que as metodologias de projeto de pavimentos em países em desenvolvimento são de natureza empírica e dependem de parâmetros de entrada como o CBR, apesar do fato de esse parâmetro não ser de natureza mecanicista, o que permitiria a previsão do desempenho. De acordo com Gondim (2008) *apud* Lucena et al., (2012), os resultados de CBR não são adequados para misturas quimicamente estabilizadas, e os métodos de projeto empírico para tais misturas normalmente consideram a resistência à compressão. A justificativa dos autores são corretas ao avaliar os resultados apenas para o aumento da coesão decorrente da cimentação. No entanto, se for analisado o melhoramento do solo por meio da adição de estabilizantes resultantes da troca catiônica, os resultados de CBR podem ser considerados.

Tabela 3.8 - Tensão de Resistência a compressão simples segundo Lucena *et al.* (2014).

Aditivo (%)	Resistência a compressão simples (kPa)								
	Cal			Cimento			Emulsão asfáltica		
	Cura seca	Cura úmida	Cura úmida	Cura seca	Cura úmida	Cura úmida	Cura seca	Cura úmida	Cura úmida
	7 dias	7 dias	28 dias	7 dias	7 dias	28 dias	7 dias	7 dias	28 dias
2	1121	197	1000	900	335	489	1104	1000	851
4	1137	261	1137	970	855	670	1316	1000	1016
6	1139	302	1211	1315	944	1048	1367	920	906
8	1141	399	1300	1500	714	1200	930	723	945

Fonte: Lucena et al., (2014).

Segundo Lucena et al., (2014) os valores de resistência (900 a 1200 kPa) encontrados na Tabela 3.8 foram superiores aos obtidos por Basha et al. (2005) ao estudar a adição de 8% de cimento e cinza de arroz em um solo residual. Os valores obtidos com a adição de cimento são superiores aos recomendados pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Texas segundo Batista (1976), acima de 700 kPa para camadas de base. O DNIT indica um mínimo de 2,1 MPa para misturas de solo-cimento. De acordo com Goodary et al. (2012) *apud* Lucena et al., (2014), solos com menor superfície específica requerem maiores quantidades de cimento para proporcionar maior resistência e durabilidade. O ganho de resistência foi observado quando a cura úmida de 28 dias foi comparada com a cura úmida de 7 dias. Tempos de cura maiores contribuem para as reações pozolânicas. Devido à diferença na resistência à compressão das misturas submetidas à cura a seco e úmido de 7 dias, o ganho descrito não é todo resultado da ação do estabilizador. A pressão negativa da água do poro (sucção do solo) resultante da presença de água entre as partículas do solo tem um efeito significativo na resistência do pavimento. Os valores (900 a 1400 kPa) encontrados neste estudo são consistentes com a literatura relatada para solos granulares por adição de emulsão (Ferreira 1980; Micelli et al. 2007; Soliz 2007; Gondim 2008; Santána 2009). Micelli et al. (2007) *apud* Lucena et al., (2014) também estudaram a influência de diferentes procedimentos de cura na resistência. O autor analisou a adição de 2–4% de emulsão por peso na amostra de solo submetida à cura úmida e seca. Para ambas as concentrações de emulsão, verifica-se que as misturas com cura úmida apresentaram menor resistência do que as misturas com cura seca.

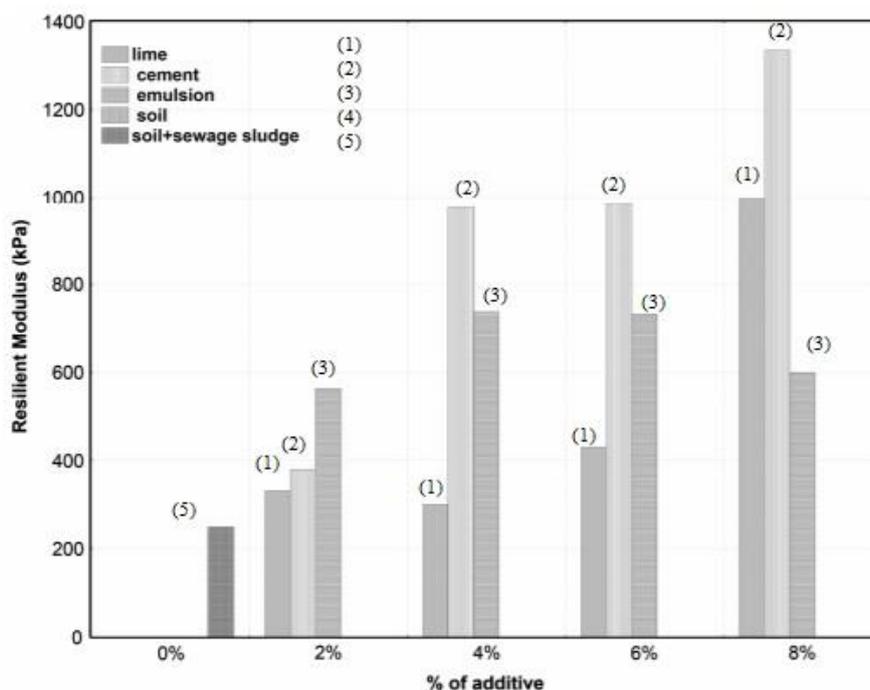
Tabela 3.9 - Tensão de Resistência a Tração Indireta segundo Lucena *et al.* (2014).

Aditivo (%)	Tensão de Resistência a Tração Indireta (MPa)					
	Cal		Cimento		Emulsão asfáltica	
	Cura 7 dias	Cura 28 dias	Cura 7 dias	Cura 28 dias	Cura 7 dias	Cura 28 dias
2	0,143	0,100	0,136	0,094	0,069	0,140
4	0,185	0,221	0,198	0,237	0,153	0,118
6	0,249	0,260	0,220	0,228	0,252	0,228
8	0,229	0,223	0,364	0,387	0,266	0,243

Fonte: Lucena et al., (2014).

Para Lucena et al. (2014), as amostras testadas após 7 dias de cura úmida apresentaram resistência muito baixa. Portanto, não foi possível determinar o valor máximo suportado pelas amostras. Os resultados Resistência a Tração Indireta (RTI) apresentados na Tabela 3.9 das misturas sem aditivos mostraram pequena coesão do solo, como esperado para solos granulares. Em contrapartida, verificou-se que a estabilização das misturas aumenta o valor de RTI em 400%. Ao comparar misturas de solo e lodo com misturas também contendo cimento, o cimento mostrou-se um aditivo muito eficaz para aumentar a resistência. A Tabela 3.9 demonstra que o teor ideal de cimento é de 8%. Os resultados da utilização do RTI mostram a mesma tendência obtida no teste RCS. Os resultados indicam que a RTI aumenta com o aumento do teor de emulsão quando 2% de emulsão foi adicionado ao solo, e permaneceu relativamente constante quando o teor de emulsão foi aumentado para 6%. A Tabela 3.9 indica uma diminuição significativa da resistência com o aumento do período de cura. Os resultados desta pesquisa são semelhantes aos encontrados por Gondim (2008). Ambas as investigações realizaram os testes no Nordeste do Brasil, conhecido por suas altas temperaturas.

Figura 5.6 - Testes de MR com o solo, aditivos de cal, cimento, emulsão asfáltica e misturas com o lodo de ETE segundo Lucena *et al.* (2014)..

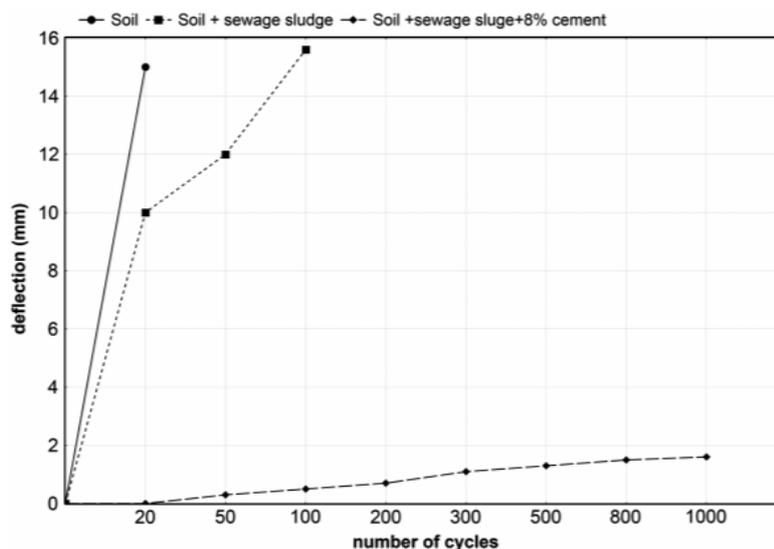


Fonte: Adaptado de Lucena et al., (2014).

De acordo com Lucena et al., (2014) o valor representativo de MR foi determinado aplicando o último par de tensões do teste triaxial dinâmico. Foi determinado o valor de MR a uma tensão de desvio de 0,412 MPa e uma pressão de confinamento de 0,137 MPa. Estas foram estimativas do estado de tensão encontrado na camada de subleito sob carga de tráfego apresentados na Figura 5.6. Segundo

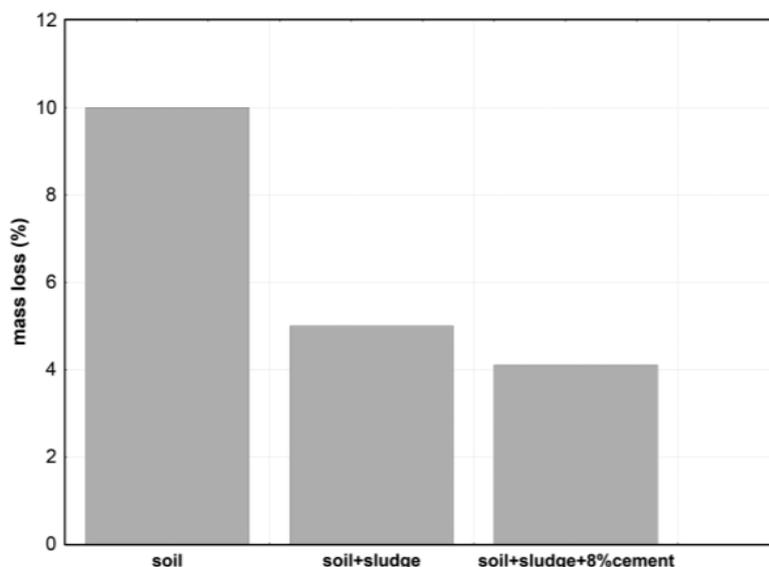
Marangon (2004) *apud* Lucena et al., (2014), esses níveis de tensões correspondem aproximadamente às condições dos materiais no topo da camada logo abaixo de um revestimento fino (topo da base) sob o eixo padrão nos pavimentos de baixo volume de tráfego. A Figura 5.6 mostra os valores de MR para as misturas com lodo de ETE. Conforme os aditivos foram adicionados, o MR aumentou. Tal como acontece com os resultados RTI e RCS, o teor ideal de aditivo é de 8% de cimento.

Figura 5.7 - Efeito dos aditivos no lodo de ETE com solo segundo



Fonte: Lucena et al., (2014).

De acordo com Lucena et al., (2014), para solo com lodo e mistura com cimento foi evidente que todas as camadas de base exibiram menores profundidades de deflexão na superfície do que o solo puro. Os resultados da Figura 5.7 mostraram que a mistura com cimento, embora submetida a maior carga de roda, apresentou profundidade de deflexão da superfície menor que as demais. A profundidade da camada de base no milésimo ciclo de mistura com cimento foi de 1,8 mm, sendo de 15 mm para a base do solo no 20º ciclo e de 15,8 mm no 100º ciclo para o solo com lodo.

Figura 5.8 - Perda por abrasão em via úmida segundo Lucena *et al* (2014).

Fonte: Lucena et al., (2014).

Nos resultados apresentados na Figura 5.8, Lucena et al., (2014) observou-se que a perda por abrasão por via úmida para composições com solo puro foi considerada maior em comparação com aquela com lodo. O aumento observado e calculado na perda de peso na mistura com o cimento atribui-se à natureza do aditivo, que possui propriedades pozolânicas. A partir dos resultados dos testes de deterioração e abrasão por via úmida, observou-se que a mistura de solo granular com lodo de esgoto estabilizado com cimento apresentou comportamento de maior resistência em relação às demais.

O teor de metais pesados no lodo foi inferior aos valores padrão propostos para solos não poluídos pela NBR 10004 (ABNT 2004a) e pelo código de normas de registro federal. Algumas concentrações (Mn e Ni) foram superiores aos valores do Ministério da Saúde (MS) e da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) para concentração de metais pesados. Portanto, o lodo puro pode ser classificado como resíduo perigoso. Os resultados dos metais pesados nas concentrações das misturas foram inferiores aos obtidos para o lodo puro. As misturas estabilizadas podem ser classificadas como materiais inertes pela NBR 10004 (Tabela 4.1 e 4.2).

Tabela 4.1 - Valores máximos permitidos extraídos no teste de lixiviação segundo Lucena *et al.* (2014).

Identificação da Amostra	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Zn	Al
	mg/L										
Solo-lodoETE-cimento	0,20	<0,05	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	-	0,10	<0,10	0,30	-
Lodo ETE	0,33	0,05	0,10	0,010	<0,10	0,12	33,20	0,32	0,21	0,41	-
Limites padrão	1,000 ¹	0,500 ¹	5,000 ¹	1,00 ¹	2,0 ³	0,3 ³	-	0,1 ²	0,02 ³	5 ³	0,82 ²

Fonte: Lucena et al., (2014).

Tabela 4.2 - Valores máximos permitidos extraídos no teste de solubilização segundo Lucena *et al.* (2014).

Identificação da Amostra	As	Cd	Cr	Pb	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Al	Mg
	mg/L										
Solo-lodo ETE-cimento	<0,01	<0,01	<0,001	<0,01	<0,10	<0,10	<0,10	0,03	<0,10	-	-
Lodo ETE	0,01	<0,05	0,1	0,39	0,10	8,52	0,77	0,35	0,48	-	43,33
Limites padrão	0,01 ¹	0,05 ¹	0,005 ¹	0,01 ¹	2,0 ³	0,3 ³	0,1 ²	0,02 ³	5,0 ³	0,2 ²	-

Fonte: Lucena et al., (2014).

¹ ABNT NBR 10005 (2004b) e ABNT NBR 10006 (2004c) e CFR (2003).

² Ministério da Saúde (MS) - Portaria Nº 518 de 2004 (MS, 2004)

³ Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) - Portaria Nº 195 de 2005 (CETESB,2005)

Com os resultados obtidos pelo estudo citado anteriormente, agora para lodo de ETA, em Lucena et al., (2012), que indicou a porcentagem de 20% de lodo de ETA na mistura como parâmetros ideais para o uso em sub-base de pavimentação para tráfego intermediário, numa análise posterior, Lucena et al., (2014) propôs o teor de 20% de lodo de ETA misturado ao mesmo solo utilizado anteriormente em Lucena et al., (2012) com aditivos estabilizantes, como cimento, cal e emulsão asfáltica, nas porcentagens de 1%, 2%, 3% e 4%, no intuito de avaliar a resistência do solo modificado. Na Tabela 4.3 apresentam-se os resultados das características físicas e químicas encontradas através dos ensaios realizados para os materiais de solo e lodo de ETA do estudo.

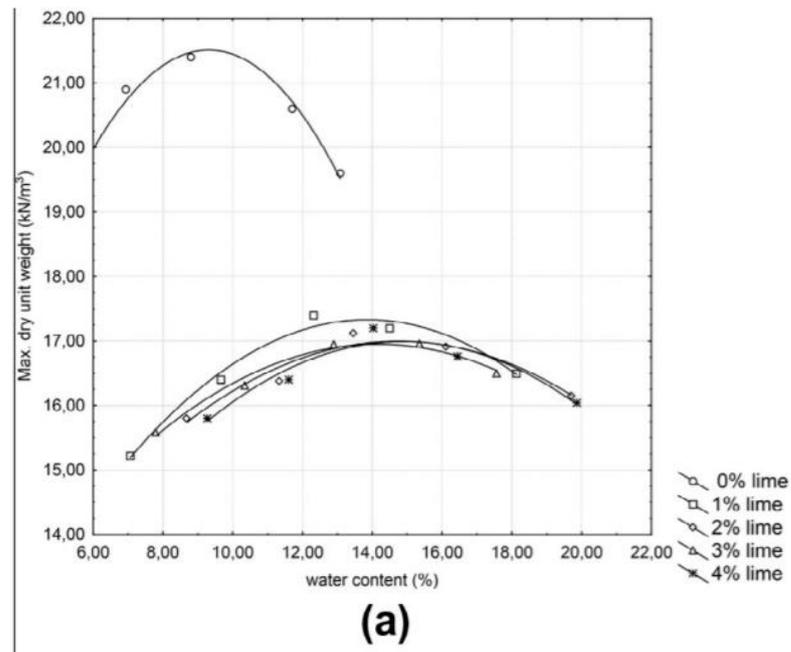
Tabela 4.3 - Caracterização dos materiais segundo Lucena *et al.*(2014).

Propriedades	Valores	
	Solo	Lodo de ETA
Propriedades físicas		
Umidade	16%	53%
Limite de liquidez	23%	NL
Limite de plasticidade	17%	NP
Índice de plasticidade	6%	-
Massa específica	2,60 g/cm ³	2,05 g/cm ³
Partículas		
Areia	91%	93%
Silte	7%	2%
Argila	2%	1%
Propriedades químicas		
Silica (SiO ₂)	49,30%	29,66%
Alumina (Al ₂ O ₃)	35,30%	33,29%
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	10,91%	23,33%
Outros óxidos	2,37%	3,2%
Perda por queima	2,30%	10,43%

Fonte: Lucena et al., (2014).

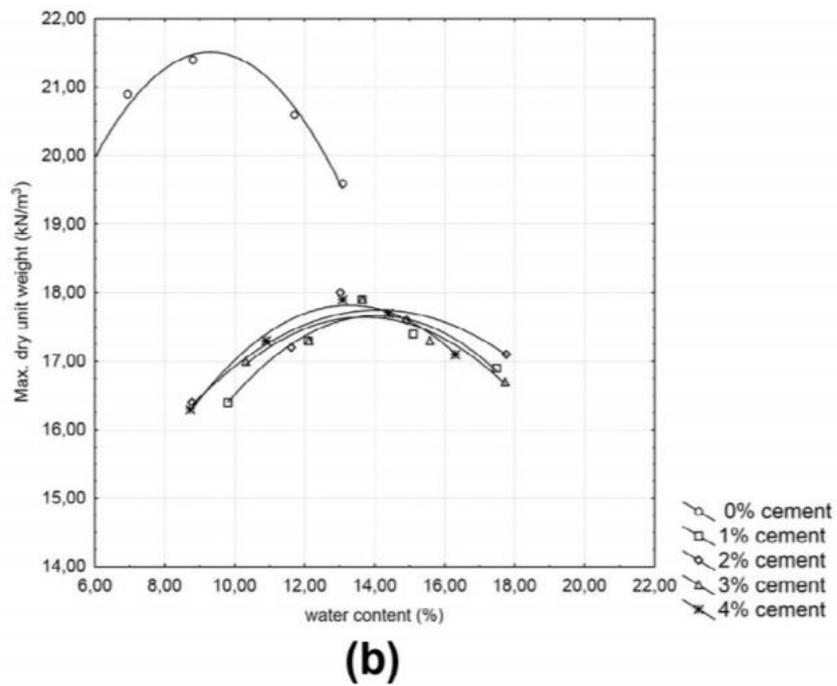
Segundo Lucena *et al.*(2014), os materiais de solo e lodo de ETA mais aditivos estabilizantes foram sujeitos a ensaios de compactação (Figuras 5.9, 6.1, 6.2 e 6.3), sendo no caso (c) o teor de água considerado foi apenas a água adicionada ao solo e no caso (d) o teor de água considerado foi para o betume e a água adicionada à mistura. Além deste ensaio, realizou-se também o índice de suporte Califórnia (CBR) (Figura 6.4), resistência a compressão simples (Tabela 4.4), resistência a tração indireta (Tabela 4.5), módulo de resiliência (Figura 6.5) e testes de deterioração (Figura 6.6 e 6.7). Testes mecânicos foram usados para estimar a mistura ótima de lodo com solo. Os testes mecânicos mostraram que a mistura com 20% de lodo de ETA e 1% de aditivo de emulsão asfáltica, possuía a maior resistência mecânica dentre todas as amostras, além disso a adição de apenas 1% de cal ou cimento aumentou os valores dos testes em cerca de 200%. Os resultados obtidos indicaram que a estabilização das misturas de solo e lodo de ETA possuem o potencial para ser usado na indústria de pavimentação.

Figura 5.9 - Curva de compactação na mistura com cal segundo Lucena *et al.*(2014).



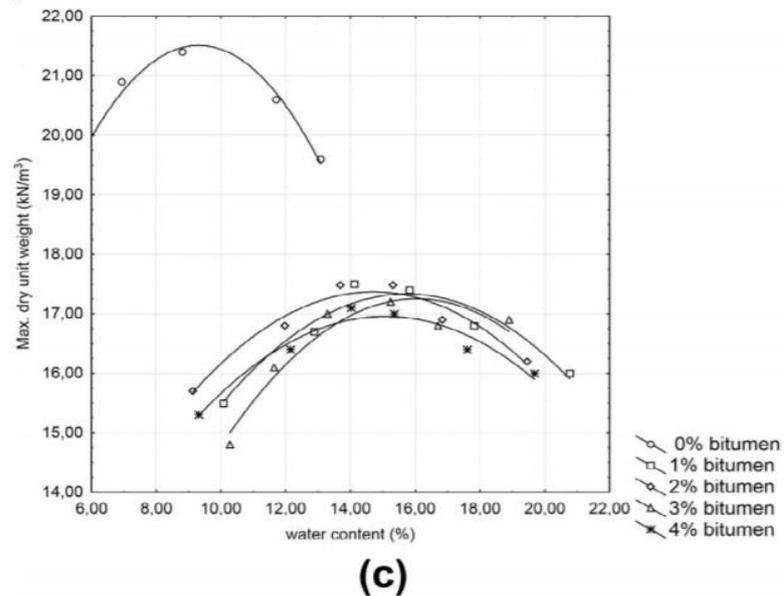
Fonte: Lucena et al., (2014).

Figura 6.1 - Curva de compactação na mistura com cimento segundo Lucena *et al.*(2014).



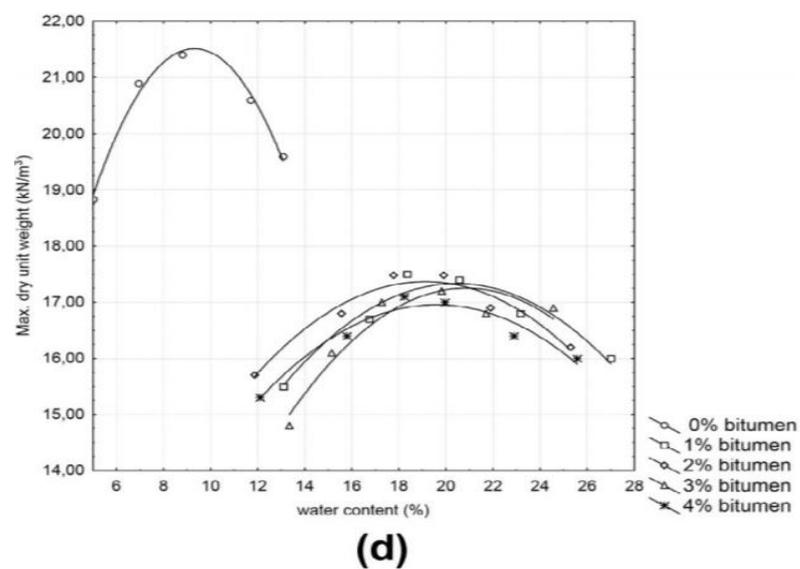
Fonte: Lucena et al., (2014).

Figura 6.2 -Curva de compactação na mistura com emulsão asfáltica solidificada (resfriado) segundo Lucena *et al.*(2014).



Fonte: Lucena et al., (2014).

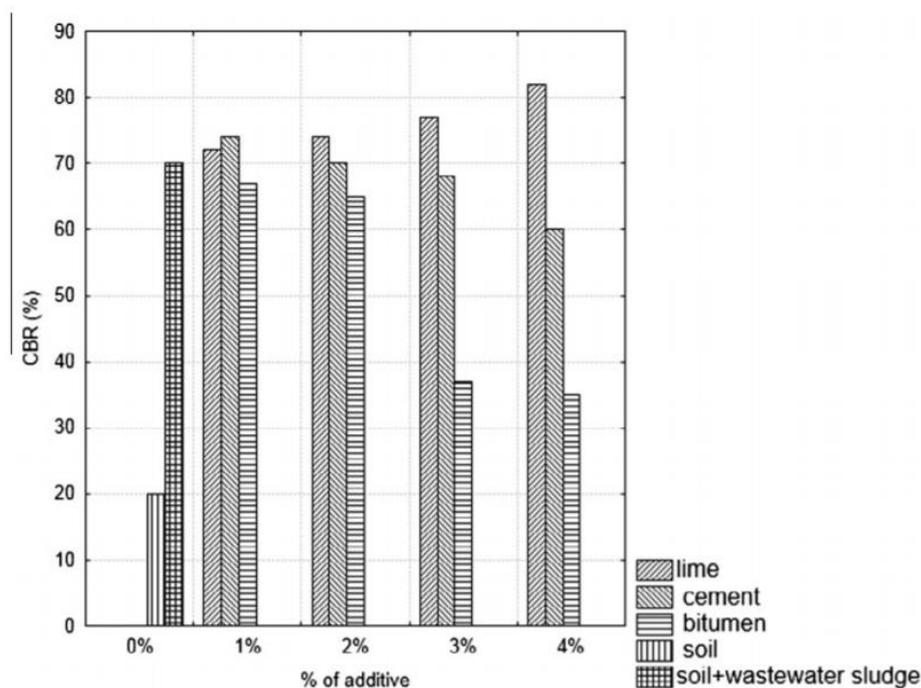
Figura 6.3 - Curva de compactação na mistura com emulsão asfáltica líquida (quente) segundo Lucena *et al.*(2014).



Fonte: Lucena et al., (2014).

De acordo com Lucena et al., (2014), os resultados do peso seco máximo unitário para as amostras com adição de cal e cimento foram inferiores aos obtidos com o uso de solo puro e resíduo. Portanto, quanto maior for o teor adicionado à mistura, menor será o valor do peso unitário seco máximo. Lowato (2004) *apud* Lucena et al., (2014) analisou os efeitos da ação do calcário na estabilização de um solo laterítico do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Os resultados mostraram que o peso unitário seco máximo das misturas solo-calcário era inferior ao peso específico real do solo natural; e a umidade ótima das misturas solo-cal eram mais altas do que a umidade ótima para as amostras naturais de solo por causa da floculação das partículas de solo pela adição desse aditivo. Há uma variação marginal (2–3%) no teor de umidade ideal e nos valores de densidade seca máxima conforme o teor de cimento aumenta. O teor de umidade ideal diminui à medida que o teor de betume da mistura aumenta. O peso máximo unitário seco diminuiu com a adição de asfalto, cuja densidade é menor que a dos grãos do solo. Segundo Jacintho (2010) *apud* Lucena et al., (2014), a dissipação da energia de compactação pela combinação do betume e da água influencia na redução. Isso ocorre porque a mistura evita que a energia atinja a estrutura do solo, além de alterar a viscosidade do fluido e diminuir a transferência da energia de compactação para a estrutura do solo. Pelas curvas de compactação quando o betume é tratado como um fluido, pode ser possível encontrar uma linha de tendência conectando o conteúdo ideal de fluidos. Essa linha é bem definida e fica próxima à parte úmida do solo sem betume.

Figura 6.4 -Testes de CBR com o solo, aditivos de cal, cimento, emulsão asfáltica e misturas com o lodo de ETA segundo Lucena *et al.*(2014).



Fonte: Adaptado de Lucena et al., (2014).

A Figura 6.4, segundo Lucena et al., (2014), indica que a adição de 4% de cal na mistura solo - lodo de esgoto levou a um CBR acima de 80%, mostrando o potencial de uso em tráfego pesado. A adição de cimento à mistura de solo e lodo de esgoto provoca aumento no valor de CBR para o teor de 1%, com tendência decrescente ao se observar os demais teores investigados. Uma explicação é que o lodo de ETA apresenta sulfato de alumínio ou sulfato de ferro em sua composição, devido à adição de coagulantes ETA. Estes, quando misturados ao cimento, podem reagir com hidróxidos liberados pela hidratação do cimento originando compostos expansivos e causando diminuição da resistência. A adição de betume leva a valores de CBR inferiores aos alcançados pela mistura de lodo de água residual sem betume. É esperado um declínio no valor CBR com o aumento do conteúdo de betume, conforme relatado na literatura para solos estabilizados com betume (Jacintho, 2005; Gondim, 2008; Santos, 2009; Souza et al., 2009).

Tabela 4.4 -Tensão de Resistência a compressão simples segundo Lucena *et al.*(2014).

Aditivo (%)	Resistencia a compressão simples (kPa)								
	Cal			Cimento			Betume		
	Cura seca 7 dias	Cura úmida 7 dias	Cura úmida 28 dias	Cura seca 7 dias	Cura úmida 7 dias	Cura úmida 28 dias	Cura seca 7 dias	Cura úmida 7 dias	Cura úmida 28 dias
1	540	102	600	930	164	730	1309	800	1112
2	590	109	610	950	172	800	1250	703	1052
3	624	109	460	1027	219	900	1150	656	1030
4	730	110	740	1028	283	960	1145	567	980

Fonte: Lucena et al., (2014).

Os resultados obtidos na Tabela 4.4 com a adição de aditivos, segundo Lucena et al., (2014), foram superiores aos obtidos com o solo puro (113 kPa) e para a mistura de solo com lodo de ETA sem nenhum aditivo (147 kPa). Nota-se a importância da cura a seco por um período de 7 dias, levando a aumentos significativos da RCS quando comparada à cura úmida. A diferença na RCS deve ser parcialmente creditada à sucção. Estudos relacionados à sucção do solo podem ajudar a explicar essa parte da resistência porque os materiais de base e sub-base geralmente estão em condições insaturadas. Os valores de RCS das misturas submetidas à cura úmida após 28 dias são superiores aos da cura úmida após 7 dias. Isso indica a importância de tempos de cura maiores para que as reações químicas ocorram. No entanto, algumas amostras apresentaram maior RCS com cura a seco após 7 dias do que com cura úmida após 28 dias. Esse fato mostrou que a sucção do solo pode ter maior influência no comportamento da mistura do que as reações pozolânicas. A adição de 1% de betume à mistura apresentou os melhores resultados. O betume atua como um aglutinante, aumentando a RCS do solo ao adicionar coesão. Teores mais altos de betume não seriam econômicos e podem transformar o betume para agir como um lubrificante entre os grãos do solo, reduzindo o atrito entre eles e, portanto, a RCS das amostras.

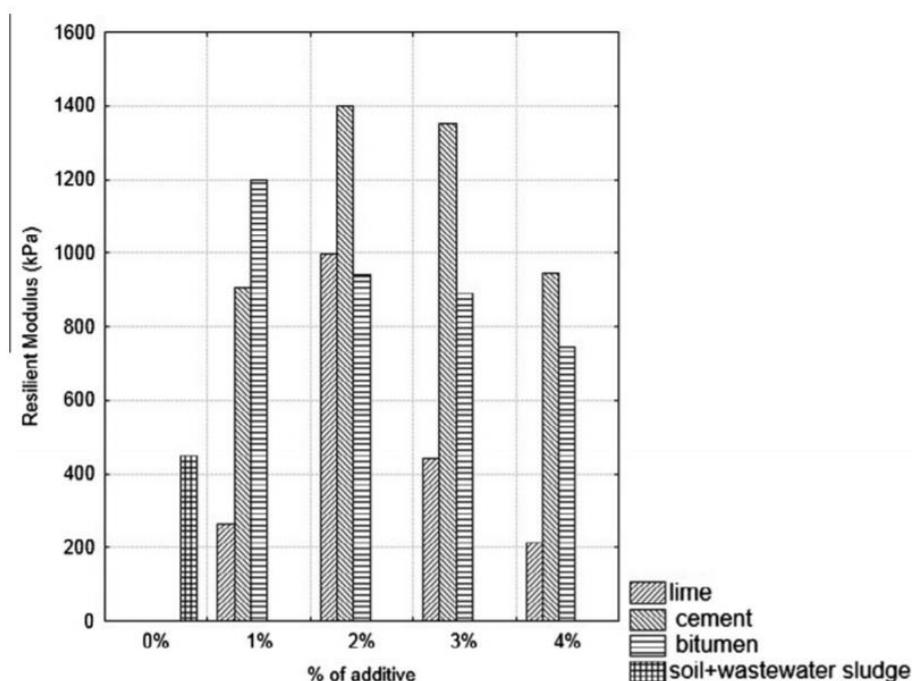
Tabela 4.5 -Tensão de Resistência a Tração Indireta segundo Lucena *et al.*(2014)

Aditivo (%)	Resistência a Tração Indireta (MPa)					
	Cal		Cimento		Emulsão asfáltica	
	Cura 7 dias	Cura 28 dias	Cura 7 dias	Cura 28 dias	Cura 7 dias	Cura 28 dias
1	0,115	0,500	0,096	0,063	0,179	0,118
2	0,102	0,074	0,105	0,106	0,147	0,105
3	0,130	0,049	0,126	0,125	0,158	0,104
4	0,185	0,080	0,126	0,153	0,110	0,080

Fonte: Lucena et al., (2014).

Segundo Lucena et al., (2014) as amostras testadas após 7 dias de cura úmida apresentaram resistência tão baixa, que não puderam ser registradas, e, portanto, apenas as amostras curadas são relatadas na Tabela 4.5. Os resultados mostram que a adição de cimento à mistura de solo com lodo de ETA apresentou o menor valor de Resistência a Tração Indireta (RTI). A adição de cal e betume apresentou valores semelhantes para a mistura. O conteúdo de 4% de cal fornece a RTI máximo para misturas com lodo de ETA.

Figura 6.5 -Testes de MR com o solo, aditivos de cal, cimento, emulsão asfáltica e misturas com o lodo de ETA segundo Lucena *et al.*(2014).

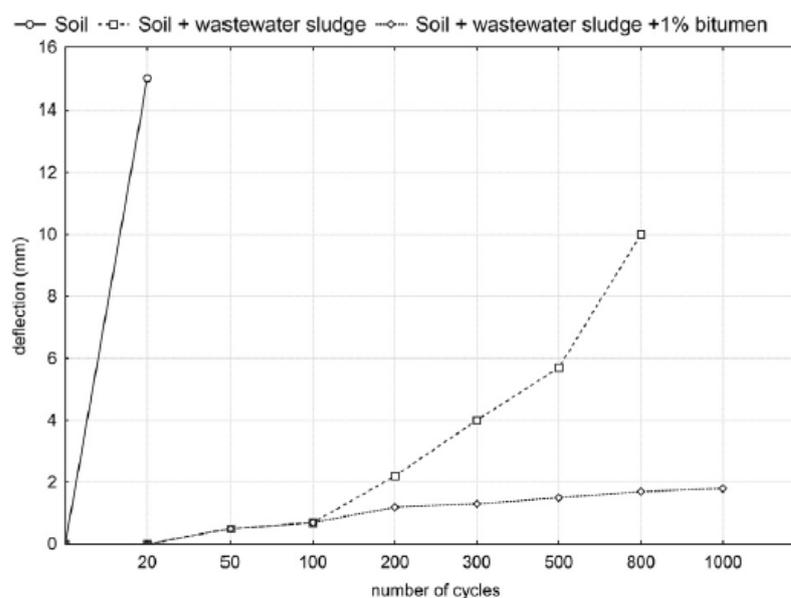


Fonte: Adaptado de Lucena et al., (2014).

De acordo com Lucena et al., (2014) o valor do módulo de resiliência de cada amostra neste trabalho foi considerado o obtido pela aplicação do último par de tensões do teste triaxial dinâmico, que representa o nível de tensão mais severo do teste: $\sigma_d = 0,412$ MPa e $\sigma_3 = 0,137$ MPa. Não foi possível

coletar os dados da amostra de solo puro por não resistir à etapa de condicionamento. Segundo Marangon (2004) *apud* Lucena et al., (2014) esses níveis de tensões correspondem aproximadamente às condições que os materiais são submetidos no topo da camada logo abaixo de um fino revestimento - topo da base - sob um eixo padrão. Na Figura 6.5 tem-se os valores do Módulo Resiliente para as misturas com lodo de ETA. Segundo Costa e Motta (2006) *apud* Lucena et al., (2014), para pares de tensões 0,137 MPa (σ_3) e 0,412 MPa (σ_d), valores médios de MR = 290 MPa são indicados para camadas de base de pavimento A partir dessas informações e após uma análise qualitativa dos gráficos verificou-se que as misturas estabilizadas apresentam um valor de MR consistente com os valores relatados pelos referidos autores. As amostras com adição de calcário apresentaram valores de MR superiores aos encontrados por Araújo (2009) *apud* Lucena et al., (2014) ao adicionar calcário ao solo cearense, e abaixo dos de Lowato (2004) *apud* Lucena et al., (2014) quando considerados tempos de cura mais elevados. Para amostras com cimento existe uma tendência do módulo de atingir um valor maior para a adição de 2% de cimento. A ordem de magnitude dos resultados apresentados com a adição de betume foi consistente com os achados de outros estudos para o mesmo par de tensões adotado neste estudo. Marangon (2004) *apud* Lucena et al., (2014) obteve, para 9 amostras compactadas no Proctor intermediário, valores entre 104 MPa e 446 MPa, com valor médio de 270 MPa. Os resultados de Thuler (2005) *apud* Lucena et al., (2014) reportaram um valor mínimo de 113 MPa e um valor máximo de 344 MPa com um resultado médio de 183 MPa, para o teste de compactação Proctor intermediário. Micielli (2006) *apud* Lucena et al., (2014), ao adicionar 4% de betume a um solo granular, obteve valores de 563 MPa a 677 MPa. Suarez (2008) e Soliz (2007) *apud* Lucena et al., (2014) obtiveram valores inferiores aos apresentados neste estudo.

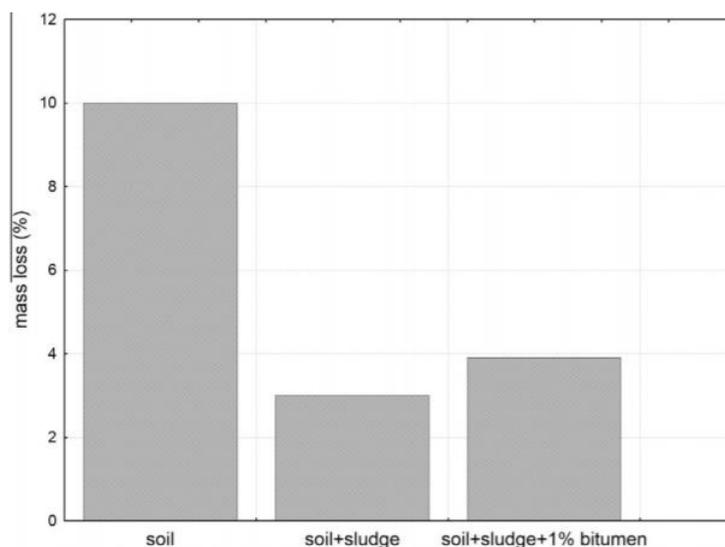
Figura 6.6 -Efeito dos aditivos no lodo de ETA com solo segundo Lucena *et al.*(2014).



Fonte: Lucena et al., (2014).

De acordo com Lucena et al., (2014) a Figura 6.6 demonstra que a mistura de solo com lodo de ETA apresentou deflexão de 10 mm e resistiu a 800 ciclos, não completando o teste, enquanto a mistura estabilizada teve uma deformação máxima de 1,8 mm em 1000 ciclos. A mistura estabilizada apresentou uma deformação de 5% da altura total, ou seja, em uma base de 15 cm de espessura, o sulco seria de aproximadamente 7,5 mm, valor aceitável para pavimentos (Micielli, 2006) *apud* Lucena et al., (2014). Gondim (2008) *apud* Lucena et al., (2014) testou solo estabilizado com betume e constatou que a mistura resistiu a apenas 50 ciclos quando o betume foi misturado de forma homogênea, enquanto resistiu a 100 ciclos quando o betume foi aplicado de tal forma que sua distribuição apresentou gradiente com profundidade decrescente, ou seja, a concentração no topo era maior do que no resto da camada. Comparando os dados obtidos neste estudo com a literatura reportada, verifica-se que a estabilização das misturas foi satisfatória. Apesar dos resultados positivos alcançados, não se pode afirmar que os resultados adaptados do lodo de ETA serão reproduzidos em campo. Segundo Micielli (2006) *apud* Lucena et al., (2014) a metodologia de previsão de deformação permanente por este teste é recente e novas investigações são necessárias para conclusões mais precisas. Os autores explicam que é necessário correlacionar o teste de deformação permanente com equipamentos triaxiais ou o uso de fatores de campo de laboratório.

Figura 6.7 - Perda por abrasão em via úmida segundo Lucena *et al.*(2014).



Fonte: Lucena et al., (2014).

A Figura 6.7 mostra a perda de massa para o solo puro, para a mistura de solo com lodo de ETA e para a mistura de solo com lodo de ETA e 1% de betume. A mistura com betume apresentou uma deformação um pouco maior quando comparada à mistura sem betume. Porém, foi compatível e aceitável quando se trata de esforços de abrasão, como é o caso do ensaio (LUCENA *et al.* 2014).

Segundo Lucena *et al.*(2014) o teor de metais pesados no lodo de ETA foi inferior aos valores padrão propostos para solos não poluídos pela NBR 10004 e pelo CFR (Code of Federal Register) das normas dos EUA. Também é importante notar que algumas concentrações (Mn e Al) foram superiores aos valores do MS (Ministério da Saúde do Brasil) e CETESB (Agência Estadual de Saneamento Ambiental) para concentração de metais pesados (Tabela 4.6 e 4.7). Portanto, o lodo puro pode ser classificado como resíduo perigoso. Os resultados das concentrações das misturas foram inferiores aos obtidos para o lodo puro. Embora a concentração de alumínio tenha sido superior ao máximo permitido, seu valor reduziu consideravelmente, confirmando a vantagem da estabilização / solidificação utilizada. As misturas estabilizadas podem ser classificadas como materiais inertes pela NBR 100004 (Tabela 4.6 e 4.7).

Tabela 4.6 - Valores máximos permitidos extraídos no teste de lixiviação segundo Lucena *et al.*(2014).

Identificação da Amostra	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Zn	Al
	mg/L										
Solo-lodo											
ETA-betume	0,10	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	-	0,20	<0,10	<0,10	<0,10

Lodo ETA	0,40	0,05	0,10	0,010	<0,10	0,28	5,0	0,41	<0,10	0,16	1,64
Limites padrão	1,000 ¹	0,500 ¹	5,000 ¹	1,00 ¹	2,0 ³	0,3 ³	-	0,1 ²	0,02 ³	5 ³	0,82 ²

Fonte: Lucena et al., (2014).

Tabela 4.7 - Valores máximos permitidos extraídos no teste de solubilização segundo Lucena *et al.*(2014).

Identificação da Amostra	As	Cd	Cr	Pb	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Al	Mg
	mg/L										
Solo-lodo ETA-betume	-	<0,01	<0,001	<0,01	<0,10	0,22	<0,10	0,03	0,10	0,23	-
Lodo ETA	-	0,06	0,1	0,11	0,10	0,82	3,37	0,10	0,16	1,00	2,40
Limites padrão	0,01 ¹	0,05 ¹	0,005 ¹	0,01 ¹	2,0 ³	0,3 ³	0,1 ²	0,02 ³	5,0 ³	0,2 ²	-

Fonte: Lucena et al., (2014).

¹ ABNT NBR 10005 (2004b) e ABNT NBR 10006 (2004c) e CFR (2003).

² Ministério da Saúde (MS) - Portaria Nº 518 de 2004 (MS, 2004)

³ Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) - Portaria Nº 195 de 2005 (CETESB,2005)

Em seu trabalho, Kelm (2014), visou o uso de lodo de ETE do Caju em Rio de Janeiro-RJ na estabilização de materiais para pavimentação em diferentes estados, in natura, seco e calcinado, misturado com um solo não laterítico silto-arenoso (NS') e pó de pedra, a escolha de dois tipos de solos, um de má qualidade (solo saprolítico) e um pó de pedra de uso corrente pela Prefeitura do Rio de Janeiro, deu se pelo julgamento do autor de ter-se dois tipos bem distintos em termos de condições, um material mais “universal” e outro mais “regional”. Para isso, realizou-se caracterizações química (Tabela 5.2), física (Tabela 5.1) e mecânica dos materiais (Tabela 5.3), nas seguintes configurações de mistura: 1) experimento piloto (Tabela 4.8) em porcentagens de 5%, 10% e 15% de lodo seco a 60°C durante cinco dias, temperatura esta escolhida segundo o autor visando facilitar o trabalho posterior e obter uma granulometria mais homogênea do material seco, posteriormente misturados com solo e pó de pedra; 2) experimento com estabilizantes (Tabela 4.9) cal e cimento misturados com solo, pó de pedra e lodo in natura (5% e 15%), seco a 60°C (5% e 15%) e calcinado a 550°C (5%); por fim, a caracterização ambiental do lodo.

Tabela 4.8 - Misturas para o experimento piloto segundo Kelm (2014).

Mistura	Solo (%)	Pó de Pedra (%)	Lodo ETE seco a 60°C (%)
S95L5	95	-	5
S90L5	90	-	10
S85L15	85	-	15
P95L5	-	95	5
P90L10	-	90	10

P85L15	-	85	15
--------	---	----	----

Fonte: Kelm (2014).

Tabela 4.9 - Misturas estudadas no experimento com estabilizantes segundo Kelm (2014).

Mistura	Solo (%)	Pó de Pedra (%)	Lodo ETE seco a 60°C (%)	Lodo ETE in natura (%)	Lodo ETE calcinado (%)	Cal (%)	Cimento (%)
S82L15C3	82	-	15	-	-	3	-
S80L15C5	80	-	15	-	-	5	-
S90L5C5	90	-	5	-	-	5	-
P83L15Ci2	-	83	15	-	-	-	2
P91L5Ci4	-	91	5	-	-	-	4
P91LN5Ci4	-	91	-	5	-	-	4
P81LN15Ci4	-	81	-	15	-	-	4
S80CL15C5	80	-	-	-	15	5	-
S95C5	95	-	-	-	-	5	-

Fonte: Kelm (2014).

Tabela 5.1 - Caracterização física dos materiais segundo Kelm (2014).

Caracterização física dos materiais.					
Características Físicas	Lodo ETE in natura	Lodo ETE seco a 60°C	Cinza de lodo ETE	Pó de pedra	Solo argiloso
Limite de Liquidez (%)	483	-	-	-	46
Limite de Plasticidade (%)	112	NP	NP	NP	21,7
Índice de Plasticidade (%)	371	-	-	-	24,3
Massa específica real dos grãos (g/cm ³)	-	1,66	2,74	2,54	2,65
Argila (%)	0	0	2	0	2
Silte (%)	0	65	30	0	40
Areia Fina (%)	0	10	20	12	58
Areia Média (%)	5	15	20	23	0
Areia Grossa (%)	9	10	8	20	0
Pedregulho (%)	86	0	0	45	0
Classificação textural	Pedregulho	Solo siltoso	Solo siltoso	Pedregulho	Solo argiloso

Fonte: Adaptado de Kelm (2014).

Tabela 5.2 - Caracterização química dos materiais segundo Kelm (2014).

Caracterização Química dos materiais.					
Características Químicas	Lodo ETE 1ª coleta	Lodo ETE 2ª coleta	Cinza de lodo ETE	Pó de pedra	Solo argiloso
Matéria Orgânica (%)	14,45	16,68	-	-	-
Compostos encontrados em maior quantidade por FRX* (%)	SiO ₂ (20,5%),	SiO ₂ (16,1%),	SiO ₂ (37,7%),	SiO ₂ (60,7%),	SiO ₂ (42,9%),
	Al ₂ O ₃ (9,9%) e	Al ₂ O ₃ (8,4%) e	Al ₂ O ₃ (19,4%) e	Al ₂ O ₃ (15,6%) e	Al ₂ O ₃ (35,3%)
	SO ₃ (7,3%)	SO ₃ (6,3%)	Fe ₂ O ₃ (9,6%)	Fe ₂ O ₃ (5,1%)	e Fe ₂ O ₃ (6,8%)
	Minerais encontrados em maior quantidade por DRX* (Intensidade)	Quartzo e caulinita	Quartzo e caulinita	Quartzo e caulinita	Quartzo, diquite, albite e muscovita

FRX* Espectrofotometria por fluorescência de raios-X, DRX* Difração de raios-X.

Fonte: Adaptado de Kelm (2014).

Segundo Kelm (2014), ambos os experimentos foram submetidos aos testes mecânicos de Compactação e Módulo de Resiliência (MR) e após a escolha das melhores misturas, no caso do experimento com aditivos, foram feitos além desses ensaios anteriores, também ensaios de Deformação permanente e expansão. Na Tabela 5.3, apresentam-se os resultados de módulo de resiliência, para as misturas com aditivos.

Tabela 5.3 - Resultados dos valores de módulo de resiliência das misturas e materiais estudados para o menor e maior nível de tensão confinante segundo Kelm (2014)..

Material/Mistura	Idade de cura (dias)	Módulo de Resiliência (Mpa)	
		$\sigma_3 = 0,021$ Mpa	$\sigma_3 = 0,137$ Mpa
S90L5C5	7	260	241
	28	234	459
S95C5	7	243	419
	28	330	875
P91L5Ci4	7	136	435
	14	141	513
	28	116	530
P91LN5Ci4	7	306	827
	17	275	932
	28	361	1392
S80CL15C5	7	305	440
	28	251	470

Fonte: Kelm (2014).

Kelm (2014) observou que a mistura com pó de pedra (91%), lodo natural (5%) e cimento (4%) (P91LN5Ci4) obteve os melhores resultados de módulo de resiliência, para as duas tensões confinantes verificadas. Ao analisar os resultados obtidos, o autor concluiu que as misturas com estabilizantes, cal ou cimento, para os dois materiais, solo e pó de pedra, e lodo de ETE nas condições utilizadas, apresentaram valores de módulos de resiliência satisfatórios para a utilização em camadas de sub-base e base de pavimentos.

Em seu estudo, Pereira (2012) propôs a estabilização química de um solo com cimento e a avaliação do uso de cinza de lodo de ETE de Natal/RN, como aditivo estabilizante, em base e sub-base de pavimentos rodoviários. Para isso, realizou-se ensaios de caracterização física (Tabela 5.4), química (Tabela 5.5) e mecânica (Figura 6.8) das misturas solo-cimento e solo-cimento-cinza de lodo (SCCLE), queimado durante 2h a 550°C, com teores de mistura de cimento na ordem de 0,3,6 e 9 %, de forma que para cada traço/energia de compactação moldaram-se 3 corpos de prova, num total de 36 amostras.

Tabela 5.4 -Caracterização física dos materiais segundo Pereira (2012).

Caracterização física dos materiais.			
Características Físicas	Cinza de lodo ETE (550°C)	Solo	Cimento CPII-Z-32
Massa específica real dos grãos (g/cm ³)	2,52	2,52	3,10
Limite de Liquidez (%)	NP	40,9	-
Limite de Plasticidade (%)	NP	30,40	-
Índice de Plasticidade (%)	NP	10,5	-
Argila (%)	-	22,00	-
Silte (%)	-	39,00	-
Areia Fina (%)	-	20,00	-
Areia Média (%)	-	10,00	-
Areia Grossa (%)	-	6,00	-
Pedregulho (%)	-	3,00	-
Classificação textural	-	Solo siltoso	-

Fonte: Adaptado de Pereira (2012).

Tabela 5.5 - Caracterização química dos materiais segundo Pereira (2012).

Caracterização Química dos materiais.			
Características Químicas	Cinza de lodo ETE	Solo	Cimento CPII-Z-32
Compostos encontrados em maior quantidade por FRX* (%)	SiO ₂ (30,74), Al ₂ O ₃ (14,51), Fe ₂ O ₃ (19,55),	SiO ₂ (36,26), Al ₂ O ₃ (32,31) e Fe ₂ O ₃ (27,86)	-

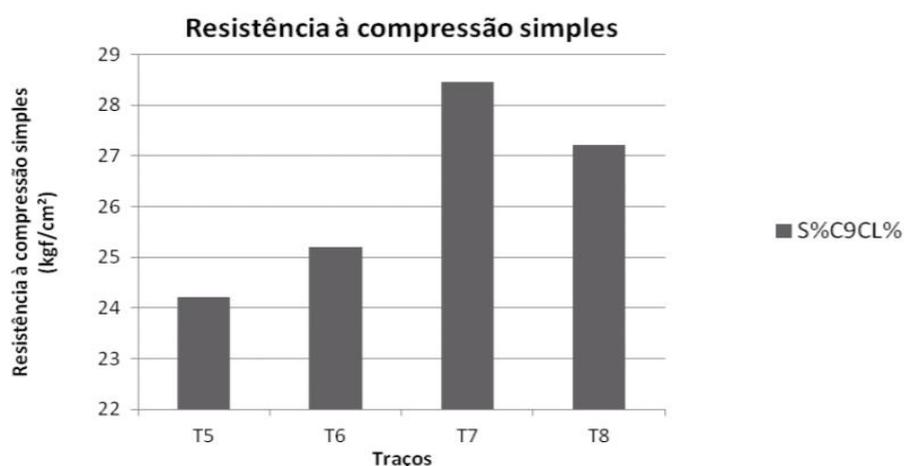
	SO ₃ (7,79), CaO (10,97) e P ₂ O ₅ (4,75)	
Minerais encontrados em maior quantidade por DRX* (Intensidade)	Quartzo, caulinita e ferro aluminato	Quartzo, caulinita e aluminatos

FRX* Espectrofotometria por fluorescência de raios-X, DRX* Difração de raios-X.
a - sem perda por queima, b- com perda por queima.

Fonte: Adaptado de Pereira (2012).

De acordo com Pereira (2012), a partir do ensaio de CBR, observou-se a necessidade da estabilização do solo, pois os seus valores estavam abaixo dos parâmetros especificados pelo DNER-ES-301/97. A mistura de lodo de ETE calcinado no solo foram nos percentuais de 5,10,20 e 30% em relação a massa do solo seco. Como resultado, observa-se na Figura 6.8 que o solo estabilizado com cinza de lodo de ETE conseguiu elevar a resistência a compressão simples (RCS) em todos os traços, sendo mais satisfatório o traço T7 (20% de cinza de lodo de esgoto e 9% de cimento), com um ganho de 25,87% de resistência comparado ao traço T4 de referência contendo apenas solo-cimento (9% de cimento). Com esses resultados, o autor concluiu que o solo não é expansivo, podendo ser usado em camadas de pavimentos após a estabilização com cimento, e a cinza do lodo de ETE pode ser usado como aditivo estabilizante, com o intuito de reduzir os custos com cimento e destinar adequadamente, do ponto de vista ambiental, esse resíduo sólido.

Figura 6.8 -Resistência a compressão simples solo-cimento-cinza de lodo de ETE .por traço. segundo Pereira (2012).



Fonte: Pereira (2012)

Trabalhos mais recentes, datados dos últimos 5 anos (2015-2020), propuseram a aplicação dos lodos de ETA e ETE não apenas em camadas de pavimentação, mas também, em revestimentos de

pavimentos flexíveis, como a mistura asfáltica a quente e nos pavimentos, como os blocos intertravados de concreto.

Martínez *et al.* (2020) estudou a viabilidade técnica da utilização de cinzas de lodo de ETA e ETE como material de enchimento adicional em mistura asfáltica a quente, a fim de encontrar uma disposição final segura para esses subprodutos e contribuir para a preservação e conservação do meio ambiente. Neste estudo, uma fase experimental limitada foi realizada, uma vez que apenas a resistência sob carga mecânica no ensaio de Marshall foi avaliada. Portanto, avaliou-se a resposta mecânica sob carregamento monotônico e cíclico, a resistência ao dano por umidade e propriedades de abrasão de uma mistura asfáltica a quente, quando 1% de lodo de ETA e ETE foram adicionados como filler em relação a massa total da mistura. Apenas o conteúdo adicional de 1% de enchimento alternativo foi aplicado a fim de avaliar se um pequeno conteúdo de lodo de ETA e ETE gerava mudanças significativas na mistura asfáltica a quente resultante.

O agregado graúdo utilizado para a produção da mistura asfáltica a quente vem de rochas de origem calcária (calcário - LS). A composição química do lodo de ETE, ETA e o solo é apresentada na Tabela 5.6 e foi obtida com base em testes de fluorescência de raios-X (FRX). Observou-se que o solo é composto principalmente por CaO (72,8%). Em comparação com a composição química típica apresentada de lodo de ETA e ETE, o solo apresenta diferenças importantes e inversas nas quantidades de CaO e SiO₂. Os lodos tem um maior teor de SiO₂, mas um menor teor de CaO em comparação com o solo.

Tabela 5.6 - Resultados de FRX para o lodo de ETE, ETA e solo segundo Martínez *et al.* (2020).

Material	Composição Química em massa %								
	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Outros Óxidos
solo	72,8	14,4	3,1	3,0	3,0	2,3	0,9	0,3	0,2
Lodo de ETA	4,4	52,8	8,1	14,4	---	---	0,2	---	20,1
Lodo de ETE	2,6	51,2	8,2	15,7					22,3

Fonte: Martínez *et al.*, (2020).

De acordo com Martínez *et al.* (2020) para determinar a temperatura ótima de calcinação do lodo de ETA e ETE foram avaliadas as características físicas (penetração - ASTM D-5 e ponto de amolecimento - ASTM D- 36-95) em um asfalto fabricado pela mistura de cimento asfáltico de petróleo CAP 50-70 com enchimento de ambos os materiais. Para tanto, foram confeccionadas 10 amostras de asfalto com lodo de ETA e ETE calcinadas nas temperaturas de 0, 200, 300, 500 e 800 °C. A temperatura de calcinação de 500 ° C do lodo de ETA e ETE gerou a maior rigidez no asfalto (menor penetração e maior ponto de amolecimento). Conseqüentemente, esta temperatura foi escolhida para produzir o filler

de ambos os lodos. As densidades obtidas foram 1,68 e 1,39 g / cm³ para lodo de ETA e ETE, respectivamente. Essas densidades são menores quando comparadas às obtidas para solo de 2,7 g / cm³.

Os resultados obtidos nos testes de Marshall nas misturas analisadas são apresentados nas Figura 6.9, 7.1, 7.2 e 7.3. Com base nos resultados obtidos, pode-se reportar de acordo com Martínez et al., (2020):

i) Para um determinado teor de asfalto, fica evidente que as misturas asfálticas com adição de 1% de lodo de ETA e ETE como filler apresentam menor volume de vazios (Va) em relação à mistura controle. Nesse sentido, a presença adicional de enchimento provoca uma maior densificação dos agregados e consequentemente menor porosidade (Va).

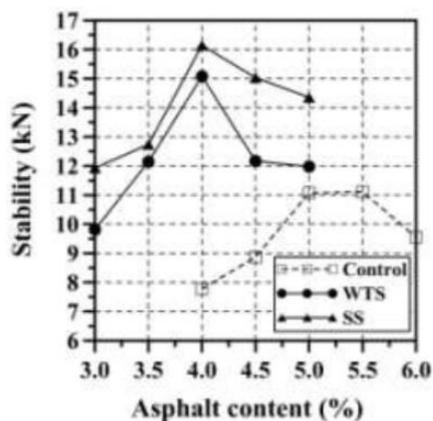
ii) A incorporação de 1% de lodo de ETA e ETE como filler reduz vazios no agregado mineral VAM, e nenhum deles cumpre o requisito mínimo especificado de 15 % conforme DNIT 031. O exposto acima é um indicador de que o agregado está recoberto por uma película asfáltica pouco espessa como produto de um maior número de partículas.

iii) A incorporação de 1% das cargas produz um aumento dos vazios do asfalto da mistura VFA em relação à amostra de controle e eles satisfazem a faixa especificada por T.F. Moo-Young & H.K. Zimimie (1996), 75-82% para camadas de rolamento, para as amostras fabricadas com 4,0-4,3% asfalto.

iv) A adição de 1% de filler na mistura asfáltica a quente gerou aumento na resistência sob carregamento monotônico no teste de Marshall e redução no percentual de cimento asfáltico. Nesse sentido, a presença dos materiais de lodo de ETA e ETE aumentaram os pontos de contato e aumentaram a coesão na massa asfáltica, provavelmente devido às maiores interações físico-químicas e interações superficiais. Além disso, esse aumento em estabilidade deve-se à diminuição de vazios com ar nas misturas que incorporaram lodo de ETA e ETE.

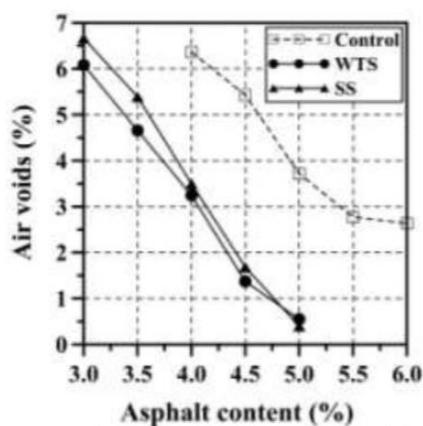
v) A porcentagem ótima de cimento asfáltico para a mistura controle foi de 5,1%, e para as misturas testadas com adição de 1% de lodo de ETA e ETE, o melhor desempenho no teste de Marshall foi obtido quando foram utilizados 4,0% e 4,1% de cimento asfáltico CAP, respectivamente. Com esses percentuais de asfalto, as amostras foram confeccionadas para as fases de testes seguintes.

Figura 6.9 -Evolução da estabilidade com o percentual de asfalto segundo Martínez *et al.*



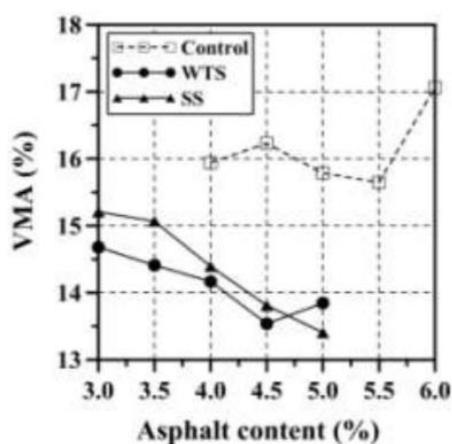
Fonte: Martínez et al., (2020).

Figura 7.1 - Evolução dos vazios de ar com o percentual de asfalto segundo Martínez *et al.* (2020)..



Fonte: Martínez et al., (2020).

Figura 7.2 - Evolução dos vazios do asfalto com o percentual de asfalto segundo Martínez *et al.* (2020)..



Fonte: Martínez et al., (2020).

Na Tabela 5.7 tem-se a resistência à tração indireta por compressão diametral da mistura de asfalto de controle e as misturas que incorporaram 1% de lodo de ETA e lodo de ETE como enchimento segundo Martínez *et al.* (2020). Observa-se na tabela que os valores de resistência a tração de todas as misturas atendem ao valor mínimo de 0,65 MPa especificado pelo DNIT 031. Além disso, foi observado aumento da resistência à tração indireta nas amostras que incorporaram 1% de lodo de ETA e ETE como carga. Os valores de resistência a tração aumentaram apesar da redução da porcentagem ótima de asfalto e provavelmente devido à redução do volume de vazios (V_v). O aumento da resistência à tração indireta nas misturas com os lodos indica maior adesão entre as partículas, o que pode estar relacionado ao aumento da rigidez do asfalto e às possíveis interações físico-químicas entre as partículas finas de lodo e o AC 50-70.

Tabela 5.7 -Resultados de resistência a tração indireta segundo Martínez *et al.* (2020)..

Tipo de mistura	Asfalto Ótimo [%]	Volume de vazios [%]	RTI [Mpa]	Coefficiente de variação [%]
Controle	5,1	3,72	0,98	6,3
Lodo de ETA	4,0	3,27	1,24	4,5
Lodo de ETE	4,1	3,58	1,07	5,7

Fonte: Adaptado de Martínez *et al.*, (2020).

Observa-se que a adição de 1% de lodo de ETA e ETE como filler na mistura produz uma redução significativa em sua resistência aos danos por umidade, expressa pela redução do parâmetro de resistência ao dano por umidade (TSR). Segundo Martínez *et al.*, (2020) os valores de TSR obtidos nas misturas asfálticas em estudo com materiais alternativos não atendem ao requisito mínimo de 80%. A redução da resistência ao dano por umidade pode estar associada à redução do cimento asfáltico, o que estaria gerando uma espessura de revestimento muito fina de agregados com asfalto (com base nos resultados reportados dos vazios do agregado mineral, VMA, no teste de Marshall). Além disso, as partículas finas de lodo de ETA e ETE tendem a ter altos teores de quartzo (SiO_2) e este mineral dificulta a aderência com o asfalto. A Tabela 5.8 apresentam os resultados do teste TSR.

Tabela 5.8 -Resultados de resistência ao dano por umidade (TSR) segundo Martínez *et al.* (2020)..

Tipo de mistura	Asfalto ótimo [%]	RTI Incondicionada [Mpa]	Vazios de ar [%]	RTI Condicionada [Mpa]	Vazios de ar [%]	TSR [%]	Coefficiente de variação [%]
Controle	5.1	7.95	6.3	7.59	6.3	96	4.7
Lodo de ETA	4.0	7.54	6.7	5.37	6.7	71	3.8
Lodo de ETE	4.1	6.02	6.9	4.47	6.9	74	1.9

Fonte: Adaptado de Martínez et al., (2020).

Na Tabela 5.9 pode-se notar a magnitude do módulo de resiliência da mistura de asfalto de controle e as misturas que incorporaram 1% de lodo de ETA e ETE como enchimento. Um aumento na rigidez sob carga cíclica das misturas é observado usando ambos os lodos como carga em relação à mistura de controle. A massa asfáltica que apresentou maior módulo foi aquela com 1% de lodo de ETA como filler. Os aumentos do módulo de resiliência são consistentes com o aumento da coesão e resistência sob carga monotônica observada no teste de Marshall. De acordo com Martínez et al., (2020) isto pode ser atribuído principalmente à redução de volume de vazios (Va). Da mesma forma, o aumento da coesão das misturas com os lodos pode estar associado a um aumento dos contatos em decorrência da incorporação das cinzas dos lodos, dado que as partículas mencionadas acima tendem a apresentar altos teores de SiO₂, que é um material associado a alta dureza, resistência mecânica e intertravamento no esqueleto mineral. (R. MUNIANDY, E.E. ABURKABA, 2013).

Tabela 5.9 -Resultados de módulo de resiliência (MR) segundo Martínez *et al.* (2020)..

Tipo de mistura	Asfalto ótimo [%]	Volume de vazios [%]	MR [Mpa]	Coefficiente de variação [%]
Controle	5,1	3,72	3569	3.5
Lodo de ETA	4,0	3,19	5679	2.8
Lodo de ETE	4,1	3,57	4444	3.4

Fonte: Adaptado de Martínez et al., (2020).

Na Tabela 6.1 tem-se os resultados do teste de deterioração. Pode-se notar uma redução na resistência ao desgaste das misturas que adicionaram 1% de lodo de ETA e ETE. De acordo com Martínez et al., (2020) assim como no teste de resistência ao dano por umidade TSR, a maior perda de massa relatada durante o teste de deterioração pode ser atribuída ao maior número de contatos de partículas e à incorporação de quartzo (SiO₂) na mistura (produto da incorporação de 1% de lodo de ETA e ETE) pois eles exigem uma quantidade maior de asfalto para aderir.

Tabela 6.1 - Resultados de testes de deterioração segundo Martínez *et al.* (2020)..

Tipo de mistura	Asfalto ótimo [%]	Volume de vazios [%]	Cantabro Test	
			Perda por abrasão [%]	Coefficiente de variação [%]
Controle	5,1	3,72	4,5	3,5
Lodo de ETA	4,0	3,21	6,6	2,8
Lodo de ETE	4,1	3,61	11,5	3,7

Fonte: Adaptado de Martínez *et al.*, (2020).

De acordo com Martínez *et al.*, (2020) quatro análises foram realizadas: (I) comparação de todos os materiais (controle mistura de asfalto a quente e adição de 1% de lodo de ETA e ETE); (II) comparação de misturas de asfalto a quente com incorporação de 1% de lodo de ETA e ETE; (III) Comparação de mistura de asfalto a quente de controle e incorporação de 1% de lodo de ETA e (IV) Comparação de mistura de asfalto a quente de controle e incorporação de 1% de lodo de ETE. De acordo com os resultados obtidos, a análise ANOVA com nível de confiança de 95% mostra que o lodo de ETA e ETE têm um efeito significativo em todas as propriedades mecânicas avaliadas ($F_o > F_{0,05}$).

Segundo Martínez *et al.*, (2020) as variações obtidas podem estar associadas a fenômenos físico-químicos, em decorrência das interações entre as cargas e o asfalto. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que: utilizando menor teor de asfalto em relação à mistura controle, a incorporação das partículas de lodo de ETA e ETE aumentou a resistência sob carregamento monotônico (estabilidade) e a rigidez sob cargas cíclicas (módulo resiliente) das misturas de asfalto a quente. Os resultados acima podem ser um indicador de aumento da resistência a deformações permanentes em clima de altas temperaturas. Os ganhos de estabilidade e módulo de resiliência estão associados à redução de vazios com ar, à incorporação de um maior número de partículas que aumentaram o número de contatos e a coesão da mistura, e à inclusão de partículas de quartzo que é um material de alta dureza. Como resultado da redução de vazios com ar, a incorporação de partículas de lodo de ETA e ETE aumentou a resistência à tração indireta sob condição seca (não condicionada). Porém, a diminuição do teor de asfalto, associada a uma fina espessura de revestimento dos agregados (com base nos resultados reportados de VMA) e incorporação de partículas de quartzo (SiO_2), dificultam a adesão ao asfalto, gerando uma diminuição nas resistências à umidade e danos a abrasão.

A incorporação de lodo de ETA e ETE nas misturas asfálticas representa uma alternativa para a redução dos problemas ambientais relacionados à disposição final desses resíduos sólidos. No entanto, estudos adicionais devem ser realizados para analisar o efeito da substituição do filler tradicional de misturas asfálticas para ambos os resíduos parcialmente ou em sua totalidade. Da mesma forma, sugere-se a realização de um programa experimental onde sejam analisadas as demais propriedades mecânicas, como trincas, fissuração a baixas temperaturas, resistência ao envelhecimento e resistência à fadiga. (MARTÍNEZ ET AL., 2020).

Ali Dawood et al., (2019), propôs em seu estudo o uso do lodo de ETA em revestimento asfáltico misturado a quente. Uma investigação experimental foi realizada para avaliar a possível utilização de lodo de ETA como substituto de filler em misturas de asfalto para aplicações de construção de pavimentos. Cinco misturas asfálticas contendo vários teores de lodo de ETA, 0% (mistura de referência), 30%, 50%, 70% e 100%, em substituição ao filler foram preparadas neste estudo.

Realizou-se ensaios de caracterização física (agregado graúdo, miúdo, filler e do ligante asfáltico), apresentados na Tabela 6.2, e química, apresentados na Tabela 6.3, (filler e lodo de ETA) dos materiais utilizados no estudo.

Tabela 6.2 - Caracterização física dos materiais segundo Ali Dawood *et al.* (2019).

Caracterização física dos materiais.				
Características Físicas	Agregado graúdo	Agregado Miúdo	Filler	Ligante asfáltico
Penetração	-	-	-	49
Ponto de fulgor	-	-	-	237
Ductibilidade	-	-	-	102
Peso específico (g/cm ³)	2,64	2,637	2,70	-
Ponto de amolecimento	-	-	-	47,5
Perda por abrasão (%)	-	24,1	-	-
Partículas planas e alongadas (%)	-	17,1	-	-

Fonte: Adaptado de Ali Dawood et al., (2019).

Tabela 6.3 -Caracterização Química dos materiais segundo Ali Dawood *et al.* (2019).

Caracterização Química dos materiais.		
Características Químicas	Filler	Lodo de ETA
Compostos encontrados em maior quantidade por FRX* (%)	CaO (62,74), SiO ₂ (22,68), Al ₂ O ₃ (5,06), Fe ₂ O ₃ (3,24), SO ₃ (2,2), MgO (2,36).	CaO (0,42), SiO ₂ (41,38), Al ₂ O ₃ (33,03), Fe ₂ O ₃ (3,84), SO ₃ (0,27), MgO (0,31), SO ₃ (0,27), K ₂ O (1,53), Na ₂ O (0,14).

FRX* Espectrofotometria por fluorescência de raios-X

Fonte: Adaptado de Ali Dawood et al., (2019).

Segundo Ali Dawood *et al.* (2019), o lodo de ETA foi coletado na estação de tratamento de água da cidade de Al Hilla, Iraque, e em seguida, seco em estufa a 105 °C por 24 h. Após a secagem o lodo foi triturado e peneirado na mesma graduação dos requisitos para agregado fino (filler). O Método de Marshall foi utilizado para determinar a relação asfalto-agregado. Para os resultados, revelam que a relação asfalto-agregado ótima foi de 4,8%.

Os resultados de todos os testes de estabilidade de Marshall estão resumidos na Tabela 6.4. Todos os resultados mostrados para cada amostra são o valor médio de três testes. De acordo com Ali

Dawood et al., (2019) constatou-se que existe a possibilidade de substituição (30-50) % do agregado fino (filler) por lodo de ETA em misturas de concreto asfáltico a quente.

Tabela 6.4 - Resultados dos testes de Estabilidade Marshall para diferentes misturas de lodo de ETA.

Agregado fino		Estabilidade (KN)	Fluência (mm)	Vazios de ar (%)	Densidade (g/cm ³)
Areia (%)	Lodo ETA (%)				
100	0	8	4.1	4	2.16
70	30	8.1	2.6	3.8	2.10
50	50	8	2.7	4.2	2.13
30	70	7.5	2.3	4.5	2.08
0	100	7	2.3	4.5	2.0

Fonte: Adaptado de Ali Dawood et al., (2019).

De acordo com Ali Dawood *et al.* (2019) os efeitos da substituição do agregado fino por lodo de ETA em misturas de asfalto são apresentados na Tabela 6.5, por meio dos ensaios de resistência a tração indireta. Os resultados revelaram que a resistência aumentou com o acréscimo do lodo de ETA para todas as misturas até 50%. Além desse nível de substituição, a resistência à tração mostrou um declínio.

Tabela 6 5 - Resultados dos testes de resistência a tração indireta para diferentes misturas de lodo de ETA segundo Ali Dawood *et al.* (2019).

Mistura	Carregamento máximo (KN)	Resistência a tração indireta (KN)
Lodo de ETA (0%)	24,9	2,480
Lodo de ETA (30%)	26,9	2,707
Lodo de ETA (50%)	28,92	2,865
Lodo de ETA (70%)	23,88	2,377
Lodo de ETA (100%)	23,6	2,349

Fonte: Adaptado de Ali Dawood et al., (2019).

Sendo assim, Ali Dawood et al., (2019) concluiu que as misturas de lodo de ETA e agregados convencionais de fontes naturais satisfizeram todas as propriedades necessárias para misturas de asfalto e produziram propriedades de projeto de mistura esperadas de acordo com os requisitos de especificação padrão em (30-50)% substituindo o agregado. Para os resultados do teste resistência a tração indireta, indicou que a substituição lodo de ETA por peso de agregado fino melhorou as misturas de asfalto em até 50%, mas eles diminuíram com um aumento adicional no conteúdo de lodo devido ao efeito do material residual na densidade da mistura.

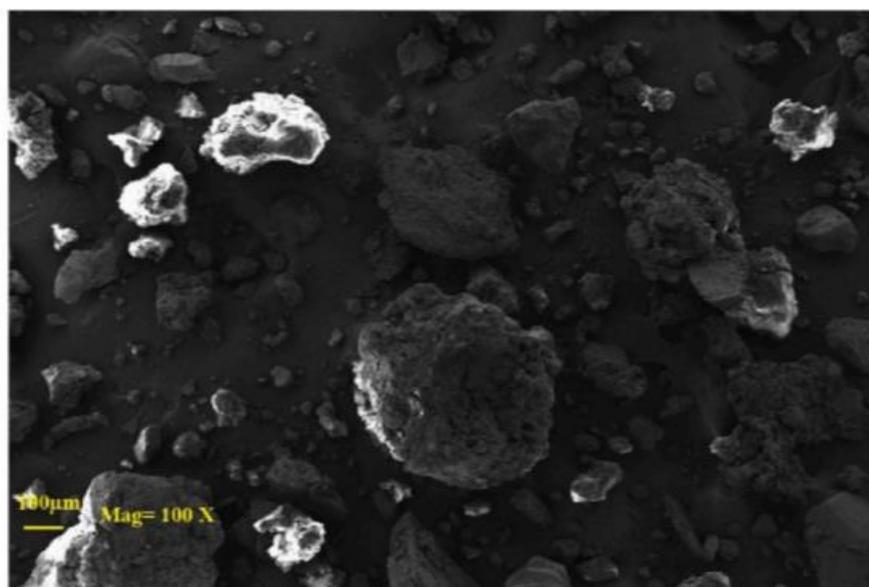
Liu et al., (2020), propôs o uso de lodo de ETA na substituição de agregado miúdo em blocos de concreto para pavimentação (BCP). O BCP pode ser fabricado a seco pelo método de mistura com aproximadamente zero abatimento de cone do concreto pelo *slump teste*, propriedades mecânicas e de durabilidade do BCP com substituição variável de proporções de areia por lodo de ETA seco em forno foram avaliadas extensivamente. Os seguintes testes foram conduzidos e discutidos, como análises microestruturais químicas, resistência à compressão, resistência à abrasão, absorção de água, ataque de sulfato e procedimento de lixiviação de característica tóxica (TCLP).

Os agregados usados neste estudo foram brita, areia e lodo de ETA. O tamanho da areia, fornecido pela Sibelco Australia, variou de 8,68 μm a 1,18 mm com densidade de 2,61 g/cm^3 e absorção de água de 0,50%. A brita, proveniente da Pedreira Kulpara, teve variação de 2,06 mm a 9,00 mm, com densidade de 2,72 g/cm^3 e absorção de água de 1,17%. O peso específico e a absorção de água do lodo de ETA foram 2,27 g/cm^3 e 28,82%, respectivamente, com base na AS 1141,5 (2000). Os teores de umidade e matéria orgânica da amostra de lodo de ETA foram 25% e 29,50% respectivamente, que foram determinados pelo teste de perda por ignição (LOI). Os componentes químicos do lodo de ETA foram identificados por análise de Fluorescência de Raios-X (FRX) (ver Tabela 6.6). Os resultados mostraram que Al_2O_3 e matéria orgânica constituíram a maior parte do lodo de ETA, seguidos por SiO_2 , Fe_2O_3 e CaO . Outros óxidos como K_2O , MgO , CuO , TiO_2 e Na_2O também foram observados. Com referência à microscopia eletrônica de varredura (MEV) na Figura 7.3, a morfologia das partículas de lodo de ETA foi considerada irregular com tamanhos de partícula e estrutura porosa. A difração de raios-X (DRX) revelou que cinco cristalizações principais foram encontradas no lodo de ETA, incluindo quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$), gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (Figura 7.4). O resultado do procedimento de lixiviação de característica tóxica (TCLP) do lodo de ETA bruto indicou que a lixiviação do Cu (1,8 mg L⁻¹) excedeu a limitação da USEPA (1992) (1,3 mg L⁻¹). Assim, a lixiviação da BCP incorporando lodo de ETA precisa ser investigada. Antes da mistura, o lodo de ETA foi peneirado com a peneira nº 12 (1,68 mm) e a distribuição de tamanho de partícula de areia, pedra britada e lodo foi mostrada na Figura 7.5, o que indicou que nenhuma diferença perceptível no tamanho de partícula entre areia e lodo de ETA pode ser detectado, e que a areia era ligeiramente mais grossa do que o lodo de ETA.

Tabela 6.6 -Caracterização química do lodo de ETA segundo Liu *et al.* (2020).

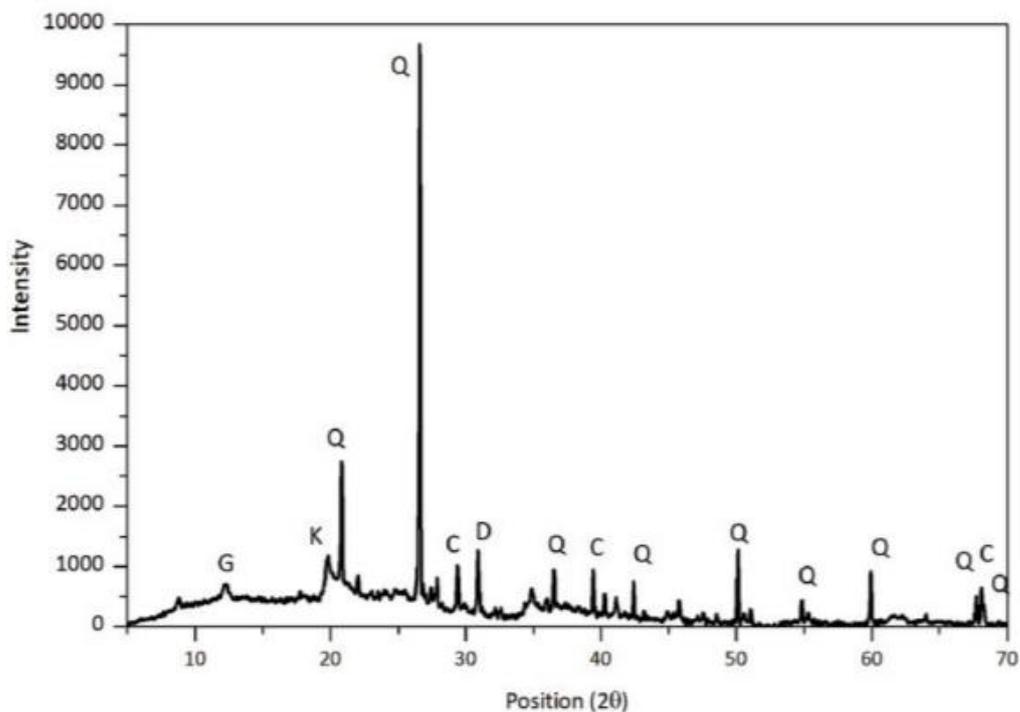
Caracterização química do lodo de ETA	
Compostos	Porcentagem em peso (%)
Al ₂ O ₃	28,27
SiO ₂	26,43
Fe ₂ O ₃	6,66
CaO	5,36
K ₂ O	1,23
MgO	1,11
CuO	0,71
SO ₃	0,48
LOI	29,5

Fonte: Liu et al., (2020).

Figura 7.3 - MEV do lodo de ETA segundo Liu *et al.* (2020).

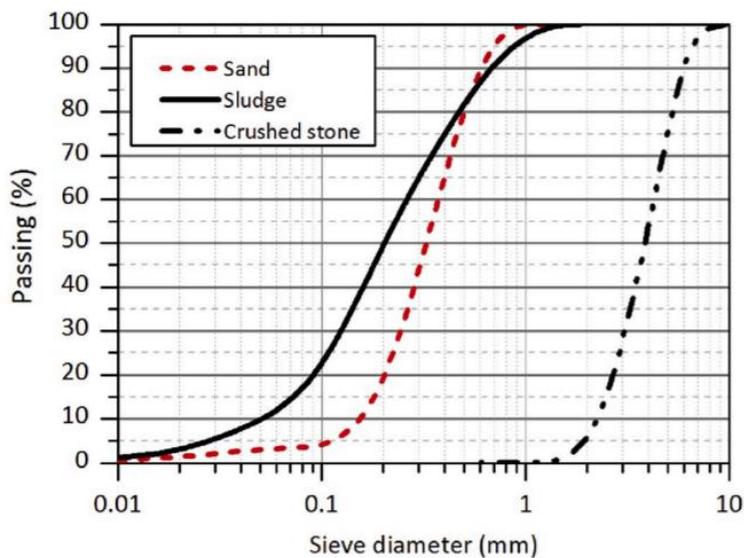
Fonte: Liu et al., (2020).

Figura 7.4 -DRX do lodo de ETA segundo Liu *et al.* (2020).



Fonte: Liu et al., (2020).

Figura 7.5 -Distribuição granulométrica das partículas de areia, lodo de ETA e brita segundo Liu *et al.* (2020).



Fonte: Liu et al., (2020).

Os BCP foram produzidos pelo método de mistura a seco com o tamanho de 115 x 115 x 50 mm e os agregados (brita, areia e lodo de ETA) foram secos em forno a 105 ± 3 °C por 24 h antes da

mistura. Na Tabela 6.7 tem-se as porcentagens de lodo utilizadas nas misturas para confecção dos blocos de concreto.

Tabela 6.7 - Traços das misturas do BCP com variação de conteúdo de lodo de ETA (Kg/cm³) segundo Liu *et al.* (2020).

Mistura	Cimento	Areia	Agregado graúdo	Lodo de ETA
BCP - 0	299	851	1134	0
BCP - 5	299	811	1134	42
BCP - 10	299	767	1134	85
BCP - 15	299	723	1134	129
BCP - 20	299	682	1134	169

Fonte: Adaptado de Liu *et al.*, (2020).

Na Tabela 6.8 tem-se a resistência à compressão de cinco misturas aos 28 dias de cura. As resistências à compressão com 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de conteúdo de lodo de ETA foram 48,69 MPa, 52,20 MPa, 43,25 MPa, 9,92 MPa e 4,13 MPa, respectivamente. A resistência à compressão de BCP-5 foi comparável com a mistura de controle (BCP-0). No entanto, em comparação com BCP-0, as resistências à compressão de BCP-10, BCP-15 e BCP-20 foram menores, ou seja, 11,2%, 79,6% e 91,5%, respectivamente. O requisito de resistência a compressão simples do BCP na Austrália era de 43 MPa (GHAFOORI E SMITH, 1992 *apud* LIU ET AL., 2020). Segundo Liu *et al.*, (2020) os resultados obtidos indicaram que a taxa de substituição máxima de areia por lodo de ETA no BCP foi de 10%. O efeito adverso da incorporação de lodo de ETA na resistência à compressão pode ser atribuído à perda de coesão entre lodo e matriz de cimento conforme observado na Tabela 6.8 e dificultando a hidratação do cimento. O lodo foi caracterizado com alta taxa de absorção de água e alto teor de matéria orgânica. O aumento do conteúdo de lodo no BCP pode resultar em falta de água para a hidratação do cimento, uma vez que uma maior quantidade de água livre foi absorvida pelo lodo seco no forno. Além disso, a matéria orgânica contida no lodo (29,5%) dificultou a formação de produtos de hidratação (WANG ET AL., 2018). Assim, a deterioração do BCP foi ficando mais severa com o aumento dos níveis de reposição do lodo. Eventualmente, o desenvolvimento de força do BCP com 20% de conteúdo de lodo não tratado era quase invisível.

Devido à desintegração completa de BCP-15 e BCP-20 em 15 min do início do experimento, os resultados do teste a abrasão incluíram apenas BCP-0, BCP-5 e BCP-10. O efeito da adição de lodo na resistência à abrasão do BCP é mostrado na Tabela 6.8. O índice de abrasão médio para BCP-0, BCP-5 e BCP-10 foram 11,91, 12,23, 12,42, respectivamente. Os resultados confirmaram que a adição de lodo até 10% não teve efeito significativo na resistência do BCP à abrasão, o que pode estar

relacionado à resistência relativamente boa de BCP-0, BCP-5 e BCP-10 e boa compatibilidade de lodo no BCP abaixo do nível de reposição de 10% (LIU ET AL., 2020).

Absorção de água dos cinco conteúdos de lodo de ETA em 28 dias é mostrada na Tabela 6.8. Pode-se observar que a absorção de água do BCP com 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de substituição de lodo foi de 4,2 %, 3,8%, 5,1%, 7,3% e 7,7%, respectivamente. O BCP-0, BCP-5 e BCP-10 demonstraram absorção de água relativamente baixa. O BCP com 15% e 20% de substituições de lodo de ETA não atendeu aos critérios de absorção de água (menos de 6%) (JANKOVIC ET AL., 2012 *apud* LIU ET AL., 2020). Geralmente, a absorção de água do BCP aumentou com a adição de lodo. Isso pode ser explicado pela estrutura porosa do BCP incorporando lodo que resultou em maior absorção de água. No entanto, o BCP com 5% de conteúdo de lodo demonstrou uma estrutura mais densa, o que resultou em menor capacidade de absorção de água. (LIU et al., 2020).

Tabela 6.8 -Resistência e propriedades de durabilidade do BCP com variações de lodo de ETA segundo Liu *et al.* (2020).

Mistura	Resistência a compressão (Mpa)	Propriedades de abrasão			Absorção de água
		Perda de massa (%)	Índice de abrasão	Notas	
BCP - 0	48,69 ($\pm 2,3$)	1,9 ($\pm 0,1$)	11,91 ($\pm 0,32$)		4,2 ($\pm 0,35$)
BCP - 5	52,20 ($\pm 1,9$)	1,6 ($\pm 0,2$)	12,23 ($\pm 0,52$)		3,8 ($\pm 0,15$)
BCP - 10	43,25 ($\pm 2,2$)	2,1 ($\pm 0,2$)	12,42 ($\pm 0,56$)		5,1 ($\pm 0,25$)
BCP - 15	9,92 ($\pm 1,4$)	-	-	Falha na mistura	7,3 ($\pm 0,20$)
BCP - 20	4,13 ($\pm 0,8$)	-	-	Falha na mistura	7,7 ($\pm 0,15$)

Fonte: Adaptado de Liu et al., (2020).

De acordo com Liu et al., (2020) os resultados experimentais provaram que o lodo de ETA pode ser usado para substituir agregados finos e o conteúdo máximo do lodo de ETA no BCP pode ser de até 10% dependendo dos critérios de pavimentação.

Taki et al., (2019), propôs avaliar as possíveis melhorias da aplicação de lodo de ETE nas propriedades geotécnicas (dilatação, plasticidade e resistência ao cisalhamento) com aditivo de cal no solo. Para isto, o lodo de ETE coletado na estação de Jaspur em Gandhinagar na Índia, foi seco ao ar por 2 meses num leito de secagem e misturado com óxido de cálcio (CaO com grau de pureza maior que 90% e perda por ignição de 800°C) nas porcentagens de 0,2,4,6 e 8% por peso de lodo. As misturas foram curadas em 7,14 e 28 dias. A Tabela 6.9 apresentam as caracterizações física e mecânicas do lodo de ETE.

Após a cura, os testes de compressão foram realizados, água foi adicionada até 32% por peso da mistura durante a preparação da amostra, para compensar a reação de hidratação da cal, os resultados estão apresentados na Tabela 7.1. Os parâmetros de compactação, teor de umidade ótimo (OMC) e densidade seca máxima (MDD) do lodo de ETE foram obtidos realizando o teste de compactação Proctor padrão (IS: 2720 (Parte VII) -1980 (Revisado em 2011)). A resistência à compressão não confinada (UCS) foi calculada como a carga compressiva por unidade de área necessária para a falha da amostra (IS: 2720 (Parte X) -1991 (Revisado, 2006)).

Tabela 6.9 -Caracterização física e mecânica do lodo de ETE segundo Taki *et al.* (2019).

Parâmetros geotécnicos	Presente estudo
Limite de liquidez LL (%)	52
Limite de plasticidade LP (%)	24
Índice de plasticidade IP (%)	28
Índice diferencial de pressão de expansão IDEL (%)	47
Areia (%)	-
Silte (%)	68
Argila (%)	27
Classificação	CH (Alta compressibilidade)
Matéria Orgânica (%)	5
Mistura ótima (%)	20
Massa específica aparente máxima (g/cm ³)	1,55
Peso específico (N/cm ³)	2,66
Pressão de expansão (kPa)	57
Resistência a compressão (kPa)	207

Fonte: Adaptado de Taki *et al.*, (2019).

Tabela 7.1 -Variação da resistência a compressão e coesão com adição de cal no período de cura segundo Taki *et al.* (2019).

Cal (%)	Resistencia a compressão (kPa)			Coesão não drenada (kPa)		
	7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias
0	207	207	207	104	104	104
2	456	643	952	228	322	476
4	538	871	957	269	436	479
6	665	881	1102	333	441	551

8	533	795	933	267	398	467
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Fonte: Adaptado de Taki et al., (2019).

De acordo com Taki et al., (2019), quando a cal foi adicionada em pequenas quantidades, o aumento da resistência foi praticamente insignificante, mesmo quando a amostra foi curada por um longo período de tempo. Enquanto a quantidade de cal aumentou até uma certa taxa, a reação pozolânica produziu os compostos cimentícios, o que aumentou a força do lodo de ETE. A adição de 6% de cal foi ótima no presente estudo. Após 28 dias, a força aumentou para 1102 kPa, enquanto a resistência do lodo de ETE não tratado era de 207 kPa. No entanto, aumentando o conteúdo da cal além do valor ideal reduziu a força. Tal redução de resistência foi ocasionada pela ação lubrificante da cal (Bell, 1996).

Para Taki et al., (2019) o tratamento com cal melhorou a resistência ao cisalhamento, reduziu a expansão e diminuiu a plasticidade do lodo de ETE. O aumento da trabalhabilidade indicou uma redução do comportamento expansivo do lodo de ETE modificado com cal. O teor ideal de cal foi de 6% para todos os períodos de cura testados em caso de resistência a compressão. A melhoria na resistência a compressão foi atribuída à formação de compostos cimentícios resultantes de reações pozolânicas entre partículas de cal e argila. A redução na pressão de expansão pode ser atribuída à modificação da dupla camada difusa e formação de matriz cimentante com tratamento com cal. As análises confirmaram a formação dos novos compostos após o tratamento com a cal.

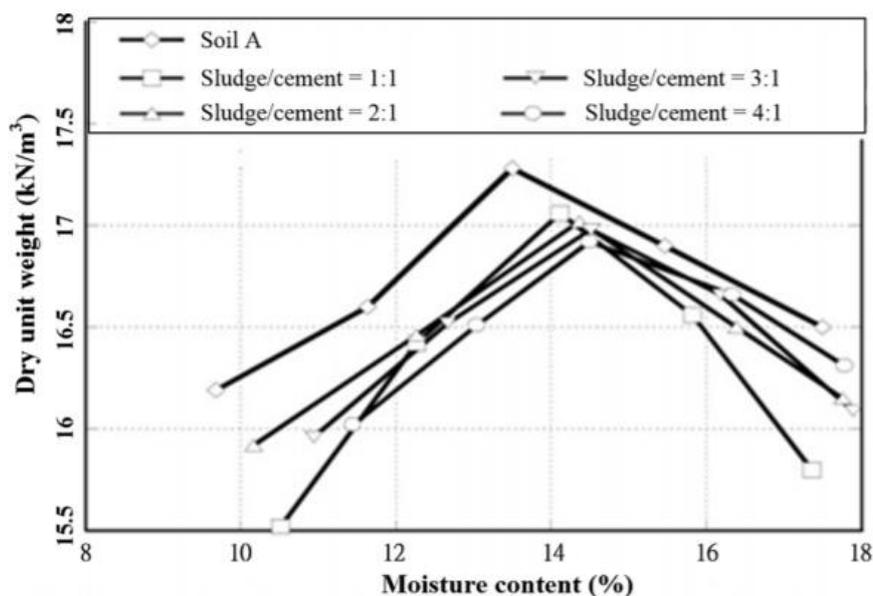
Em seu estudo, Lin et al., (2016) teve como objetivo investigar os efeitos de uma mistura de lodo de ETE (LETE) mais cimento e nano-SiO₂ como aditivo estabilizante, nas propriedades mecânicas do solo de subleito.

Para isto, foram testadas quatro diferentes razões de LETE/cimento (1:1, 2:1, 3:1 e 4:1) e aditivo estabilizador de nano-SiO₂ para melhorar a resistência do solo coeso do subleito na faixa de 2%, de acordo com os estudos de Lin et al., (2010). O solo não tratado foi classificado como solo A-4 com argila de baixa plasticidade pela *American Association of State Highway Transportation Officials* (AASHTO). O lodo de ETE drenado foi coletado da estação de tratamento de esgoto e queimado a 900-1000 °C para tornar cinzas, então o mesmo foi moído até ser tornar um pó, com uma granulometria de 0,0137 mm. Lin et al. (2005) usaram LETE / cimento para substituir o solo nas seguintes proporções: 0, 2, 4, 8, 16 e 22% (proporções em peso). A melhor resistência ao cisalhamento foi obtida para o solo a 16% LETE / substituição de cimento. Neste estudo, 15% LETE / cimento na substituição foi sugerido para melhorar o solo. Neste estudo, todos os testes foram realizados, seguindo os critérios ASTM, incluindo D854-83 para peso específico do solo, D2216-80 para teor de umidade do solo, D2487-85 para classificação do solo, D698-78 e D1557-78 para compactação do solo, D4318-84 e D427-83 para os limites de Atterberg, D2166-85 para compressão não confinada, D2434 para permeabilidade interior e D1888-87 e D4429-84 para CBR.

Em Taiwan, de acordo com os padrões de construção, o grau de compactação de 95% ou mais do peso específico aparentemente seco é aceito para compactação como requisito para o uso de base ou sub-base estabilizado por cimento.

Os valores para peso específico de LETE, cimento e solo foram $2,13 \text{ g/cm}^3$, $3,15 \text{ g/cm}^3$ e $2,72 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, e o volume de LETE foi relativamente maior do que o cimento. Como resultado, o peso unitário seco do solo tratado diminuiu com a quantidade de LETE adicionado. No entanto, devido ao peso específico do cimento ter sido maior do que o de LETE, o peso unitário seco máximo do solo tratado aumentou conforme a quantidade de cimento na mistura cresceu. A Figura 7.6 apresentam-se estes resultados.

Figura 7.6 -Resultados dos testes de compactação das misturas segundo Lin *et al.* (2016).

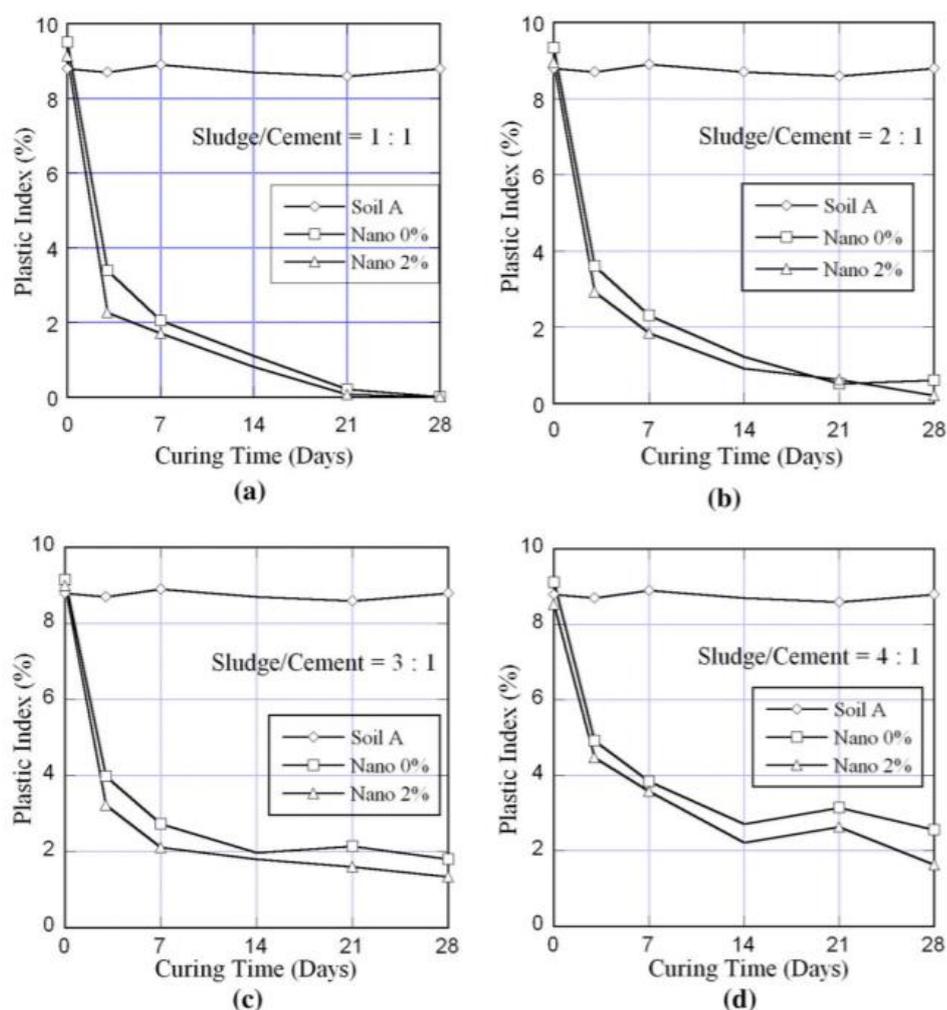


Fonte: Lin et al., (2016).

Na Figura 7.7 é apresentada a relação entre os valores de Índice de Plasticidade e idades de cura para várias razões LETE / cimento com ou sem 2% de nano-SiO₂ adicionado. Conforme apresentado, com ou sem a adição de 2% de nano-SiO₂, os valores de IP (Índice de Plasticidade) do solo tratado foram menores, especialmente durante o estágio inicial de cura. Ressalta-se que a adição de 2% de nano-SiO₂ proporcionou melhor redução nos valores de IP do que a obtida sem o aditivo, pois o aditivo nano-SiO₂ acelerou a reação de hidratação do LETE e do cimento. No entanto, a Figura 7.7 também mostra que os efeitos de com ou sem 2% de nano-SiO₂ sobre os valores de IP do solo tratado diminuíram após 14 dias de cura, o que é importante notar para aplicações de engenharia. De acordo com o padrão de construção para agregados graduados de camada base definida pelo Padrão de Construção da Cidade (PCC), da cidade de Yuan, Taiwan, o Limite de Liquidez (LL) deve ser inferior

a 25% e o IP deve ser não plástico para agregados classificados passados por uma peneira de 0,425 mm. Para o curso de base, o LL é o mesmo que o curso de sub-base e o IP deve ser menor que 6%. Neste estudo, os LLs e IPs para misturas com várias relações LETE / cimento foram de 28,4-32,8% e 8,4-9,6%, respectivamente, que eram mais elevados do que os níveis exigidos pelos padrões. Porém, o solo tratado foi sendo consolidado gradativamente com o auxílio da hidratação do cimento. Como resultado, os LLs e IPs do solo tratado atenderam aos requisitos estabelecidos pelas normas, e os materiais aplicados neste estudo foram adequados para aplicações no curso de base ou sub-base.

Figura 7.7 -Resultados limites de Atterberg das misturas segundo Lin *et al.* (2016)..



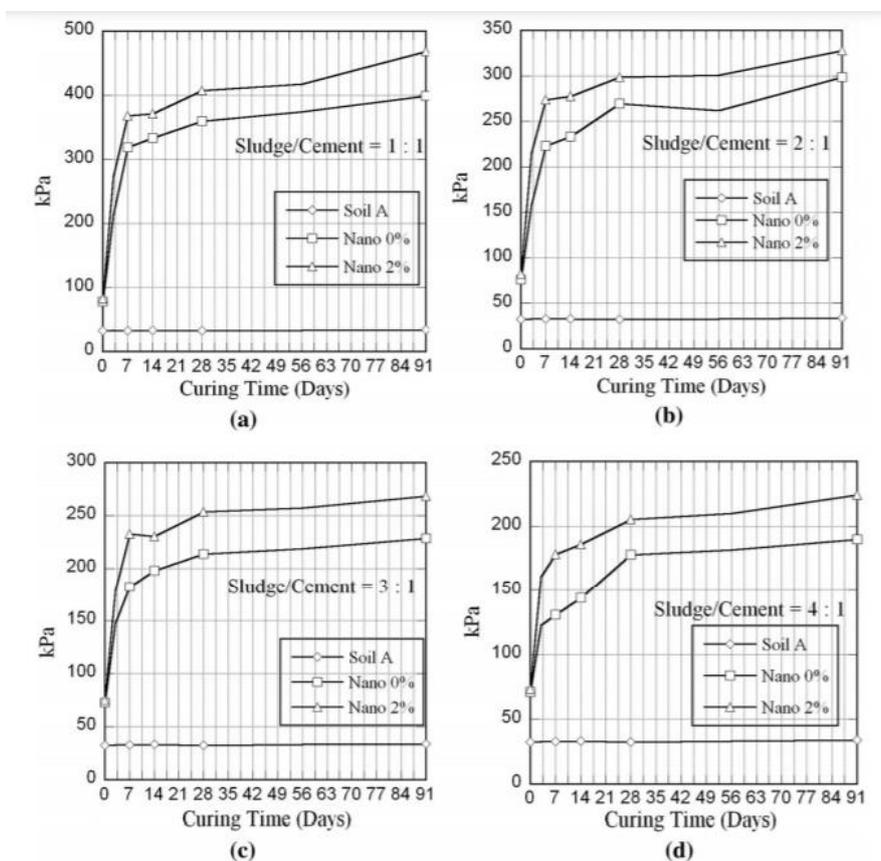
Fonte: Lin et al., (2016).

Na Figura 7.8 ilustra-se a relação entre a compressão de amostras de solo tratado em diferentes idades de cura com várias razões de LETE / cimento com ou sem 2% de nano-SiO₂ adicionado. Os resultados de compressão do solo tratado (para LETE / cimento = 1:1) com ou sem 2% de nano-SiO₂ foram 273,5 e 212,7 kPa, respectivamente, após 3 dias de cura. Segundo Lin et al., (2016) essas resistências foram aproximadamente 8,4 e 6,5 vezes maiores do que a do solo não tratado, o que indica

que a adição de LETE / cimento e nano-SiO₂ melhorou a compressão do solo não tratado. Além disso, as resistências dos solos tratados aumentaram com o aumento do tempo de cura.

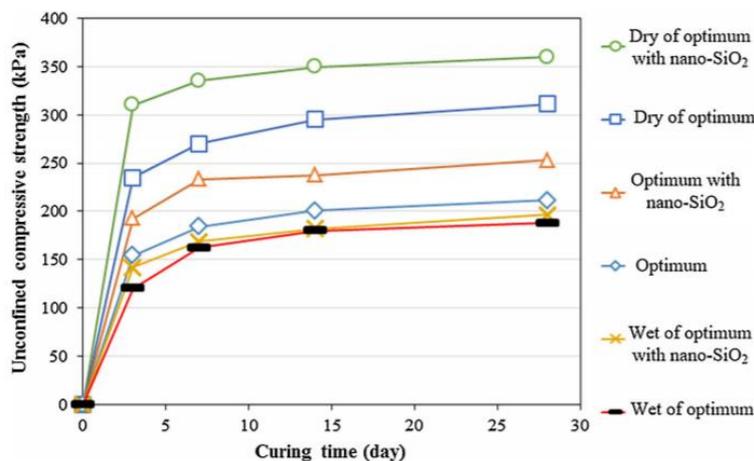
De acordo com Lin et al., (2016) os resultados também mostraram que a compressão do solo tratado foi melhorada pelas relações LETE / cimento de 1: 1 e 3: 1, sugerindo que nano-SiO₂ deve ser adicionado ao solo tratado em uma relação LETE / cimento de 3: 1 para ser mais eficaz. Conforme afirmado acima, o conteúdo de água de moldagem pode afetar a compressão. Para investigar a influência do teor de água de moldagem na compressão, foi utilizada a mistura de aditivos na proporção de 3: 1 de LETE para cimento. Os efeitos da mistura ótima foram estudados, e na Figura 7.9 mostra-se os resultados de compressão para as misturas ótimas (OMCs) nas condições de seco de ótimo, ótimo e úmido ótimo em amostras de solo em diferentes idades de cura tratadas com uma relação LETE / cimento de 3: 1 com ou sem 2% de nano-SiO₂.

Figura 7.8 -Resultados da compressão para as misturas segundo Lin *et al.* (2016).



Fonte: Lin et al., (2016).

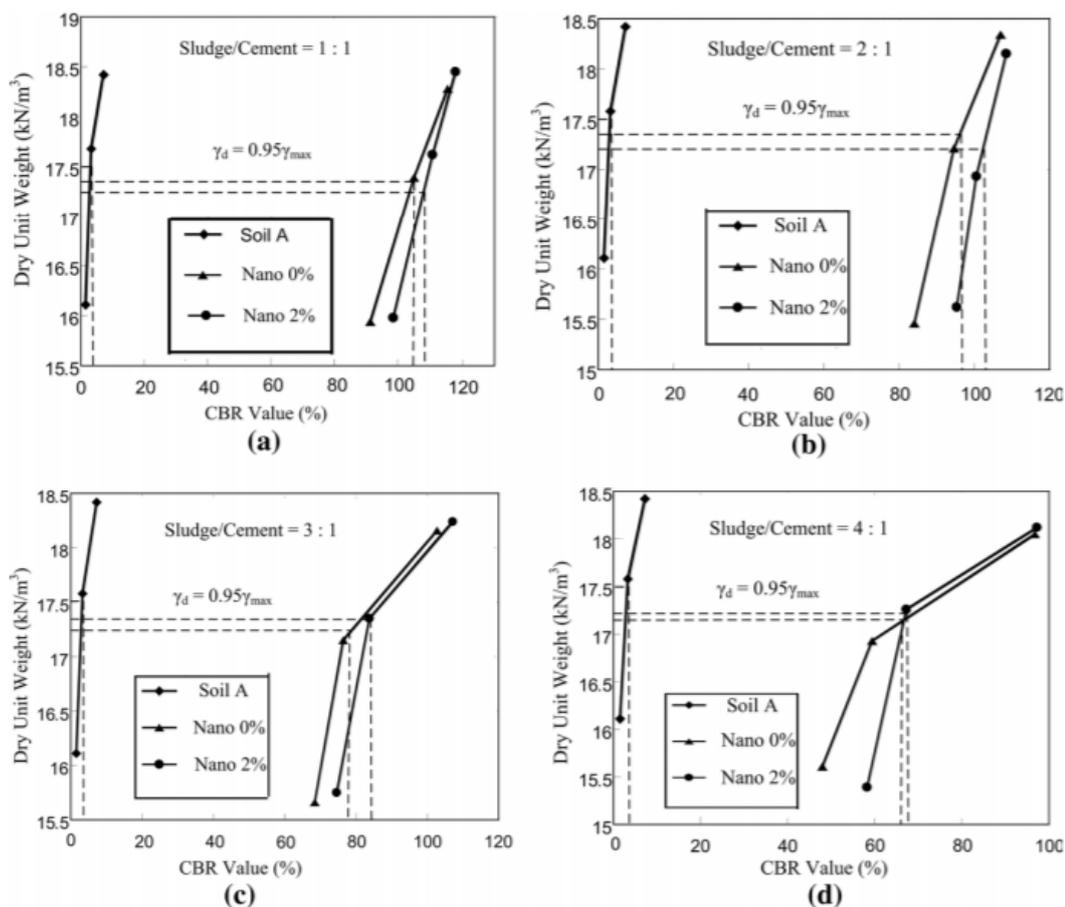
Figura 7.9 -Resultados da compressão para a mistura 3:1 segundo Lin *et al.* (2016).



Fonte: Lin et al., (2016).

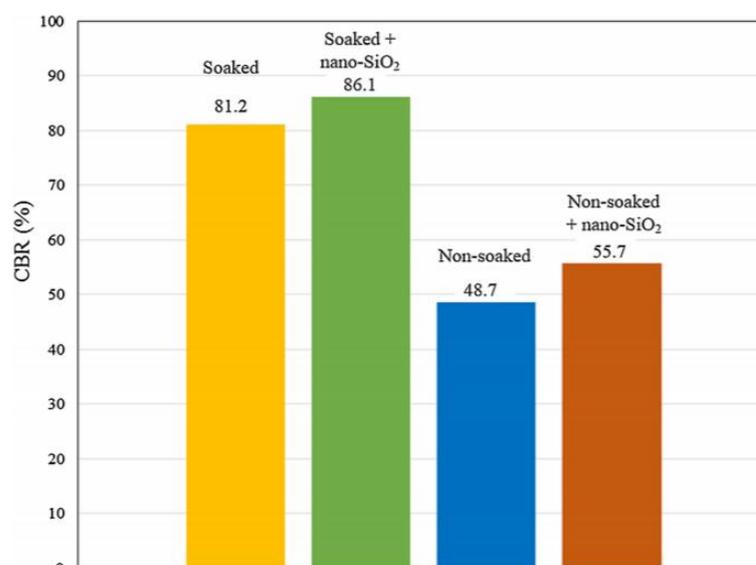
Segundo Lin *et al.* (2016) os efeitos de várias razões de LETE / cimento em valores de CBR de 95% para solo tratado foram aparentes, como mostrado na Figura 8.1. Segundo Lin et al., (2016) o aumento foi entre 60 e 95% e foi causado pelo aumento do gel de CSH produzido pela hidratação do cimento. A adição de nano-SiO₂ também melhorou os valores de CBR de 95%. No entanto, a influência desse aditivo não foi aparente na mistura LETE / cimento. A melhora variou com a proporção da mistura LETE / cimento. Neste estudo, as relações 2: 1 e 3: 1 para LETE / cimento mostraram a melhor sinergia com nano-SiO₂ para os valores de CBR de 95%. Esse efeito ocorreu, pois o nano-SiO₂ melhorou a reação pozolânica e gerou compostos, como o gel de CSH, na mistura. A Figura 8.2 mostra os valores de CBR para o solo tratado com uma relação LETE / cimento de 3: 1 com ou sem nano-SiO₂ em condições de imerso e seco. Conforme mostrado na Figura 8.2, o valor CBR (em%) das misturas embebidas atingiu 81,2, enquanto que o dos espécimes não embebidos atingiu 48,7 %, indicando que a resistência inicial das misturas de solo tratados com cimento embebido aumentou mais rápido do que os não encharcados.

Figura 8.1 -Resultados de CBR para as misturas segundo Lin *et al.* (2016).



Fonte: Lin *et al.*, (2016).

Figura 8.2 -Resultados de CBR para a mistura 3:1 LETE/cimento segundo Lin *et al.* (2016).



Fonte: Lin *et al.*, (2016).

Dessa forma, Lin et al., (2016) concluiu que a adição de 2% de nano SiO₂ com a mistura de LETE/cimento melhorou a compressão do solo, sendo a faixa de mistura mais eficiente a de 3:1 LETE/cimento com 2% de aditivo nano SiO₂. Os produtos de hidratação também aumentaram, sugerindo que os valores de resistência do solo tratado podem ser melhorados com a adição de nano SiO₂. Na aplicação de nano SiO₂ para melhorar o comportamento de expansão do solo de subleito, o aditivo levou a um aumento no potencial de expansão do solo tratado. Sendo assim, se o nano SiO₂ for aplicado a solo de subleito, um material aditivo para suprimir o comportamento de dilatação do solo também deve ser considerado.

Güllü, & Fedakar (2016) investigou as dosagens ótimas de cinza de lodo de ETE para sub base, através da abordagem fatorial experimental e estimativa de tamanho da partícula. Ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) foram realizados para aferir os parâmetros de valor de CBR, capacidade de energia de absorção (Ed) e capacidade de suporte final (qu) do solo + lodo de ETE calcinado, misturados na proporção 0,5,10,15,20,30,40,50 e 60% pela massa seca da mistura. A efetividade de uso das dosagens de cinza de lodo de ETE para melhoria e substituição na construção do pavimento, foi baseado em parâmetros de pesquisa anteriores, avaliados essencialmente através de testes de comparação múltipla e parâmetros de efeito de tamanho. Na Tabela 7.2, apresenta-se a caracterização física do solo tipo A-3 (AASHTO) e a Tabela 7.3 a caracterização física e química do lodo de ETE calcinado utilizado.

Tabela 7.2 -Caraterização física do solo tipo A-3 (AASHTO) segundo Güllü, & Fedakar (2016).

Parâmetros físicos	Solo A-3
massa específica (g/cm ³)	2,70
Peso específico seco máximo (kN/m ³)	20,6
Teor de umidade (%)	9,3
Limite de liquidez LL (%)	27,6
Limite de plasticidade LP (%)	-
Índice de plasticidade (%)	NP
Classificação USCS	SP-SM
Classificação AASHTO	A-3

Fonte: Adaptado de Güllü, & Fedakar (2016).

Tabela 7.3 - Caracterização química e física do lodo de ETE segundo Güllü, & Fedakar (2016)..

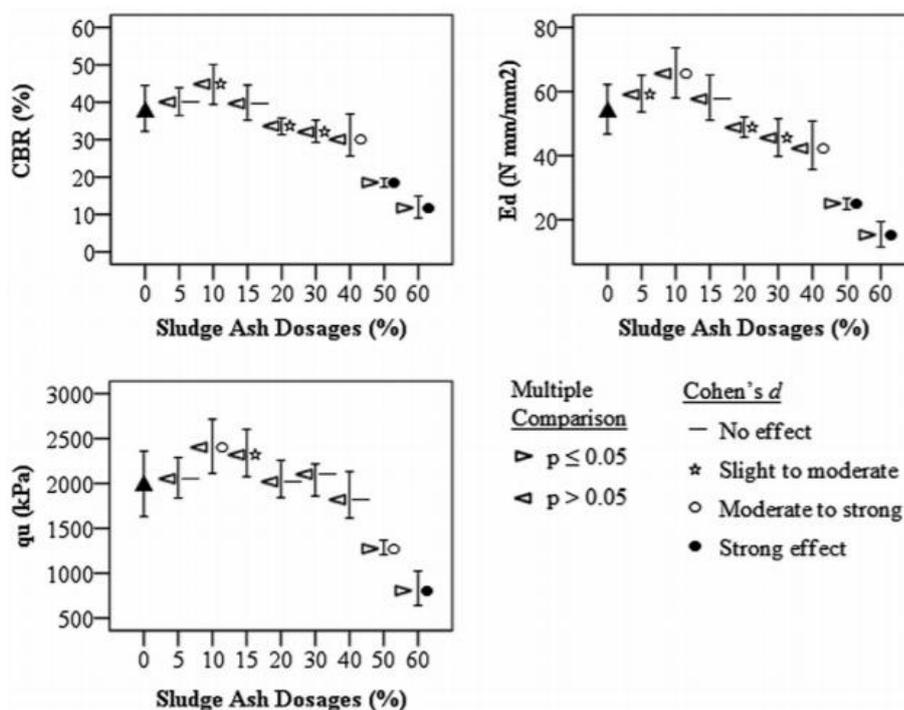
Parâmetros químicos e físicos	Lodo de ETE
CaO (%)	33,38
SiO ₂ (%)	24,18
Al ₂ O ₂ (%)	7,44
Fe ₂ O ₃ (%)	4,29
MgO (%)	8,26
SO ₃ (%)	11,17
P ₂ O ₅ (%)	1,74
K ₂ O (%)	2,74
Perda por ignição (%)	4,53
Massa específica (g/cm ³)	2,44

Fonte: Adaptado de Güllü, & Fedakar (2016).

Segundo Güllü, & Fedakar (2016) as modificações (aumento ou diminuição) nas variáveis de teste têm uma boa tendência de ajuste com os resultados da análise estatística. Pode-se observar na Figura 8.3 que a inclusão de cinzas de lodo de ETE na dosagem de 60% gerou a maior alteração (ou seja, diminuição) nas variáveis dependentes de CBR, Ed e qu. Isso foi verificado com a análise estatística que descreve esta diminuição significativa com um tamanho de efeito de “efeito forte”. Além disso, a alteração nas variáveis CBR, Ed e qu na dosagem de 50% das cinzas do lodo foi estatisticamente significativa (ou seja, $p \leq 0,05$). Ademais, isso foi afirmado com os níveis de tamanho do efeito que são “Efeito forte” em CBR e Ed um efeito “moderado a forte” em qu. Outras mudanças nas variáveis são consideradas estatisticamente insignificantes (ou seja, $p > 0,05$) pelos níveis de tamanho do efeito que são "sem efeito", "leve a moderado" e "moderado a Forte". A diminuição nas variáveis dependentes de CBR, Ed e qu devido à inclusão de cinza de lodo de ETE nas taxas de dosagem de 50 e 60% pode ser atribuída a diversas hipóteses em termos de geotecnia. À medida que o teor de cinzas de lodo na mistura aumenta, a mistura de solo muda de material grosso para fino e, em seguida, o ângulo de atrito interno diminui (Lin, Lin, & Luo, 2007). Isso pode ser visto na Figura 8.3 até a taxa de dosagem de cinza de lodo de ETE de 15%, os resultados experimentais de variáveis CBR e Ed denotam um ligeiro incremento, mas depois disso na dosagem, há uma ligeira diminuição nos resultados experimentais de CBR e Ed até a dosagem de 40%. Além disso, para a variável qu, os resultados experimentais indicaram um ligeiro aumento até a dosagem de 30% de cinzas de lodo, e a seguir mostrou-se uma ligeira diminuição até a dosagem de 40%. Todas essas mudanças nos resultados experimentais de todas as variáveis até a proporção de 40% estão de acordo com o estudo estatístico que mostra uma insignificante alteração (ou seja, $p > 0,05$) e principalmente um tamanho de efeito pobre. No entanto, como pode ser visto na Figura 8.3, as mudanças nas taxas de dosagem de cinzas de lodo de 50% e 60% são

estatisticamente significativos (ou seja, $p \leq 0,05$) e apresentam principalmente um forte tamanho de efeito.

Figura 8.3 - Relação entre os resultados experimentais com a múltipla comparação e a variável d de Cohen pela barra de erro segundo Güllü, & Fedakar (2016).



Fonte: Adaptado de Güllü, & Fedakar (2016).

Segundo Güllü, & Fedakar (2016), a conclusão geral tirada deste trabalho permite que a cinza de lodo de ETE seja utilizado para a melhoria nas taxas de dosagem de lodo de ETE de 5% (CBR = 40%), 10% (CBR = 45%) e 15% (CBR = 40%). Consequentemente, sugere-se que o lodo de ETE calcinado seja introduzido em solo arenoso para melhoria ou substituição em taxas de dosagem inferiores a 50% nas aplicações de estabilização. A partir da análise estatística realizada aqui, também se constatou que a comparação múltipla testes e estimativas de tamanho de efeito se saiu bem na tomada de decisão. Essas melhorias decorrem da resistência ao atrito entre as partículas da mistura e da atividade pozolânica das cinzas do lodo. O desenvolvimento de força deve aumentar com o tempo devido às reações pozolânicas.

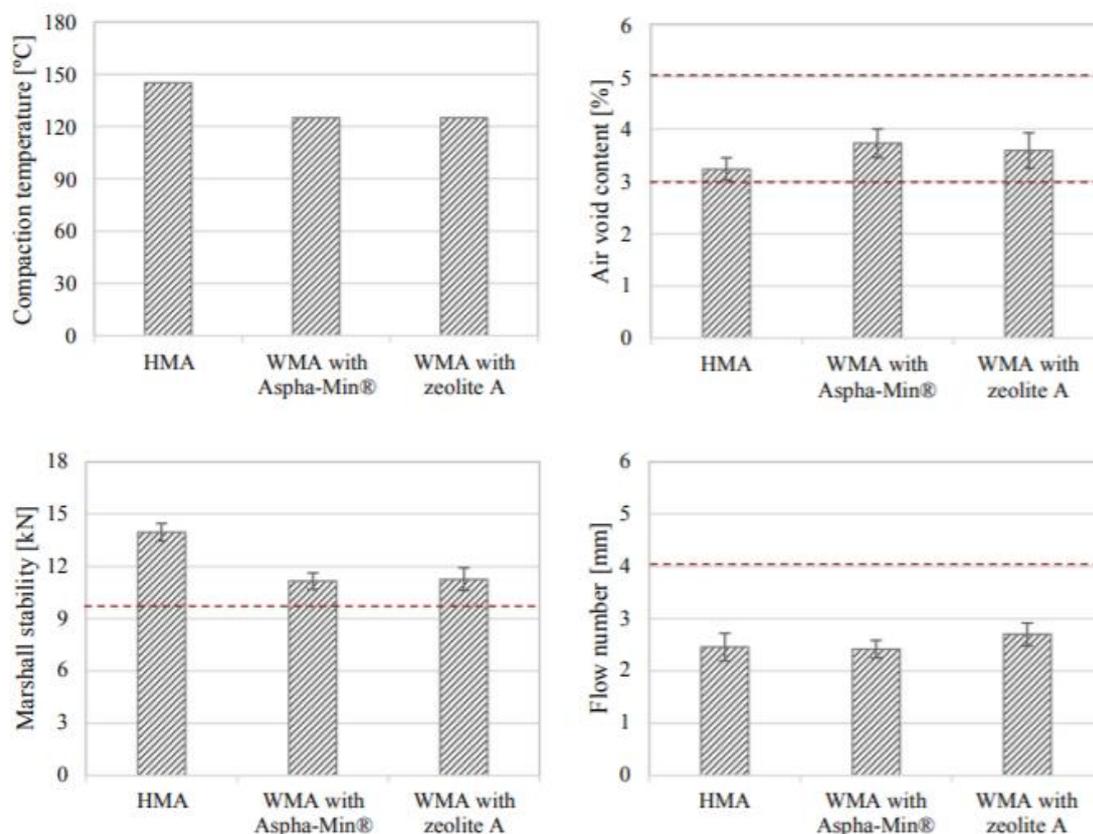
Zhang et al., (2018) teve como proposta em seu estudo utilizar o lodo de ETE para sintetizar a zeólita A e servir como aditivo para mistura asfáltica a quente (CBUQ), com o intuito de reduzir sua temperatura de mistura e consequentemente a energia, diminuindo assim a emissão de poluentes e por efeito tornar o processo mais ambientalmente adequado, que é uma nova estratégia de gestão de resíduos

e produção mais limpa. A TG-DTA (Termogravimetria), a DRX (Difratometria) e o MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) foram realizados para caracterizar o zeólito A derivado de lodo de ETE. Posteriormente, a mistura de CBUM foi produzida com o zeólito A derivado de lodo de ETE e medido para as propriedades básicas de engenharia geotécnica (teste Marshall).

Atualmente, ambos os zeólitos sintéticos comerciais (por exemplo, Aspha-Min®) e zeólita natural são usados como aditivos para CBUQ. Os aditivos de zeólita podem fornecer uma ferramenta viável para reduzir as temperaturas de mistura e compactação sem afetar as propriedades básicas de engenharia das misturas de asfalto. É interessante notar que zeólitas sintéticas podem ser produzidas a partir de resíduos, como cinzas volantes de carvão (Cardoso et al., 2015; Kim e Lee, 2009 *apud* Zhang et al., 2018), o que é mais economicamente e ambientalmente viável do que produtos comerciais sintetizados a partir de reagentes químicos.

O zeólito A sintetizado a partir de lodo de ETE sob as condições ideais de cristalização foi usado como um aditivo para produzir a mistura de CBUQ. O aditivo comercial de CBUQ o Aspha-Min®, também foi aplicado para produzir a mistura para comparação. Na Figura 8.4 apresentam-se os resultados do teste Marshall da mistura de CBUQ sem aditivo, mistura de CBUQ com Aspha-Min® e mistura com zeólita A derivada de lodo de ETE. Com uma diminuição de 25°C nas temperaturas de produção e compactação, as amostras Marshall com conteúdo médio de vazio de ar de 3,73% e 3,59% foram produzidos com sucesso para as misturas de CBUQ com Aspha-Min® e o zeólito A derivado de lodo de ETE, respectivamente. Em comparação, o conteúdo médio de vazio de ar da amostra de CBUQ sem aditivo foi de 3,23% no teste Marshall. Todos atendem ao requisito de índice de vazios de ar, que fica entre 3,0% e 5,0%. No método de projeto Marshall, a mistura de asfalto também precisa atender aos requisitos de propriedades mecânicas, como a estabilidade Marshall e o número de fluxo. Verificou-se que as estabilidades Marshall médias para a mistura de CBUQ sem aditivo e misturas de CBUQ com Aspha-Min® e zeólito A derivado de lodo de ETE foram 13,97 kN, 11,16 kN e 11,27 kN, respectivamente. Os números de fluxo para a mistura de CBUQ sem aditivo e misturas de CBUM com Aspha-Min® e zeólita A sintética foram 2,46 mm, 2,42 mm e 2,70 mm, respectivamente. Tanto a mistura CBUQ sem aditivo quanto as misturas de CBUQ com Aspha-Min® e zeólita A sintética atenderam aos requisitos de aceitação para estabilidade Marshall e número de fluxo (ou seja, maior que 10 kN e menor que 4 mm). Segundo Zhang et al., (2018) desta maneira, o produto zeólito A derivado de lodo de ETE pode ser uma alternativa aos aditivos misturas de CBUQ comerciais com desempenho comparável, o que ilustra uma abordagem de produção sustentável e mais limpa.

Figura 8.4 - Resultados dos ensaios Marshall para o CBUQ sem aditivo, CBUQ com Aspha-Min® e CBUQ com zeólita A derivada de lodo de ETE segundo Zhang *et al.* (2018).

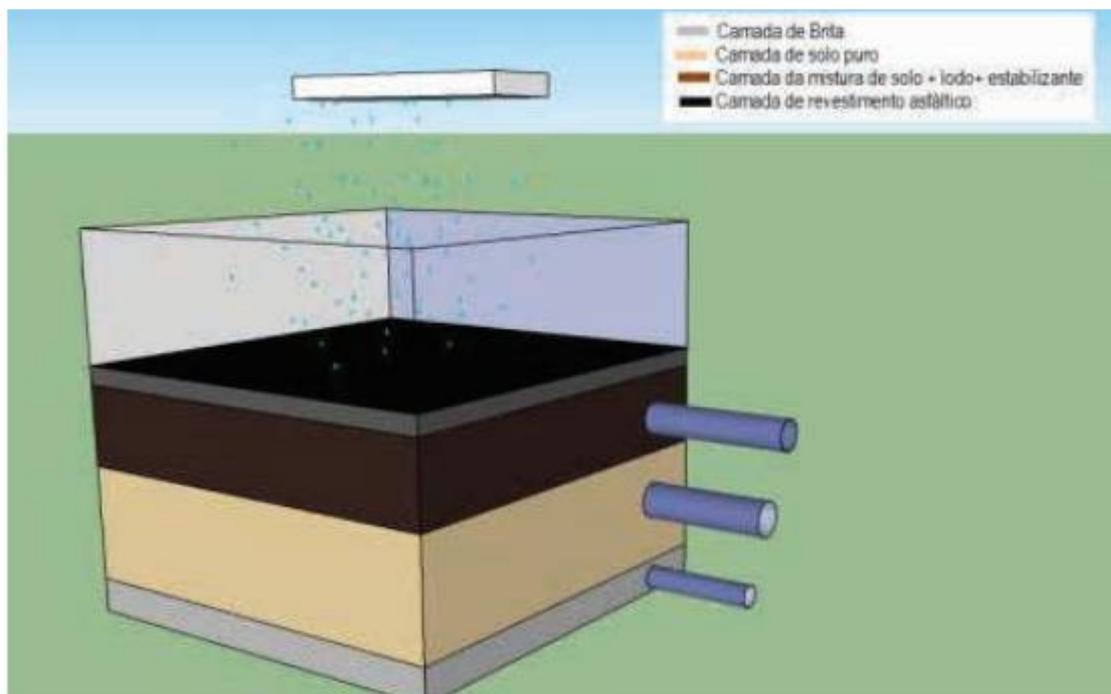


Fonte: Zhang et al., (2018).

Existe a preocupação com uma possível contaminação do meio ambiente, como o lençol freático, ao se utilizar esses resíduos de lodo de ETA e ETE em pavimentação, por isso, pesquisas têm sido desenvolvidas, com o intuito de avaliar os parâmetros ambientais desses solos misturados com lodo, para validar seu possível uso em pavimentação.

Lucena et al., (2017) monitorou justamente este impacto ambiental ocasionado pela utilização desses resíduos do lodo em base e sub-base de pavimentos. Para isto, o autor construiu um modelo reduzido (Figura 8.5), das misturas de solo + lodo + estabilizante, para o lodo de ETA e ETE (20% e 10%, respectivamente), e analisou-se, durante o período de um ano, os parâmetros de umidade, pH, recalque e concentração de metais (Tabela 7.4). Concluiu-se em seu estudo que a disposição final dos resíduos em camadas de sub-base e base de pavimentação, são uma solução ambientalmente adequada de disposição do lodo de ETA e ETE, desde que utilizados nas porcentagens ótimas apontadas neste estudo, não acarretando danos ao meio ambiente.

Figura 8 5 -Esquema da configuração do modelo reduzido construído para o experimento.



Fonte: Lucena et al., (2017).

Tabela 7.4 - Constituintes químicos encontrados nas camadas de solo SOLUBILIZADO no modelo reduzido contendo lodo de ETA e ETE segundo Lucena *et al.* (2017).

Resíduo	Identificação da amostra	As ³⁻	Cd ²⁺	Cr ³⁺	Pb ²⁺	Cu ²⁺	Fe ³⁺	Mn ³⁺	Ni ²⁺	Zn ²⁺	Al ³⁺
		mg/L									
Lodo de ETA	1ª camada	<0,10	<0,001	0,06	0,18	<0,10	114	0,065	0,086	0,069	240
	2ª camada	<0,10	<0,001	0,08	0,18	<0,10	102	0,057	0,09	0,13	245
Lodo de ETE	1ª camada	<0,10	<0,001	<0,005	0,012	<0,10	0,03	<0,010	0,22	0,011	<0,10
	2ª camada	<0,10	<0,001	<0,05	0,081	<0,10	64,4	0,04	0,043	0,038	<0,10
Limite norma ¹		0,01 ¹	0,005 ¹	0,05 ¹	0,01 ¹	2,0 ³	0,3 ³	0,1 ²	0,02 ³	5,0 ³	0,2 ²

Fonte: Lucena et al., (2017).

5.3 COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS APRESENTADOS NA RBS: SÍNTESE E ANÁLISE CRÍTICA.

5.3.1. AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO PARA USO DE LODO DE ETA E ETE EM PAVIMENTAÇÃO

Neste item são apresentados nos Quadros 1.7,1.8, 1.9, 2.1, 2.2 e 2.3 a compilação dos ensaios utilizados para obtenção dos resultados das pesquisas da literatura sobre uso de lodo de ETA e ETE em pavimentação, e posteriormente, discorrido a respeito das possíveis razões de escolha desses ensaios, comparando-se com os parâmetros recomendados pelo DNIT e a forma de secagem e/ou calcinação escolhida para o lodo e/ou, em alguns casos, a utilização do resíduo (lodo) *in natura*.

Quanto as especificações normativas pelos órgãos regulamentadores, para o uso de materiais em pavimentação, no Brasil, o DNIT é o órgão que estabelece os ensaios de cada parâmetro físico e mecânico a serem executados para o atendimento da qualidade e desempenho do material no pavimento, seja nas camadas de subleito, base, sub-base e revestimento.

Com intuito de orientar os projetistas de pavimentação quanto aos critérios a serem adotados, o DNIT criou seu Manual de Pavimentação (2006), sendo que no item 4.3 Projeto de Pavimentação, divide-se os estudos geotécnicos, para análise dos materiais de uso, em duas categorias:

- a) Estudos do Subleito
- b) Estudo de ocorrências de materiais para pavimentação.

Na seção de estudos geotécnicos, o manual do DNIT (2006) determina os ensaios a serem executados com o intuito de reconhecimento e caracterização dos materiais, como fonte de matéria prima para a utilização na construção das diversas camadas de reforço do subleito, sub-base, base e revestimento, sendo descritos conforme a seguir:

- a) Granulometria por peneiramento com lavagem do material na peneira de 2,0 mm (nº10) e de 0,075 mm (nº200);
- b) Limite de Liquidez;
- c) Limite de plasticidade;
- d) Limite de construção em casos especiais de materiais do subleito;
- e) Compactação;
- f) Massa específica aparente “in situ”;
- g) Índice Suporte California (ISC);
- h) Expansibilidade no caso de solos lateríticos.

Relacionando os parâmetros exigidos no Brasil, com os estudos levantados neste trabalho, a seguir, serão avaliados cada ensaio de caracterização física, mecânica e química escolhidos pelos respectivos autores e o possível impacto que esta escolha acarreta na avaliação do material, no caso o lodo de ETA e ETE em pavimentação.

Quadro 1.7 -Caracterização física proposta pelos estudos de lodo de ETE em pavimentação (2012 a 2020).

PUBLICAÇÕES				
LODO DE ETE				
nº	AUTORES	Ano	LOCAL	Ensaio de caracterização física
1	Tamile Antunes Kelm, Laura Maria Goretti da Motta, Mariluce de Oliveira Ubaldo.	2014	Rio de Janeiro - RJ (ETE do Caju)	Massa específica real dos grãos, Limites de Atterberg, granulometria.
2	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela.	2012	Recife-PE (ETE Cabanga)	Massa específica real dos grãos, Limites de Atterberg, umidade, granulometria.
3	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela.	2014	Recife-PE (ETE Cabanga)	Resultados dos ensaios feitos por Lucena et al., (2012)
4	Kiev Luiz Pereira	2012	Natal-RN (Empresa limpa fossa - lagoa de estabilização anaeróbia)	Massa específica real dos grãos, Limites de Atterberg, granulometria.
5	J.G Bastidas-Martínez, J.Camapum de Carvalho, L.C Lucena, M.M.Farias, H.A Rondón-Quintana.	2020	ETE de Brasília-DF	Penetração e ponto de amolecimento.
6	Kaling Taki, Saurabh Choudhary, Sharad Gupta, Manish Kumar	2019	Gandhinagar - Índia (ETE Jasipur)	Limites de Atterberg, granulometria, massa específica aparente seca, peso específico.
7	Deng-Fong Lin, Huan-Lin Luo, Darn-Horng Hsiao, Chien-Ta Chen, Ming-Du Cai.	2016	Tawain (ETE não identificada)	Peso específico, Limites de Atterberg.
8	Hamza Güllü e Halil İbrahim Fedakar	2016	Turquia (ETE Gaziantep)	Granulometria, perda por ignição, peso específico.
9	Yuan Zhang, Zhen Leng, Fuliao Zou, Lei Wang, Season S. Chen, Daniel C.W. Tsang	2017	Tuen Mun -Hong Kong (ETE T-Park)	Granulometria, massa específica (método não informado).

Fonte: Autor (2021).

Quadro 1.8 -Caracterização física proposta pelos estudos de lodo de ETA em pavimentação (2012 a 2020).

PUBLICAÇÕES				
LODO DE ETA				
nº	AUTORES	Ano	LOCAL	Ensaio de caracterização física
1	Rodrigo Vaz Coelho; Fernando Shigueu Tahira; Fernando Fernandes; Heliana Barbosa Fontenele; Raquel Souza Teixeira	2015	Londrina-PR (ETA Cafezal)	Massa específica real dos grãos, Limites de Atterberg, granulometria.
2	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela	2012	Igarassu-PE (ETA Botafogo)	Massa específica real dos grãos, Limites de Atterberg, umidade, granulometria.
3	Jessica Vannesa Colmenares Delgado	2016	Nova Iguaçu-RJ (ETA Guandu)	Massa específica real dos grãos, granulometria, Limites de Atterberg
4	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela	2014	Igarassu-PE (ETA Botafogo)	Resultados dos ensaios feitos por Lucena et al., (2012)
5	J.G Bastidas-Martínez, J.Camapum de Carvalho, L.C Lucena, M.M.Farias, H.A Rondón-Quintana.	2020	ETA de Brasília-DF	Penetração e ponto de amolecimento.
6	Sahar A. Ali Dawood, Hayder Abbas Obaid, Tameem Mohammed Hashim e Hadeel Kareem Jasim	2019	Iraque (ETA Al Hilla)	Peso específico, granulometria.
7	Yue Liu, Yan Zhuge, Christopher W.K. Chow, Alexandra Keegan, Danda Li, Phuong Ngoc Pham, Jianyin Huang, Rafat Siddique.	2020	Austrália (ETA Happy Valley)	Peso específico, absorção de água, perda por ignição e granulometria.

Fonte: Autor (2021).

Analisando o Quadro 1.7, observa-se o uso dos ensaios de massa específica real dos grãos pelos autores em lodo de ETE nº 1 Kelm (2014), nº 2 Lucena et al., (2012), nº3 Lucena et al., (2014) e nº 4 Pereira (2012). No Quadro 1.8 o lodo de ETA dos autores nº1 Coelho et al., (2015), nº 2 Lucena et al.,

(2012), nº3 Delgado (2016) e nº4 Lucena et al., (2014) também utilizaram o ensaio de massa específica real dos grãos.

O ensaio de massa específica aparente “in situ” recomendado pelo manual do DNIT (2006) possui uma diferença, sob o ponto de vista dos índices físicos, comparado ao ensaio de massa específica real dos grãos utilizado nos estudos levantados. Regulamentado pela norma DNER-ME 092/94 e ABNT NBR 7185:2016, o ensaio de massa específica aparente seca “in situ”, leva em conta o volume total, que seria o volume dos grãos mais o volume de vazios, enquanto a massa específica real dos grãos, regulamentado pela norma DNER-ME 093/94 e ABNT NBR 6508:1984, considera apenas o volume dos grãos ocupados no frasco, descontado o volume dos vazios.

Vale ressaltar que a partir de 2016, a ABNT NBR 6508:1984 foi substituída pela ABNT NBR 6458:2016, onde a partir desta norma, utiliza-se outro tipo de metodologia de cálculo e procedimento para solos retidos na peneira de 4,8 mm, pelo ensaio de granulometria, e também que passam neste número de peneira. Portanto, estudos que utilizam da metodologia do frasco Chapman, após o ano de 2016, estão desatualizados em relação a norma vigente.

O autor nº5 dos Quadros 1.7 e 1.8 realizou os ensaios de penetração e ponto de amolecimento conforme os parâmetros normativos da ASTM, para avaliar a temperatura ideal entre 0,200,400,600 e 800°C de calcinação que seria preparado o filler para aplicação na mistura asfáltica a quente, definindo-se como ótima a queima do lodo de ETE e ETA a 500°C.

Os autores nº 6 Taki et al., (2019), nº7 Lin et al., (2016), nº 8 Güllü et al., (2016), para o lodo de ETE. Nº 6 Ali Dawood et al., (2019) e nº7 Liu et al., (2020), para o lodo de ETA utilizaram os parâmetros de peso específico e massa específica aparente seca. A massa específica aparentemente seca de um solo, obtida após a compactação, depende da natureza do solo, de sua granulometria, e da sua massa específica real dos grãos, que varia aproximadamente, entre os valores de 1,4 g/cm³ e 2,3 g/cm³ (DNIT, 2006). Assim como, do teor de umidade do solo compactado. O peso específico do solo, trata-se de um índice físico que relaciona o peso do solo contido num denominado volume, de acordo com seu grau de saturação ($0 < sr \leq 100\%$).

Observa-se desta forma, que se tratando do parâmetro de massa e peso dos materiais, o uso de um determinado método ou outro pode impactar diretamente no resultado da avaliação do lodo, seja de ETA ou ETE no pavimento, pois possuem critérios e métodos distintos uns dos outros.

Os limites de Atterberg relacionam-se ao Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP), e Índice de Plasticidade (IP), e foram utilizados pelos autores nº1, nº2, nº3, nº4 e nº6 para lodo de ETE e nº1, nº2, nº3 e nº4 para o lodo de ETA.

Os valores de plasticidade e liquidez de um solo ou do lodo de ETA e ETE são importantes como propriedades físicas, pois servem como parâmetros de análise do comportamento da mistura em posteriores avaliações de ensaios desta natureza, auxiliando no entendimento dos fatores preponderantes quando se utiliza um resíduo sólido na mistura com um determinado solo em pavimentação.

Segundo estudo de Ribeiro e Souza (2018), a fração de areia apresenta correlação importante e impacta negativamente com os valores de LL e LP, pois quanto mais plástico for o solo, maior a umidade necessária para que alcance os estados plástico e líquido, e quanto mais arenoso for o solo, menor sua plasticidade e o estado líquido será atingido com mais facilidade, ou seja, um menor valor de LL, a granulometria do solo também possui um impacto sobre os limites de consistência, pois quanto mais elevado a porcentagem da fração de areia, menor a plasticidade do solo.

Sendo assim, pode-se dizer que os limites de Atterberg são parâmetros imprescindíveis para o estudo do uso e destinação do lodo em pavimentação, apontados como recomendados pelo manual do DNIT (2006), e desta forma, para os autores do Quadro 1.7 e 1.8 que não utilizaram desta análise, possuem uma probabilidade de não avaliarem de forma completa a consequência da mistura do lodo de ETA ou ETE no material utilizado para o pavimento em questão.

O ensaio de análise granulometria para solos, normatizado pela ABNT NBR 7181/2016, possui duas opções de métodos, que são definidas conforme o tamanho da partícula a ser analisada, sendo o método de peneiramento ou por uma combinação de peneiramento e sedimentação. De acordo com a norma ABNT NBR 6502/1995, o ensaio de peneiramento, na prática corrente, permite a classificação das partículas de tamanho maior que 0,075 mm, enquanto o ensaio de sedimentação visa a determinação da distribuição granulométrica de solos finos, ou seja, partículas com diâmetros inferiores a 0,075 mm.

Conforme o Quadro 1.7, os autores nº1, nº2, nº3, nº4, nº6, nº8 e nº9 e o Quadro 1.8, os autores nº1, nº2, nº3, nº4, nº6 e nº7 realizaram o ensaio de análise granulométrica, apenas o autor nº7 do Quadro 1.7, não realizou este ensaio.

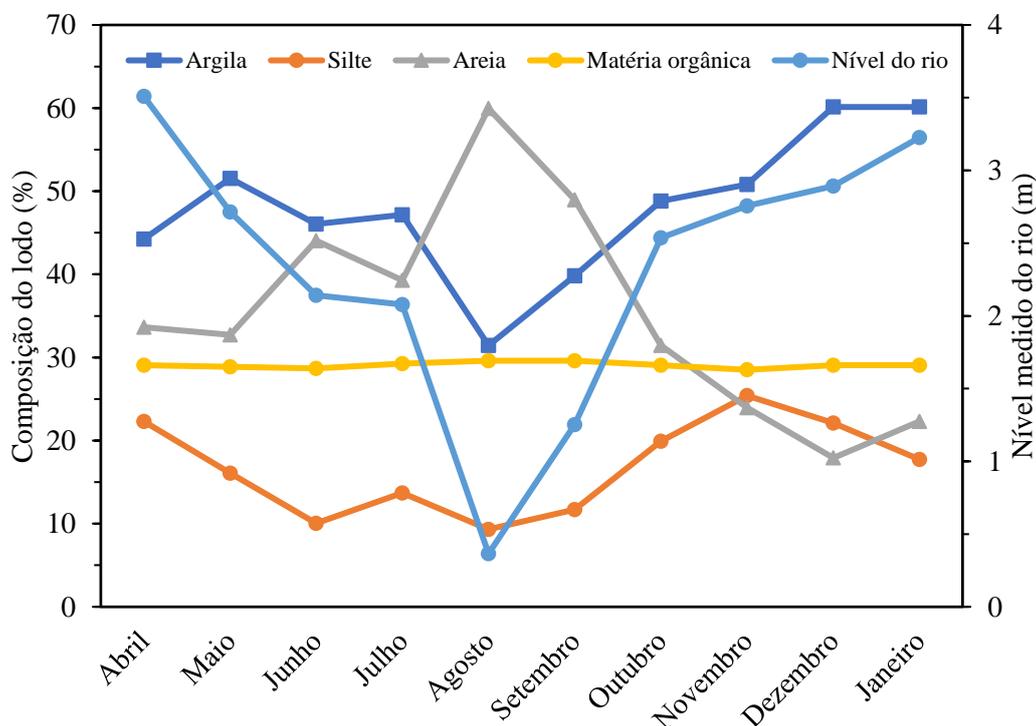
Observa-se que nestes estudos, a maioria dos autores que realizaram suas pesquisas fora do Brasil, não especificaram qual o método de ensaio granulométrico foi escolhido e também qual a temperatura utilizada para secagem da amostra. Porém, sabe-se que o lodo de ETA e ETE possui características granulométricas de partículas finas, normalmente com suas porcentagens de classificação de textura do solo entre argila, silte e areia. Assim como, no que diz respeito a temperatura de secagem em estufa, a norma ABNT NBR 7181/2016 diz que a amostra deve ser seca até que se atinja a umidade higroscópica.

De acordo com Montalvan (2016), a distribuição granulométrica dos lodos de ETAs (LETA) são dependentes de uma série de fatores, como exemplo, a estação climática no momento em que se coleta a amostra na ETA, o coagulante utilizado no processo de tratamento da água e a umidade inicial da amostra no ensaio de análise granulométrica. Além da granulometria do LETA variar com a estação climática vigente, o tipo de coagulante utilizado para tratamento da água bruta, influência também na sua distribuição granulométrica.

Teixeira et al., (2011), em seu estudo com foco na adição do lodo de PACI (Policloreto de Alumínio) à argila na fabricação de produtos cerâmicos, investigaram a granulometria de amostras de LETA durante um ano. Este estudo mostra como as concentrações das frações de areia, silte e argila,

assim como o teor de matéria orgânica, variam nos diferentes meses de coleta das amostras (ver Figura 8.7).

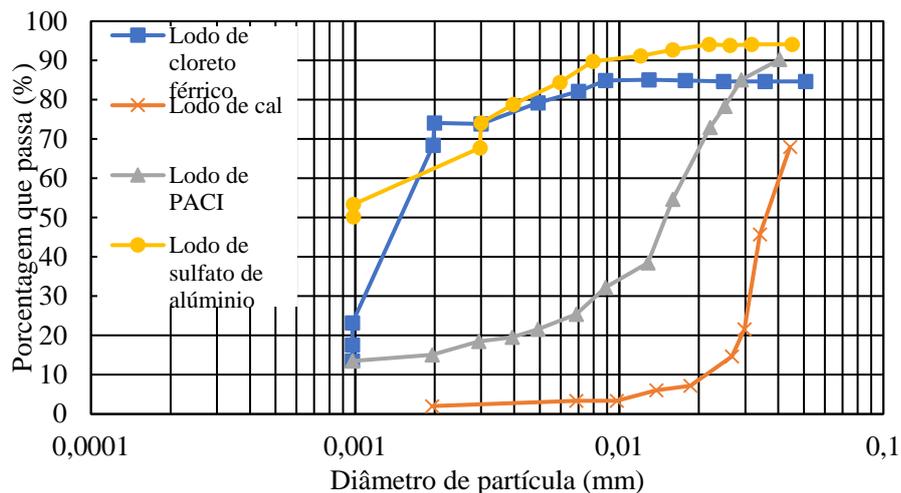
Figura 8.6 - Variação da granulometria e da concentração de matéria orgânica ao longo dos meses de coleta do lodo da ETA Presidente Prudente, SP, Brasil.



Fonte: Adaptado de Teixeira et al., (2011).

Além da granulometria do LETA variar com a estação climática vigente, o tipo de coagulante utilizado para tratamento da água bruta, influencia também na sua distribuição granulométrica, conforme podemos observar na Figura 8.8. Vale ressaltar que neste estudo, não foram utilizados defloculantes para análise granulométrica do LETA.

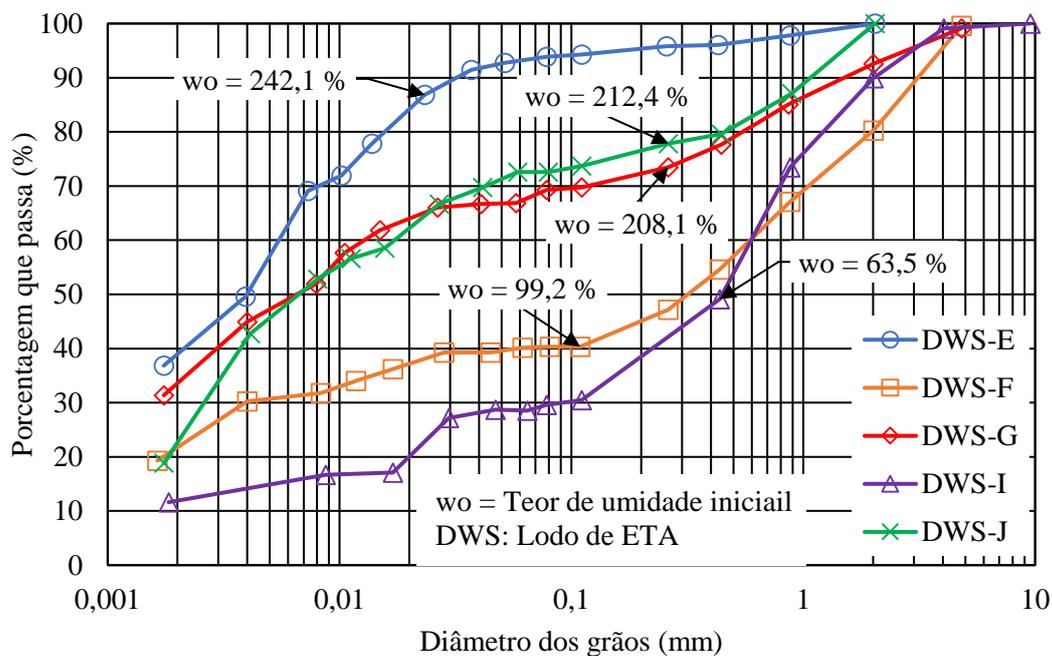
Figura 8.7 - Curvas granulométricas de lodos de ETAs que utilizam coagulantes.



Fonte: Adaptado de Vandermeijden e Cornwell (1998) *apud* Montalvan (2016).

Watanabe et al. (2011) em seu estudo, mostraram que a distribuição granulométrica de um lodo de ETA depende diretamente da umidade inicial, ou seja, a umidade em que se encontra o lodo no momento da execução do ensaio de granulometria. Na Figura 8.8 apresentam-se as curvas granulométricas para diferentes umidades iniciais do lodo de forma que, à medida que a umidade inicial diminui, o material se torna mais granular. Cada curva granulométrica corresponde a um mês de coleta da amostra na ETA, sendo a curva E o lodo de ETA (DWS) coletado no mês de setembro de 2007, a curva F e G em novembro de 2007, a curva I em junho de 2008 e a curva J em novembro de 2008. Segundo Montalvan (2016), é importante levar em consideração que com a secagem do lodo de ETA, pode acontecer a cimentação das partículas, devido à presença dos metais adicionados como coagulantes no tratamento de água.

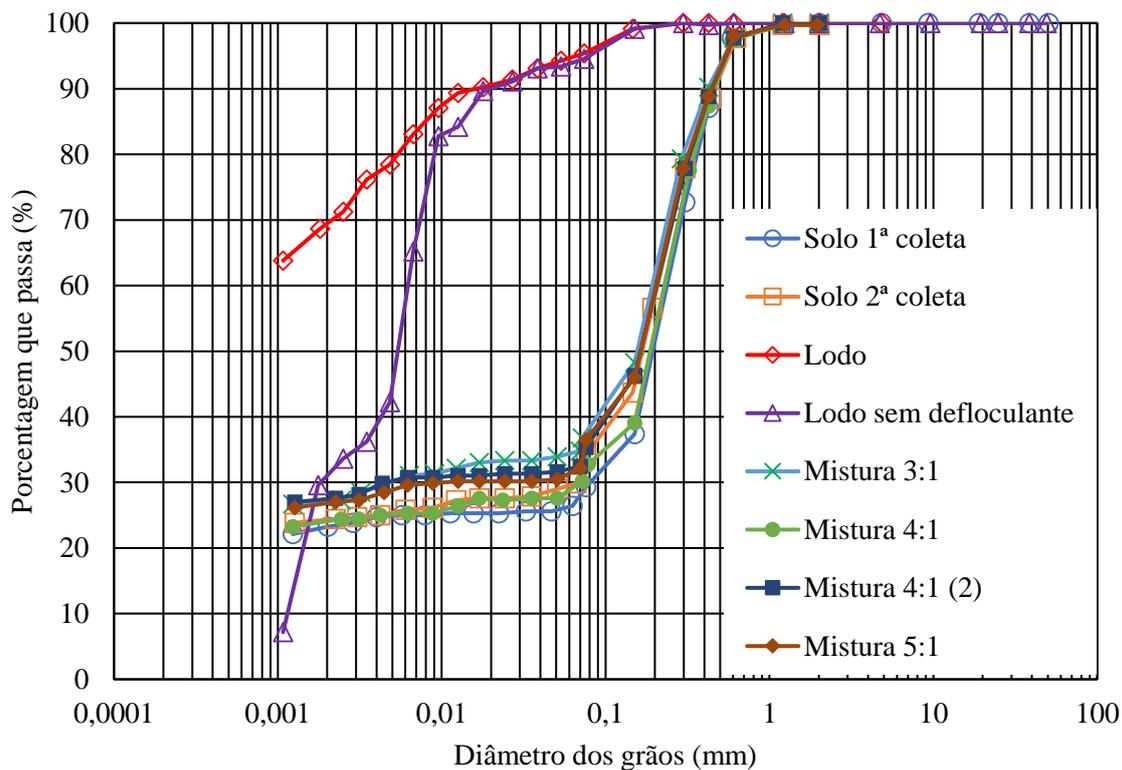
Figura 8.8 -Curvas granulométricas de lodo de ETA em diferentes umidades iniciais (Hitachi, Japão).



Fonte: Adaptado de Watanabe et al., (2011).

Montalvan (2016) caracterizou o LETA de Cubatão-SP para uso em obras geotécnicas de aterro sanitário. Realizou o ensaio de granulometria conforme a ABNT NBR 7181/2016, de maneira combinada, ou seja, por sedimentação e peneiramento do material lavado e retido na peneira de número 200 após o ensaio de sedimentação. Obteve-se as porcentagens de material das diversas frações em massa seca para o ensaio com uso de defloculante, sendo: 1,2% de areia média, 4,7% de areia fina, 25,7% de silte, e 68,4% de argila. Sendo assim, fica claro que o lodo neste estudo é constituído principalmente por partículas finas (94,1% de finos). Conforme pode-se observar pela curva granulométrica da Figura 9.1, fez-se o ensaio também sem o uso de defloculante no LETA e observou-se a influência do cloreto férrico, insumo utilizado no tratamento de água, provocando o aglutinamento das partículas e a precipitação mais acelerada, resultando numa porcentagem maior de areia e argila. Além disso, realizou-se a análise granulométrica de misturas nas proporções de solo e lodo, respectivamente, nos valores de 3:1, 4:1 (2) (solo da segunda coleta) e 5:1.

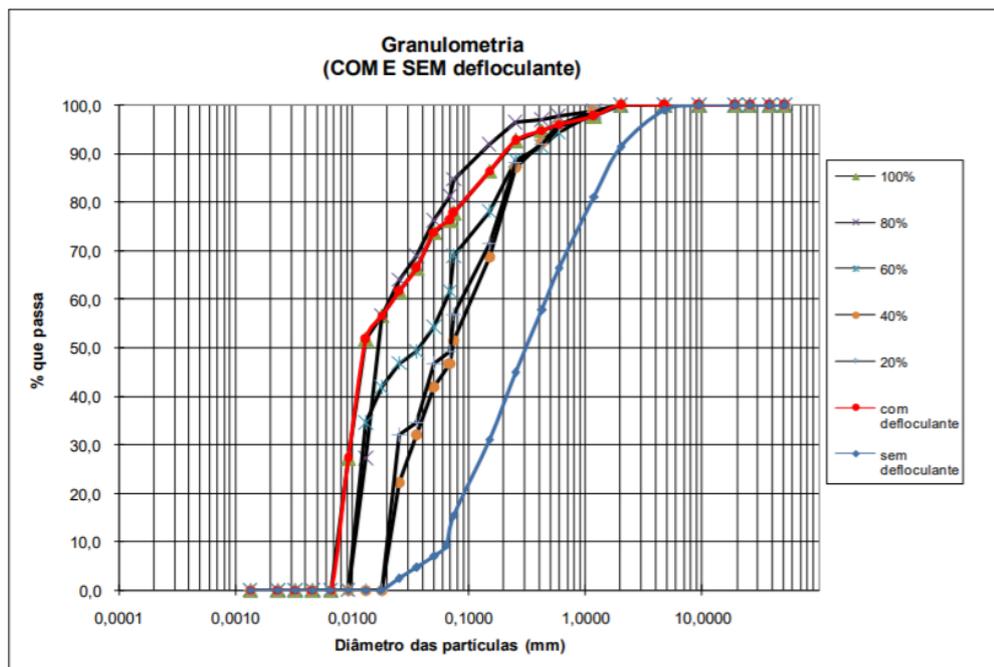
Figura 9.1 -Curvas granulométricas do solo, do lodo de ETA e das misturas utilizadas de solo e lodo de ETA segundo Montalvan (2016).



Fonte: Adaptado de Montalvan (2016).

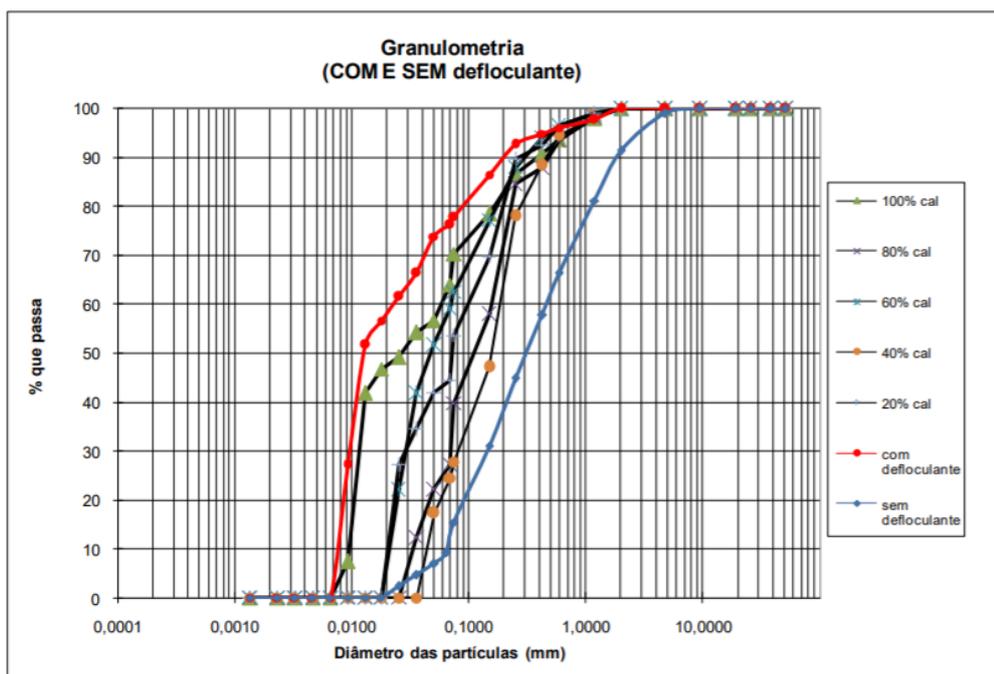
O lodo de ETE possui também características de floculação e defloculação das partículas, conforme o teor de floculante (no caso a cal), utilizado para o tratamento do lodo, em seu estudo Silveira (2014), avaliou o impacto do uso de defloculantes no resíduo para a análise granulométrica, apresentado pelas Figura 9.2 e 9.3.

Figura 9.2 - Curva granulométrica do solo com lodo de ETE sem uso de floculante cal segundo Silveira (2014).



Fonte: Silveira (2014).

Figura 9.3 - Curva granulométrica do solo com lodo de ETE com uso de floculante cal segundo Silveira (2014).



Fonte: Silveira (2014).

Segundo Silveira (2014), ao analisar as Figuras 9.4 e 9.5, observa-se que o efeito do lodo de ETE hora atua como defloculante, hora como floculante, sendo assim o lodo de ETE possui propriedade de alterar as características do solo e agir sobre os finos, dispersando o mesmo.

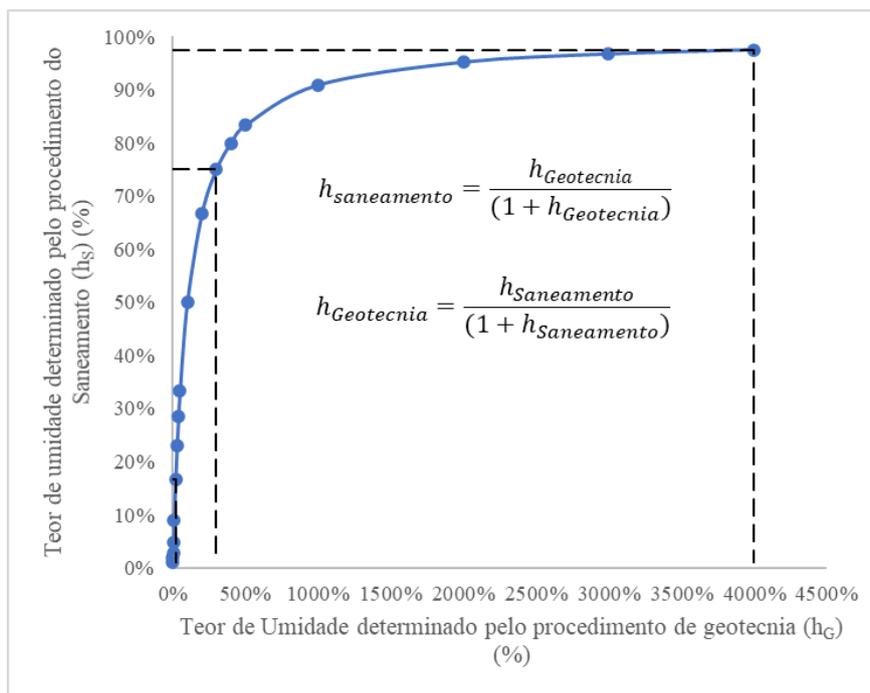
A partir destes estudos, é possível verificar que para uma análise granulométrica do lodo de ETA e ETE, com o intuito de aplicação em pavimentação, é recomendado realizar um ensaio comparativo com e sem o uso de defloculantes, pois este uso pode ocasionar impacto significativo no resultado granulométrico das partículas, de forma que a porcentagem de material fino passante aumenta consideravelmente. Ademais, a estação vigente no momento da coleta do lodo de ETA e o tipo de coagulante utilizado, impactam significativamente nos resultados de análise granulométrica, sendo assim, pode-se notar que os estudos levantados neste presente trabalho, que não realizaram a análise destes fatores de impacto granulométrico no lodo de ETA e ETE, estão sujeitos a resultados que não condizem com as condições reais em 100 % do tempo da amostra, caso seja coletado em outra época ou com outro tipo de insumo coagulante, além do uso ou não de defloculantes no processo de análise granulométrica por sedimentação.

Analizando o Quadro 1.7, observa-se que os autores nº2 e nº3 realizaram o ensaio de determinação de umidade do lodo, enquanto no Quadro 1.8, realizaram esta análise os autores nº2 e nº4 ou seja dos 16 estudos menos da metade, ou seja 4, avaliaram a umidade do lodo de ETA e ETE na mistura para aplicação em pavimentação.

Vale ressaltar que, destes 4 estudos que realizaram o ensaio de umidade para o lodo de ETA e ETE, todos do ensaio inicialmente realizado por Lucena et al., (2012), visto que os demais estudos são compostos em parte dos mesmos autores, utilizam deste dado para caracterizar os lodos que são os mesmos coletados nas estações de Igarassu-PE (ETA Botafogo) e Recife-PE (ETE Cabanga). Neste estudo, Lucena et al., (2012) para avaliar o teor de umidade do lodo de ETA e ETE, utilizou do método APHA (American Public Health Association) de 1998.

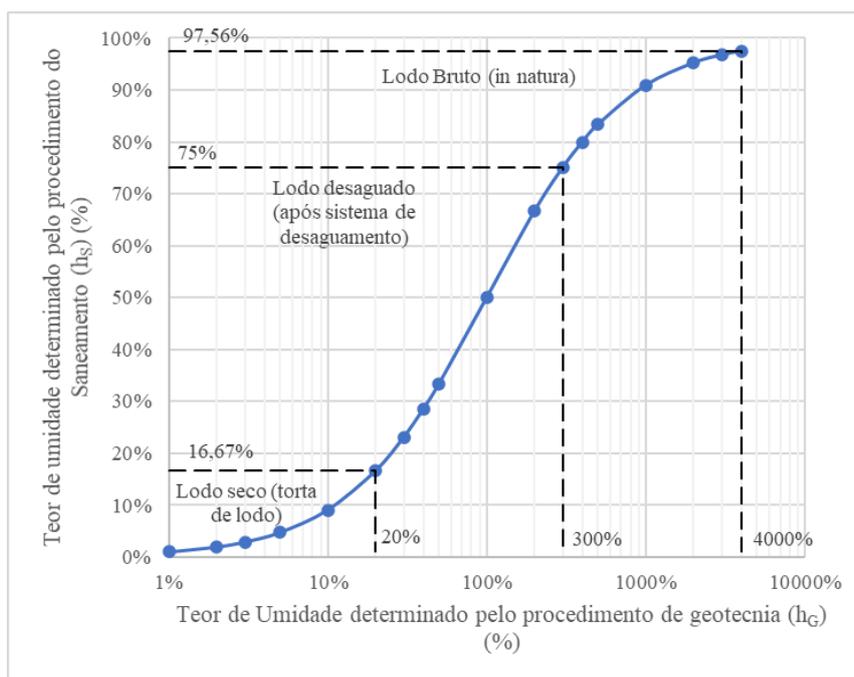
Sabe-se que há uma diferença importante entre os métodos da área de saneamento (APHA e ABNT NBR 10664/1989) e geotecnia (ABNT NBR 16097/2012) para determinação da umidade, isso deve-se ao fato de que, no saneamento, calcula-se a umidade com o denominador em relação a massa total da amostra enquanto na geotecnia seu denominador é a massa seca da amostra, ocorrendo assim uma distorção na escala dos resultados entre essas duas áreas correlatas, conforme exemplo apresentado nas Figuras 9.4 e 9.5, para elucidar esta diferença, atribuiu-se valores conceituais.

Figura 9 4 -Comparação gráfica entre os métodos de determinação de umidade nas áreas de saneamento (APHA) e geotecnia (NBR).



Fonte: Autor (2021).

Figura 9 5 -Comparação gráfica entre os métodos de determinação de umidade nas áreas de saneamento (APHA) e geotecnia (NBR): etapas de gerenciamento e tratamento do lodo.

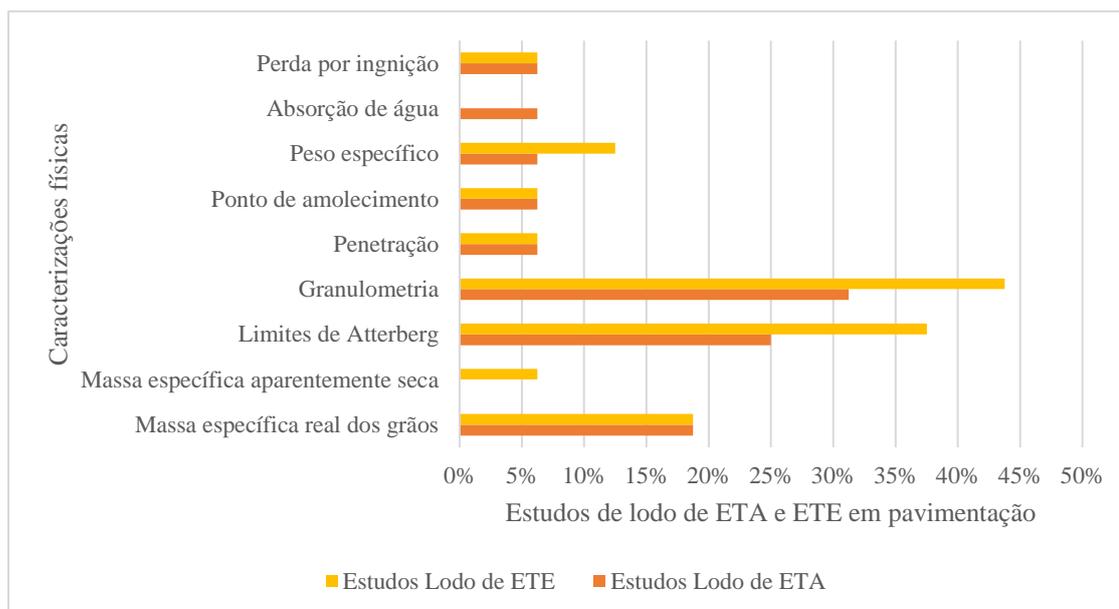


Fonte: Autor (2021).

Como pode-se observar pela Figura 9.4, este modelo expressa a umidade do saneamento em relação ao teor de umidade da geotecnia, ao atribuir valores conforme o gráfico. Segundo que para a área de saneamento, o teor de sólidos totais (ST) do lodo bruto varia entre 1 e 5%, ou seja, 99 a 95% de umidade. Se considerarmos um valor médio de 2% de ST, que representa 98% de teor de umidade, para o método de determinação da geotecnia este valor de umidade seria 4000%. Analogamente, o lodo após passar por um sistema de desaguamento (lodo desaguado) pode apresentar 25% de ST ou 75% de umidade para o saneamento, enquanto para geotecnia este valor de umidade seria 300%. Outros exemplos que podem ser observados na Figura 9.5, um lodo com umidade na faixa de 50% para o saneamento, corresponde a 100% de umidade para geotecnia; um lodo com 33,3% segundo o saneamento, para a geotecnia este mesmo lodo possuiria 50% de umidade. Considerando o lodo que passa por um sistema de secagem (lodo seco ou “torta” de lodo) as diferenças começam a não ser tão significantes em termos de determinação de umidade, ou seja, para o saneamento um lodo seco que teria, por exemplo, 17% de umidade (ou 93% de ST), para o método de determinação da geotecnia este mesmo lodo teria 20% de umidade. Sendo assim, escalas distintas que, de certa forma, dependem do método escolhido para determinação do teor de umidade do lodo, devem ser interpretadas considerando o contexto e método empregado, principalmente em pesquisas com intuito de aplicação deste resíduo sólido em pavimentação, que por ser interdisciplinar, requer atenção ao significado dos valores que cada área apresenta para o lodo, sendo fundamental para a assertividade na análise dos resultados. O teor de umidade (ou sólidos totais) do lodo é um parâmetro muito utilizado como indicador de eficiência e nível de tratamento do lodo, que consiste basicamente na redução de volume ou remoção de água (redução do teor de umidade).

Na Figura 9.6 tem-se o gráfico com os percentuais de estudos que utilizaram cada tipo de caracterização física dentre os estudos levantados. No eixo das abcissas tem-se os percentuais de estudos levantados pela RBS que realizaram os ensaios de caracterização física apresentados no eixo das ordenadas.

Figura 9.6 -Ensaio de caracterização física realizados nos estudos de lodo de ETA e ETE.



Fonte: Autor (2021)

Como pode-se observar na Figura 9.6, 31% dos estudos realizados com lodos de ETA caracterizaram granulometricamente o lodo, 25% produziram ensaios de limites de Atterberg e 19% obtiveram a massa específica dos grãos, para os demais ensaios 6% dos estudos levantados realizaram os testes.

No caso do lodo de ETE a maior parcela também realizou o ensaio de granulometria, sendo 44% do total, enquanto 38% obtiveram os dados de limites de Atterberg, 19% para massa específica dos grãos, 13% avaliaram o peso específico e os demais ensaios 6% dos estudos optaram por reproduzi-los.

Pode-se dizer a maioria dos estudos tanto para lodo de ETA quanto lodo de ETE optou-se por realizar ensaios de granulometria, limites de Atterberg e massa específica real dos grãos, testes estes recomendados pelo manual de pavimentação do DNIT (2006).

Nos Quadros 1.9 e 2.1, realizou-se a compilação dos estudos encontrados pela RBS na questão de ensaios de caracterização mecânica, reproduzidos com o intuito do uso benéfico em pavimentação.

Quadro 1.9 -Caracterização mecânica proposta pelos estudos de lodo de ETE em pavimentação (2012 a 2020).

PUBLICAÇÕES				
LODO DE ETE				
nº	AUTORES	Ano	LOCAL	Ensaio de caracterização mecânica
1	Tamile Antunes Kelm, Laura Maria Goretti da Motta, Mariluce de Oliveira Ubaldo.	2014	Rio de Janeiro - RJ (ETE do Caju)	Compactação, modulo de resiliência e deformação permanente
2	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso,Manoel G. Portela.	2012	Recife-PE (ETE Cabanga)	Compactação, modulo de resiliência e CBR.
3	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso,Manoel G. Portela.	2014	Recife-PE (ETE Cabanga)	Compactação, modulo de resiliência, resistência a compressão simples e CBR.
4	Kiev Luiz Pereira	2012	Natal-RN (Empresa limpa fossa - lagoa de estabilização anaeróbia)	Compactação, resistência a compressão simples e CBR.
5	J.G Bastidas-Martínez, J.Camapum de Carvalho, L.C Lucena, M.M.Farias, H.A Rondón-Quintana.	2020	ETE de Brasília-DF	Tensão por compressão diametral, Teste Marshall e módulo de resiliência.
6	Kaling Taki, Saurabh Choudhary, Sharad Gupta,Manish Kumar	2019	Gandhinagar - Índia (ETE Jaspur)	Teste Marshall, Tensão por compressão diametral.
7	Deng-Fong Lin, Huan-Lin Luo, Darn-Horng Hsiao,Chien- Ta Chen, Ming-Du Cai.	2016	Tawain (ETE não identificada)	Compactação, compressão simples e CBR.
8	Hamza Güllü e Halil İbrahim Fedakar	2016	Turquia (ETE Gaziantep)	CBR.
9	Yuan Zhang, Zhen Leng, Fuliao Zou, Lei Wang, Season S. Chen, Daniel C.W. Tsang	2017	Tuen Mun -Hong Kong (ETE T-Park)	Teste Marshall.

Fonte: Autor (2021).

Quadro 2.1 - Caracterização mecânica proposta pelos estudos de lodo de ETA em pavimentação (2012 a 2020).

PUBLICAÇÕES				
LODO DE ETA				
nº	AUTORES	Ano	LOCAL	Ensaio de caracterização mecânica
1	Rodrigo Vaz Coelho; Fernando Shigueu Tahira; Fernando Fernandes; Heliana Barbosa Fontenele; Raquel Souza Teixeira	2015	Londrina-PR (ETA Cafezal)	Compactação, resistência a compressão simples, CBR e expansão.
2	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela	2012	Igarassu-PE (ETA Botafogo)	Compactação, módulo de resiliência e CBR.
3	Jessica Vannesa Colmenares Delgado	2016	Nova Iguaçu-RJ (ETA Guandu)	Compactação e módulo de resiliência.
4	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela	2014	Igarassu-PE (ETA Botafogo)	Compactação, módulo de resiliência, resistência a compressão simples e CBR.
5	J.G Bastidas-Martínez, J.Camapum de Carvalho, L.C Lucena, M.M.Farias, H.A Rondón-Quintana.	2020	ETA de Brasília-DF	Tensão por compressão diametral, Teste Marshall e módulo de resiliência.
6	Sahar A. Ali Dawood, Hayder Abbas Obaid, Tameem Mohammed Hashim e Hadeel Kareem Jasim	2019	Iraque (ETA Al Hilla)	Teste Marshall, Tensão por compressão diametral.
7	Yue Liu, Yan Zhuge, Christopher W.K. Chow, Alexandra Keegan, Danda Li, Phuong Ngoc Pham, Jianyin Huang, Rafat Siddique.	2020	Austrália (ETA Happy Valley)	Resistência a abrasão e Compressão simples.

Fonte: Autor (2021).

Como pode-se observar pelos Quadros 1.9 e 2.1, que apresentam os ensaios propostos para caracterização mecânica dos estudos levantados para uso de lodo de ETA e ETE em pavimentação, há uma diversidade quanto as escolhas para cada pesquisa. Conforme mencionado anteriormente pelo manual do DNIT (2006), seu estudo geotécnico preconiza a realização de ensaios mecânicos de compactação, Índice de Suporte Califórnia (CBR) e expansão, no caso de solos lateríticos, para utilização na construção das diversas camadas do pavimento, de acordo com seu projeto. Portanto,

pesquisas que utilizaram desses ensaios de caracterização mecânica no Brasil, como ferramenta de análise das misturas, estão compatíveis com as recomendações do manual do DNIT.

No âmbito de publicações com o lodo de ETE, no Quadro 1.9, o autor nº1 propôs a estabilização de materiais para pavimentação com o resíduo em diferentes estados, in natura, seco e calcinado, misturado com um solo não laterítico silto-arenoso (NS') e pó de pedra. Para isso, realizou-se ensaios de compactação, módulo de resiliência e deformação permanente, verifica-se, portanto, a ausência do CBR e expansão. A deformação permanente, é um parâmetro de relevância em situações de reforço estrutural, quando o pavimento em questão sofre um processo acelerado de degradação, com fadiga intensa e deformação permanente elevada.

O uso do módulo de resiliência foi verificado como necessário a partir da década de 70 no Brasil, pois observou-se que uma boa parcela da malha rodoviária apresentava uma deterioração prematura, que estava relacionada à fadiga dos materiais gerada pela contínua solicitação dinâmica do tráfego atuante. (DNIT, 2006). Vê se, portanto, o uso desta análise pelos autores nº1,2,3 e 5 no Quadro 1.9 e os autores nº2, nº3, nº4 e nº5 no Quadro 2.1.

Os autores nº 3, nº4 e nº7 no Quadro 1.9 e os autores nº1, nº4 e nº7 no Quadro 2.1, propuseram a análise de resistência a compressão simples, devido a mistura de solo com lodo de ETE e ETA possuir estabilizantes como o cimento, cal e emulsão asfáltica, onde julgou-se necessário à validação das resistências a compressão dos corpos de prova após 7 e 28 dias de idade de cura seca e úmida.

O autor nº 3 do Quadro 2.1, utilizou um total de sete misturas, como pó de pedra, solo arenoso, solo argiloso e aditivado com cimento ou não, de acordo com a porcentagem de lodo usado, visando o uso em sub-base, para isso realizou ensaios de compactação e módulo de resiliência, onde pode-se observar a ausência do ensaio de CBR para os materiais.

Os autores nº5 e nº6 do Quadro 1.9 e nº5 e nº6 do Quadro 2.1, utilizaram a análise de tensão por compressão diametral, por se tratar de aplicações em emulsão asfáltica, exceto o autor nº 6 do Quadro 1.9, pois este ensaio é considerado uma propriedade importante para determinar o desempenho para aplicação na camada de revestimento asfáltico de um pavimento, no que se refere a ensaios futuros de fadiga em situações de ciclos de cargas de tensão constante, reduzindo a resistência do material, ao qual não foram constatadas o ensaio de fadiga neste estudo levantado .

No Quadro 1.9, os autores nº5, nº6 e nº9, no Quadro 2.1, os autores nº5 e nº6, utilizaram o teste Marshall, para avaliarem o desempenho do lodo aplicado na emulsão asfáltica. Este ensaio faz-se importante, pois é indispensável na determinação do teor adequado de asfalto para garantir a resistência e conseqüentemente, durabilidade ao revestimento, conforme citado no item 3.7.13.

Sendo assim, avaliando os ensaios de caracterização mecânica utilizados nos estudo levantados, observa-se uma ausência de padrão de escolha, dentro do mesmo propósito de uso, seja para aplicação em camadas de base e sub-base, como em revestimentos a base de emulsão asfáltica no pavimento ou em BCP, porém sabe-se que para validação do uso do lodo seja de ETA ou ETE em pavimentação, é

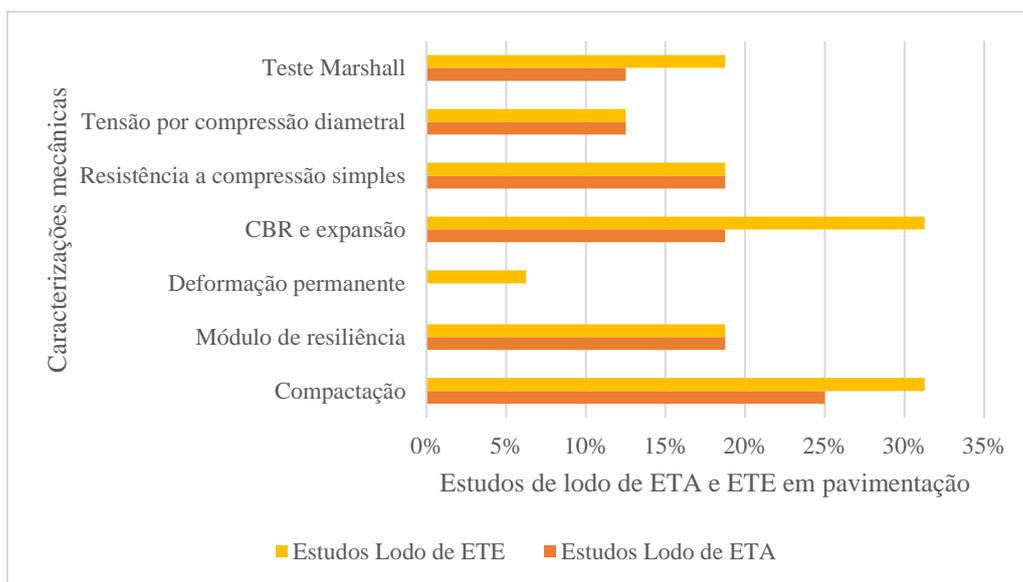
imprescindível submeter no mínimo a todos os ensaios recomendados pelo manual de pavimentação do DNIT (2006), caso seja desejado utilizar este resíduo sólido nos pavimentos brasileiros.

Para os casos de países distintos ao Brasil (autores nº6,7,8 e 9 para lodo de ETE e nº6 e 7 para lodo de ETA), vê-se em comum o uso do ensaio de CBR para aplicações em camadas de base e sub-base e teste Marshall para aplicações em revestimentos asfálticos, além do teste de compressão simples para o estudo de uso em BCP.

Apesar destes ensaios em comum, para estes autores internacionais observa-se uma distinção nos demais ensaios adotados, não encontrando um critério, seja por um órgão regulamentador ou decreto do país de estudo do lodo, para que se determine um padrão de escolha em função do uso e destinação deste resíduo sólido no pavimento. Exceto o autor nº7 do Quadro 1.9, que teve como parâmetros mecânicos para uso em pavimentação, os regulamentos do Padrão de Construção de Taiwan.

Na Figura 9.7 tem-se a compilação em percentuais dos estudos levantados em função dos ensaios realizados para caracterização do lodo de ETE e ETA em pavimentação. No eixo das abcissas, tem-se os percentuais de estudos que realizaram as caracterizações mecânicas apresentadas no eixo das ordenadas, separados entre trabalhos para lodo de ETA e ETE.

Figura 9.7 -Ensaio de caracterização mecânica realizados para uso do lodo de ETA e ETE em pavimentação nos estudos levantados.



Fonte: Autor (2021).

Observando a Figura 9.7, pode-se avaliar que para o lodo de ETA 25% dos estudos realizaram ensaios de compactação, nos demais ensaios, exceto o Teste Marshall e Tensão por compressão diametral com 13%, cada análise teve 19% do total de estudos executando os testes de MR, CBR e RCS.

Para o lodo de ETE 31% dos estudos obtiveram dados relacionados a compactação e CBR, 19% para MR, RCS e teste Marshall, 13% realizando o ensaio de tensão por compressão diametral e 6% em deformação permanente.

Deste modo, pode-se afirmar que os maiores percentuais são em ensaios de compactação, CBR, MR e RCS, que são pertinentes, pois a recomendação segundo o manual de pavimentação do DNIT (2006) é justamente a avaliação dos parâmetros de CBR e compactação do solo, o MR como dito anteriormente, é um ensaio importante apesar de não ser especificado no manual, pois avalia a resistência ao carregamento cíclico, em situações de fadiga do material.

Os Quadros 2.2 e 2.3 apresentam os ensaios realizados a título de caracterização química, realizados nos estudos encontrados com a proposta do uso benéfico no pavimento.

Quadro 2.2 -Caracterização química proposta pelos estudos de lodo de ETE em pavimentação (2012 a 2020).

PUBLICAÇÕES				
LODO DE ETE				
nº	AUTORES	Ano	LOCAL	Ensaio de caracterização química
1	Tamile Antunes Kelm, Laura Maria Goretti da Motta, Mariluce de Oliveira Ubaldo.	2014	Rio de Janeiro - RJ (ETE do Caju)	Teor de matéria orgânica, DTA*, TGA*, FRX*, DRX*.
2	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela.	2012	Recife-PE (ETE Cabanga)	DTA*, TGA*, FRX*, DRX*, lixiviação e solubilização.
3	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela.	2014	Recife-PE (ETE Cabanga)	Idem Lucena et al., (2012).
4	Kiev Luiz Pereira	2012	Natal-RN (Empresa limpa fossa - lagoa de estabilização anaeróbia)	FRX* e DRX*.
5	J.G Bastidas-Martínez, J.Camapum de Carvalho, L.C Lucena, M.M.Farias, H.A Rondón-Quintana.	2020	ETE de Brasília-DF	FRX*.
6	Kaling Taki, Saurabh Choudhary, Sharad Gupta, Manish Kumar	2019	Gandhinagar - Índia (ETE Jaspur)	Teor de matéria orgânica, pH, DRX* e TGA*
7	Deng-Fong Lin, Huan-Lin Luo, Darn-Horng Hsiao, Chien-Ta Chen, Ming-Du Cai.	2016	Tawain (ETE não identificada)	DRX*.
8	Hamza Güllü e Halil İbrahim Fedakar	2016	Turquia (ETE Gaziantep)	FRX*.

9 Yuan Zhang, Zhen Leng, Fuliou Zou, Lei Wang, Season S. Chen, Daniel C.W. Tsang 2017 Tuen Mun -Hong Kong (ETE T-Park) FRX*, DRX*, DTA*, TGA*

*Notas: -DTA = Análise Termodiferencial / TGA = Análise Termogravimétrica / FRX = Espectrofotometria por fluorescência de raios-x / DRX = difração de raios-x.

Fonte: Autor (2021).

Quadro 2.3 - Caracterização química proposta pelos estudos de lodo de ETA em pavimentação (2012 a 2020).

PUBLICAÇÕES				
LODO DE ETA				
nº	AUTORES	Ano	LOCAL	Ensaio de caracterização química
1	Rodrigo Vaz Coelho; Fernando Shigueu Tahira; Fernando Fernandes; Heliana Barbosa Fontenele; Raquel Souza Teixeira	2015	Londrina-PR (ETA Cafezal)	ND*
2	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela	2012	Igarassu-PE (ETA Botafogo)	DTA*, TGA*, FRX *, DRX*.
3	Jessica Vannesa Colmenares Delgado	2016	Nova Iguaçu-RJ (ETA Guandu)	Teor de matéria orgânica, FRX*, DRX.
4	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela	2014	Igarassu-PE (ETA Botafogo)	Idem Lucena et al., (2012).
5	J.G Bastidas-Martínez, J.Camapum de Carvalho, L.C Lucena, M.M.Farias, H.A Rondón-Quintana.	2020	ETA de Brasília-DF	FRX*.
6	Sahar A. Ali Dawood, Hayder Abbas Obaid, Tameem Mohammed Hashim e Hadeel Kareem Jasim	2019	Iraque (ETA Al Hilla)	FRX*.
7	Yue Liu, Yan Zhuge, Christopher W.K. Chow, Alexandra Keegan, Danda Li, Phuong Ngoc Pham, Jianyin Huang, Rafat Siddique.	2020	Austrália (ETA Happy Valley)	FRX*, DRX* .

*Notas: -ND =Não disponibilizado. No artigo não foi apresentada ou especificada esta informação/DTA = Análise Termodiferencial / TGA = Análise Termogravimétrica / FRX = Espectrofotometria por fluorescência de raios-x / DRX = difração de raios-x.

Fonte: Autor (2021).

O ensaio de teor de matéria orgânica para o solo é feito de acordo com a norma DNER-ME 055/95 do DNIT, onde avalia por meio de uma solução química padrão de hidróxido de sódio, comparado a uma solução com 200 g da amostra seca ao ar e 100 ml de hidróxido de sódio, a alteração de sua coloração, se está mais clara, escura ou igual a solução padrão. Para a análise do teor de matéria orgânica do lodo, o estudo realizado pelo autor nº6 do Quadro 2.2, optou por utilizar o método de solos segundo a NBR 13.600/1996, através da queima da amostra a 440°C por mufla e secagem em estufa entre 105 a 110°C, onde a perda de massa entre esses dois processos, indicam a parcela de matéria orgânica da amostra.

Há uma dificuldade, quanto a observação cromática no caso do método de ensaio de matéria orgânica do DNIT, pois o resultado do teste fica à mercê do grau de assertividade do observador, quanto a percepção de cor do meio básico a qual o solo ou lodo é submetido, sujeitando-se assim numa possível falha na análise, pois trata-se de um procedimento qualitativo, ao contrário do método disposto pela NBR, que é quantitativo em relação ao teor de matéria orgânica.

A preparação de amostras de lodo de ETA e ETE para lixiviação e solubilização são de suma importância, pois segundo Reis et al., (2007), há tempos o destino dos resíduos de ETA são os cursos d'água próximos das estações, atribuindo a eles, uma alta carga poluidora. De acordo com Achon et al., (2013), devido aos efeitos causados ao ambiente aquático do corpo receptor e danos a fauna aquática, o lançamento dos resíduos gerados em ETA's, em corpos d'água, pode ser considerado crime ambiental, de acordo com a Lei 9.605/98. De maneira análoga, o lodo de ETE, também é considerado, conforme a Lei nº12305/2010 um resíduo sólido, que deve ser destinado ou utilizado de forma ambientalmente adequada.

De acordo com Denari et, al. (2012), a Análise Termogravimétrica (TGA), pode ser definida como uma análise termo analítica que acompanha a variação de massa da amostra, em função da programação de temperatura. Ou seja, acompanha a perda e/ou ganho de massa da amostra em função do tempo ou temperatura. A Termogravimetria Derivada (DTG), nada mais é que uma apresentação matemática, onde a derivada da variação de massa em relação ao tempo (dm/dt) é registrada em função da temperatura ou tempo. Ou seja, a DTG é a derivada primeira da TGA.

A respeito desses processos de análise térmica, a compreensão das propriedades térmicas pode contribuir com a melhoria de processos de moldagem, transporte, conservação assim como proporcionar uma evolução nas aplicações de determinados compostos e materiais, no exemplo de decomposição, é

útil conhecer quais os produtos voláteis e os resíduos gerados, em relação à sua ação biológica ou ambiental. (DENARI ET AL., 2012).

Segundo Delgado (2016), a análise de Difração de Raios-x (DRX) tem como função a identificação da composição mineralógica dos materiais. É uma técnica de caracterização de estruturas cristalinas bastante difundida e amplamente utilizada. (FILHO E LOPES, 2013). Ao incidir um feixe de raios X num cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, surgindo o fenômeno de difração.

Por se tratar de um ensaio de reconhecimento de compostos minerais, ao se misturar o lodo em porções de solo como substituto parcial de um determinado material, seja um aditivo estabilizante ou o próprio agregado, é relevante saber as possíveis similaridades químicas que este resíduo tem comparado ao material substituído, e o que estas concentrações de minerais interferem, de maneira positiva ou negativa, no comportamento físico, químico e conseqüentemente mecânico, do pavimento em questão.

De acordo com Melo Júnior apud Santos (2013), o ensaio de Espectrofotometria por Fluorescência de Raios-X (FRX), baseia-se na medição das intensidades dos raios-x característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra, quando excitada por partículas como elétrons, prótons ou íons produzidos por aceleradores de partículas ou ondas eletromagnéticas, além do processo mais comumente utilizado que é por meio de tubos de raios-x. Essa análise determina principalmente os possíveis óxidos existentes na amostra, além de ser possível determinar a quantidade de elementos químicos identificados pela intensidade dessa radiação.

De maneira análoga ao ensaio de DRX, o ensaio de FRX tem sua importância, pois ao averiguar a concentração de óxidos no lodo e outros elementos químicos, este procedimento auxilia na identificação de insumos utilizados no tratamento nas ETA's e ETE's, como o caso de coagulantes como o sulfato de alumínio, que dependendo de sua concentração, interfere diretamente no desempenho mecânico do pavimento ao ser misturado para o uso.

Analisando os Quadros 2.2 e 2.3, pode-se observar que os estudos levantados possuem uma similaridade quanto ao uso dos ensaios de caracterização química. Apenas o autor nº 1 do Quadro 2.3, não utilizou de nenhuma dessas ferramentas de análise, para conhecer os materiais utilizados em sua pesquisa, sob o ponto de vista de sua composição química e perda de massa dos compostos por calor.

No uso de lodo de ETE, o autor nº 3 do Quadro 2.2, avaliou os compostos químicos por meio dos ensaios de lixiviação e solubilização, porém nota-se a ausência de análises de perda de massa por calor, como TGA e DTA, ensaios de DRX e FRX, além da verificação de teor de matéria orgânica.

Autores nº 5 e 8 do Quadro 2.2 e nº 5 e 6 do Quadro 2.3, utilizaram apenas o ensaio de FRX para caracterização química, carecendo do envolvimento dos demais parâmetros químicos de caracterização, já citados anteriormente, para avaliar o impacto da composição química do lodo na mistura.

Por tratar-se de uma pesquisa conseqüente dos estudos realizados pelos mesmos autores em 2012, as pesquisas nº3 e 5 do Quadro 2.2 e nº 3 e 4 do Quadro 2.3, avaliaram a lixiviação e solubilização das misturas, além do ensaio de FRX, pelo fato de realizarem uma nova coleta de lodo na ETE e ETA

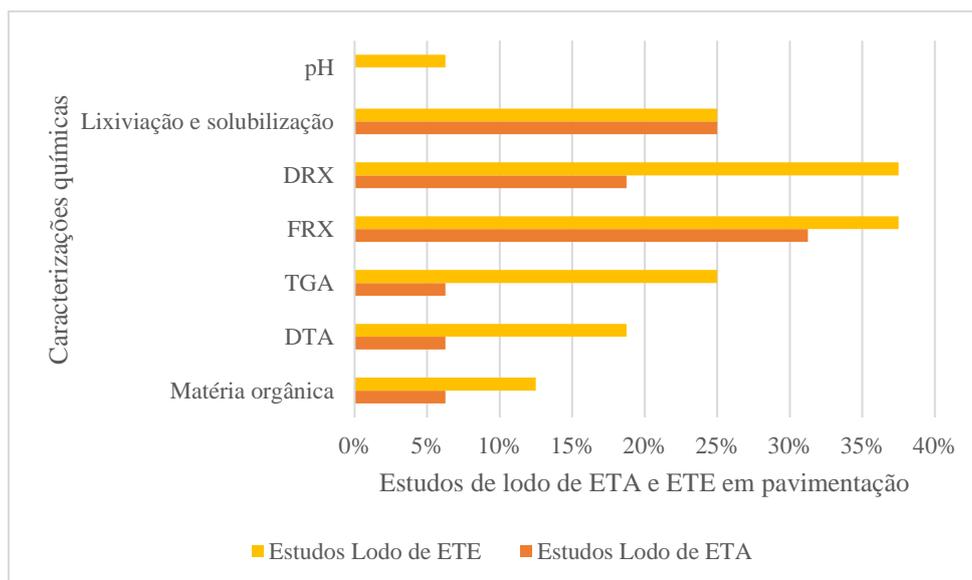
nas mesmas estações de tratamento anteriores. Porém, sabe-se que o lodo tanto de ETA quanto de ETE, possui características químicas diferentes entre períodos distintos do ano, sendo assim, a análise novamente dos parâmetros de DRX, TGA e DTA são de importância fundamental, para comprovar esta afirmação, onde a variação das concentrações químicas dos lodos ao longo dos meses, são ou não um fator preponderante ao se utilizar este resíduo no pavimento.

Para os estudos com lodo de ETA, o autor nº 3 do Quadro 2.3, optou por não realizar os ensaios de TGA e/ou DTA, pela razão de ser proposta o uso do resíduo in natura, visando evitar gastos energéticos e viabilizar seu emprego.

Ao avaliar os quadros de caracterização físico, mecânico e químico, pode-se afirmar que não há um padrão definido ou algum tipo de regulamento ou decreto, seja em situações no Brasil ou nos demais países levantados, quanto a definição de quais ensaios e parâmetros são relevantes ao se determinar o uso do lodo de ETA ou ETE na área de pavimentação. Uma das razões que podem ser levantadas é em função do cenário ainda recente de propostas de uso e destinação deste resíduo sólido na geotecnia, conseqüente principalmente no caso brasileiro da Lei nº 12305/2010 que deu tração ao movimento de pesquisas no cenário nacional, para tentar solucionar essa problemática de uso e destinação ambientalmente adequados. Outra hipótese relevante, seria também a insegurança ainda existente quanto ao risco ambiental, a longo prazo, do uso deste lodo no solo, pois não se conhece em situação de utilização de uma via, as conseqüências a um possível lençol freático em contato com este material, podendo ocasionar sua possível contaminação. Estudos como o de Lucena et al., (2017) estão na vanguarda deste tema, ainda pouco explorado em sua totalidade, mas que assim como os demais trabalhos levantados, onde realizou-se ensaios de lixiviação e solubilização, mostram indícios de uma segurança quanto a poluição ambiental, ao classifica-los como um resíduo Classe II – inerte, não perigoso segundo a norma brasileira, quando em mistura com outro material (solo, por exemplo).

Na Figura 9.8 é apresentada uma síntese em dados percentuais dos ensaios de caracterização química realizados nos estudos encontrados para lodo de ETA e ETE. No eixo das abcissas tem-se os percentuais de estudos que realizaram as caracterizações químicas apresentadas no eixo das ordenadas, separados entre trabalhos para lodo de ETA e ETE.

Figura 9.8 -Ensaaios de caracterização química realizados nos estudos com lodos de ETA e ETE em pavimentação.



Fonte: Autor (2021).

Analisando a Figura 9.8, pode-se verificar que para o lodo de ETA 31% dos estudos realizaram os ensaios de FRX, 25% lixiviação e solubilização, 16% DRX e os demais ensaios com 6% do total de estudos foram realizados.

No caso do lodo de ETE, 38% dos estudos produziram dados nos ensaios de FRX e DRX, 25% TGA e lixiviação e solubilização, 19% DTA, 13% matéria orgânica e 6% para pH.

Vê-se assim que os estudos para lodo de ETA deram uma atenção maior a análise de FRX e DRX, enquanto que para o lodo de ETE, também em sua maioria de estudos, priorizaram os ensaios de FRX e DRX, seguidos dos testes de TGA, lixiviação e solubilização. Deste modo, levanta-se a hipótese de uma maior preocupação nos estudos de lodo de ETE em avaliar a perda de massa em função da temperatura (TGA) e o impacto ambiental deste resíduo sólido (lixiviação e solubilização) para o lodo de ETA e ETE, além do intuito de se conhecer os óxidos e minerais presentes em ambos os lodos de ETA e ETE, com os ensaios de FRX e DRX, respectivamente.

5.3.2. AVALIAÇÃO DA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA USO DE LODO DE ETA E ETE EM PAVIMENTAÇÃO

O preparo das amostras para emprego em misturas seja com o solo, concreto ou emulsão asfáltica em pavimentação, requer uma análise sistêmica do maior número possível de variáveis que irão impactar, de forma negativa ou positiva, em sua viabilidade, seja ela técnica, econômica ou ambiental, procurando alinhar-se com os parâmetros de qualidade estabelecidos pelos órgãos

regulamentadores rodoviários da localidade em questão, com sua legislação ambiental, assim como, se possível, um projeto piloto em escala real que viabilize essas variáveis com o aspecto econômico de um modelo de negócio.

Dos trabalhos encontrados, há em seus procedimentos o método empregado de uso do resíduo no pavimento, assim como as possíveis razões de escolha deste modo de aplicação do lodo, esses fatores são explanados a partir do mapeamento apresentados nos Quadros 2.4 e 2.5.

Quadro 2.4 -Formas de preparo da amostra de lodos de ETA em pavimentação.

PUBLICAÇÕES				
LODO DE ETA				
nº	AUTORES	Ano	LOCAL	Tipo de lodo
1	Rodrigo Vaz Coelho; Fernando Shigueu Tahira; Fernando Fernandes; Heliana Barbosa Fontenele; Raquel Souza Teixeira	2015	Londrina-PR (ETA Cafezal)	Seco ao ar
2	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela	2012	Igarassu-PE (ETA Botafogo)	Seco ao ar
3	Jessica Vannesa Colmenares Delgado	2016	Nova Iguaçu-RJ (ETA Guandu)	In natura
4	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela	2014	Igarassu-PE (ETA Botafogo)	Seco ao ar
5	J.G Bastidas-Martínez, J.Camapum de Carvalho, L.C Lucena, M.M.Farias, H.A Rondón-Quintana.	2020	ETA de Brasília-DF	Calcinado a 200,300,500 e 800°C por 45 minutos
6	Sahar A. Ali Dawood, Hayder Abbas Obaid, Tameem Mohammed Hashim e Hadeel Kareem Jasim	2019	Iraque (ETA Al Hilla)	Seco em estufa 105°C por 24 h

7	Yue Liu, Yan Zhuge, Christopher W.K. Chow, Alexandra Keegan, Danda Li, Phuong Ngoc Pham, Jianyin Huang, Rafat Siddique.	2020	Austrália (ETA Happy Valley)	Seco em estufa 105°C por 24 h
---	---	------	------------------------------	-------------------------------

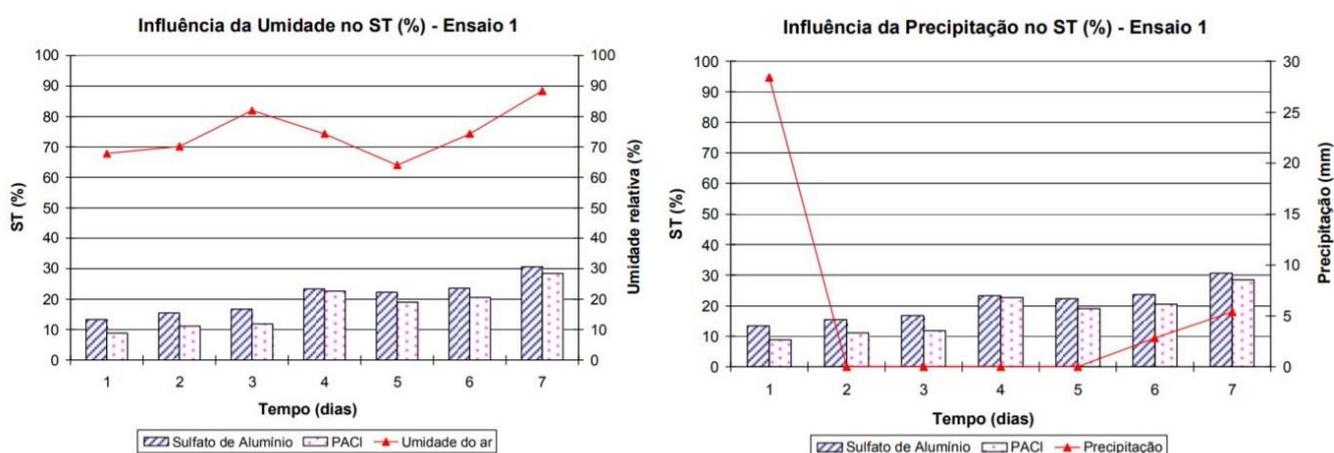
Fonte: Autor (2021).

Analisando o Quadro 2.4, o autor nº1 em seu trabalho realizou-se o desaguamento do lodo de ETA em leitos de drenagem com manta geotêxtil. Após o processo, o lodo foi seco ao ar até a umidade higroscópica, ou seja, até o equilíbrio com a umidade ambiente em forma de grãos ou torrões resistentes ao destorroamento com a mão de gral e almofariz, a qual não foi informada a umidade relativa do ar momento em que o lodo secava.

De forma análoga, os autores nº2 e nº4 também utilizaram o lodo seco ao ar com umidade na ordem de 53%, após os processos de desaguamento em leitos de drenagem, há o relato do autor nº2 que o período de coleta na época de chuvas na região da ETA, contribuiu para o aumento nos teores de lodo e conseqüentemente de sulfato de alumínio, alterando a turbidez e cor da amostra.

É importante ressaltar os impactos que a secagem ao ar estão suscetíveis durante o processo decorrente de variáveis climáticas, Barroso (2007), em seu estudo das micro e macro propriedades do lodo de ETA apresentam alguns desses parâmetros relevantes, elucidados em seu ensaio de nº1 como exemplo, que são a precipitação e a umidade relativa do ar na Figura 9.9, a insolação e a evaporação na Figura 10.1, o vento e a temperatura do ar na Figura 10.2, respectivamente.

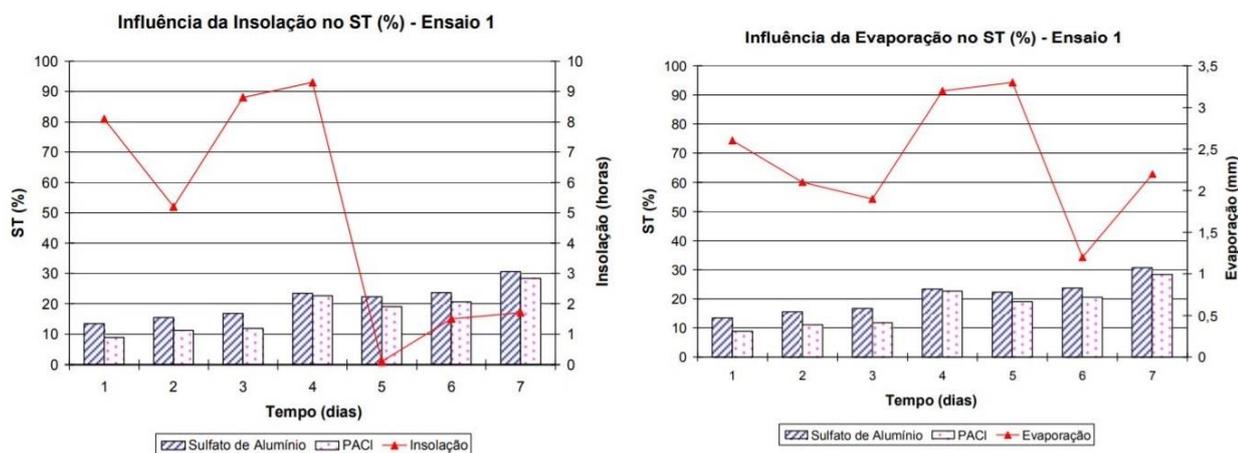
Figura 9.9 -Influência da umidade relativa do ar e da precipitação na secagem do lodo ao ar.



Fonte: Barroso (2007).

Ao avaliar a Figura 9.9, a variável de precipitação não exerceu impacto importante na evolução da secagem ao ar, pois a água da chuva não se manteve incorporado a massa do lodo. De acordo com Barroso (2007), a ocorrência da precipitação no dia inicial da secagem, antes a “abertura” da massa de lodo prejudica fortemente a secagem do lodo, porém a umidade relativa do ar decorrente da chuva pode ter influenciado a secagem do lodo desaguado, sendo a umidade um parâmetro determinante na evolução e velocidade de secagem, pois é significativo durante o equilíbrio da relação pressão de vapor da água do sistema lodo-ar.

Figura 10.1 -Influência da insolação e da evaporação na secagem do lodo ao ar.

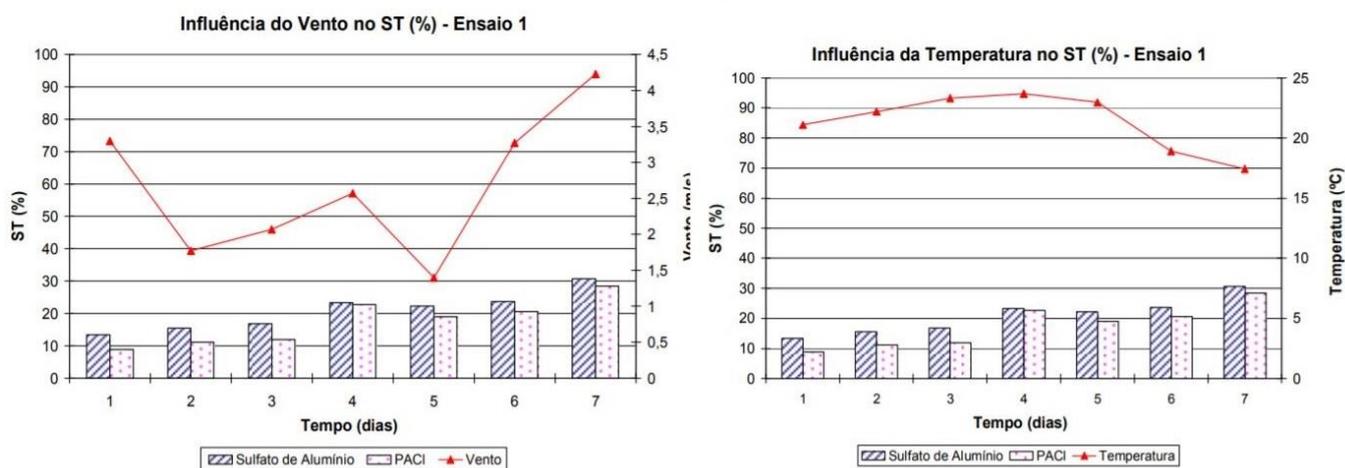


Fonte: Barroso (2007).

Observa-se na Figura 10.1 que a insolação reduziu bruscamente a partir do quarto dia e foi acompanhada da estabilização dos valores de sólidos totais ST para o lodo de ETA estudado por Barroso (2007), sendo assim, os valores relacionados a insolação demonstraram decisivos para a velocidade de secagem, e desta forma, no desempenho do leito de drenagem. Pode-se assim afirmar que a variável insolação possui relação proporcional direta com a variação dos ST nas amostras dos lodos desaguados em leito de drenagem de seu estudo.

Ainda na Figura 10.1, ao avaliar o parâmetro de evaporação pode-se inferir, de acordo com Barroso (2007), que é uma forma direta de indicar ou representar o fluxo de umidade perdida do lodo, ao contrário de uma variável determinante na secagem do lodo.

Figura 10.2 -Influência do vento e da temperatura na secagem do lodo ao ar.



Fonte: Barroso (2007).

Segundo Barroso (2007), conforme a Figura 10.2, a ação do vento é causadora da movimentação do fluxo de umidade, em outras palavras, a troca de umidade imediatamente superior a massa de lodo, e sua curva gerada pela variação diária da velocidade de vento se iguala a curva de evaporação. No caso da temperatura do ar, pode ser considerada importante nos mecanismos de fluxo de massa de umidade e transmissão de energia para massa de lodo e mostrou-se em seu estudo, que esse parâmetro é potencialmente favorável a secagem.

Sendo assim, pode-se afirmar que os estudos levantados que optaram pela secagem do lodo de ETA ao ar e não avaliaram todas estas variáveis climáticas apresentadas por Barroso (2007), incorrem em risco de não observarem de forma abrangente a real forma de preparo do lodo ao secar este material em meio ambiente.

O autor nº3 do Quadro 2.3, escolheu utilizar o lodo de ETA em sua forma natural, ou seja, bruta, com umidade de 94%, que segundo o autor, foi proposta com o objetivo de evitar gastos energéticos e viabilizar posteriormente seu emprego, após sua validação técnica neste trabalho. Embora a umidade do lodo seja aparentemente alta, para o autor nº3, ela não apresentou quantidade de água visível para as misturas, devido este valor de umidade ser atribuído por conta da água intersticial e vicinal do lodo, porém foi considerado no momento de calcular os valores dos ensaios realizados como água de mistura.

O ganho neste estudo do autor nº3, ao viabilizar tecnicamente e ambientalmente seu emprego em pavimentação, certamente é o futuro estudo de viabilidade econômica ao reduzir o impacto energético com o emprego do lodo in natura, por outro lado, perde-se a vantagem das possíveis reações pozolânicas que este material poderia oferecer numa mistura, ao calcina-lo e aplicar suas cinzas no pavimento, substituindo uma parcela de aditivo cimentício por exemplo.

O autor de nº5 utilizou o lodo de ETA calcinado em temperaturas de 200,300,500 e 800°C por 45 minutos, adicionando-se em 1% como filler alternativo em emulsão asfáltica a quente para camadas de revestimento em pavimentação.

De acordo com o autor nº5, as variações nas temperaturas foram avaliadas com o intuito de conhecer a melhor temperatura de calcinação do lodo nas propriedades de penetração e ponto de amolecimento, onde a temperatura de 0°C nas análises correspondiam a condição de seco ao ar. Dentre estas temperaturas, a calcinação do lodo a 500°C foi a temperatura que apresentou melhor rigidez (baixa penetração e alto ponto de amolecimento), conseqüentemente, segundo o autor nº5, esta temperatura foi escolhida na produção dos fillers para adicionar a mistura asfáltica.

Como anteriormente citado, o processo de calcinação do lodo foram avaliados por diversas pesquisas como benéfica do ponto de vista mecânico, devido a suas reações pozolânicas que ocorrem no material calcinado, porém há de se avaliar também um fator relevante, que é a viabilidade econômica do emprego deste lodo em escala real, pois temperaturas elevadas (como neste caso 500°C), requer equipamentos mecânicos, como secadores, que podem demandar alto valor energético, imputando possíveis custos desfavoráveis a esta prática de reuso, inviabilizando assim possivelmente seu uso na mistura proposta. Sendo assim é fundamental estudos futuros que compreendam a viabilidade econômica do processo de calcinação do lodo, para que se rompa esta possível trava mercadológica que ainda perdura nos dias atuais.

O autor nº6, optou-se por utilizar o lodo seco a 105°C por 24 horas em revestimento asfáltico, seguindo os padrões normativos da ASTM. O emprego deste material seco foi viabilizado, dentre as configurações apresentadas, nas porcentagens de 30 a 50%, ficando dentro dos parâmetros mecânicos normativos estabelecidos para o uso em asfalto, misturas acima dos 50% reduziu a resistência máxima de carregamento do pavimento, assim como a tensão por compressão diametral.

Estudo como este do autor nº6, viabilizando o uso do lodo de ETA em revestimento asfáltico por meio de processo de secagem a temperatura de 105°C, pode conter uma vantagem energética se comparado ao estudo do autor nº5, que viabilizou seu uso da mesma maneira, porém com temperatura de calcinação a 500°C, pois possivelmente contará com custos maiores de produção para se atingir tal temperatura de preparo do lodo, se forem testados em escalas reais.

No estudo empregado pelo autor nº7, seu propósito foi de aplicar o lodo de ETA em blocos de concreto para pavimentação, com um lodo seco em estufa a 105°C por 24 horas de umidade em torno de 25%, substituindo a areia como agregado, com resultados satisfatórios, técnica e ambientalmente, na porcentagem de substituição de 10%. Novamente, a questão da viabilidade econômica adentra nas condições de benefícios importantes a serem avaliados.

Quadro 2.5 -Formas de preparo da amostra de lodos de ETE em pavimentação.

PUBLICAÇÕES				
LODO DE ETE				
nº	AUTORES	Ano	LOCAL	Tipo de lodo
1	Tamile Antunes Kelm, Laura Maria Goretti da Motta, Mariluce de Oliveira Ubaldo.	2014	Rio de Janeiro – RJ (ETE do Caju)	In natura, estufa a 60°C e calcinado a 550°C
2	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela.	2012	Recife-PE (ETE Cabanga)	Seco ao ar
3	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela.	2014	Recife-PE (ETE Cabanga)	Seco ao ar
4	Kiev Luiz Pereira	2012	Natal-RN (Empresa limpa fossa – lagoa de estabilização anaeróbia)	Calcinado a 550°C
5	J.G Bastidas-Martínez, J.Camapum de Carvalho, L.C Lucena, M.M.Farias, H.A Rondón-Quintana.	2020	ETE de Brasília-DF	Calcinado a 200,300,500 e 800°C por 45 minutos
6	Kaling Taki, Saurabh Choudhary, Sharad Gupta, Manish Kumar	2019	Gandhinagar – Índia (ETE Jaspur)	Seco ao ar
7	Deng-Fong Lin, Huan-Lin Luo, Darn-Horng Hsiao, Chien- Ta Chen, Ming-Du Cai.	2016	Tawain (ETE não identificada)	Calcinado a 900-1000°C
8	Hamza Güllü e Halil İbrahim Fedakar	2016	Turquia (ETE Gaziantep)	Calcinado (temperatura não informada).
9	Yuan Zhang, Zhen Leng, Fuliao Zou, Lei Wang, Season S. Chen, Daniel C.W. Tsang	2017	Tuen Mun -Hong Kong (ETE T-Park)	Calcinado (temperatura não informada).

Fonte: Autor (2021).

Analisando o Quadro 2.5, o autor nº1 realizou ensaios mecânicos com o lodo de ETE nas condições in natura, seco em estufa a 60°C e calcinado em mufla a 500°C com aditivos estabilizantes de pó de pedra, cal e cimento, segundo o autor nº1, dois fatores foram preponderantes na escolha da mistura mais adequada: o ambiental, no que diz respeito às exigências da NBR 10004/2004, e o mecânico, através dos ensaios de MR. Dentre estas misturas analisadas, concluiu-se que a mistura composta por lodo in natura, apresentou os melhores parâmetros, tendo seu uso viabilizado nestas questões para camadas de base e sub base de pavimentos.

Vemos assim a questão econômica ainda em segundo plano, como sugestão para estudos futuros de viabilidade, onde a temática do uso do lodo in natura novamente possui uma possível vantagem na questão de consumo energético.

Os autores nº2, nº3 e nº6 optaram pelo uso do lodo seco ao ar. Para o autor nº6, o lodo de ETE foi seco ao ar por 2 meses, num tanque de drenagem, e avaliados suas propriedades mecânicas com aditivos de 2%,4%,6% e 8% de cal. Tendo seu emprego validado tecnicamente em sub-base para pavimentos flexíveis na porcentagem de aditivo de cal de 6% com lodo de ETE.

Como apresentado anteriormente no estudo de Barroso (2007), a secagem possui variáveis climáticas, quando seco ao ar, que devem ser avaliadas para que o processo de preparo seja entendido em sua plenitude e os impactos possíveis do lodo empregado sejam avaliados.

Os autores nº4, nº5, nº7, nº8 e nº9 utilizaram o lodo de ETE calcinado, destes os autores nº8 e nº9 não informaram a temperatura de calcinação. De toda forma, por mais que nestes estudos a viabilidade técnica e/ou ambiental foram satisfatórias, a questão do desprendimento energético necessário em escala real para retirar a água contida neste lodo ainda estão abertos para serem estudados.

Do ponto de vista gerencial do lodo, as vantagens importantes da secagem térmica são de acordo com Golçalves et al., (2001):

- i. Diminuição do volume de material para o gerenciamento;
- ii. Diminuição de gastos para transportar e armazenar o lodo;
- iii. Estabilização do lodo sem a presença de patógenos;
- iv. Manutenção das propriedades para uso benéfico na agricultura por exemplo;
- v. Uso do lodo seco como fonte de combustível para o próprio aparelho de secador mecânico ou conversores térmicos, por conta do alto poder calorífico restante e dos gases quentes possivelmente gerados e resgatados como fonte de energia térmica.

De acordo com David (2002), a escolha do mecanismo de remoção de água do lodo deve levar em conta o tipo de lodo a ser desaguado, a área disponibilizada e a destinação final que será dado ao resíduo. Segundo Fernandes et al., (2001), no caso da secagem térmica ou incineração, o lodo deverá possuir no mínimo 35% de teor de sólidos para que se obtenha uma boa eficiência no processo.

De acordo com Andreoli, Sperling e Fernandes (2001), é recomendado o desaguamento dos lodos entre 15 a 30% de teor de sólidos para aplicar o processo de secagem térmica, este processo deve ser feito com fonte de calor externa como o biogás, gás natural, óleo combustível, dentre outros tipos de combustíveis, obtendo-se tortas com teores de sólidos de 90-95%.

A SANEAGO por meio de Sobrinho (2011), realizou um Estudo das Alternativas Técnico – Econômicas para Redução dos Volumes de Lodo de ETE Dr. Helio Seixo de Britto, nesta análise foram avaliados os processos de secagem térmica 70°C a 140°C e de combustão do lodo a 1100°C.

Como conclusão deste estudo, a SANEAGRO verificou a necessidade de utilizar combustível externo para a secagem térmica, tornando essa opção inviabilizada economicamente para a redução de volume do lodo. Analisaram-se como fontes combustíveis o gás GLP, bagaço de cana de açúcar, óleo diesel e cavaco de madeira. A combustão térmica, utilizando a energia contida no próprio lodo como fonte energética, demonstrou ser uma opção viável tecnicamente, diminuindo o volume inicial do lodo em 94,96%, obtendo as cinzas como produto final.

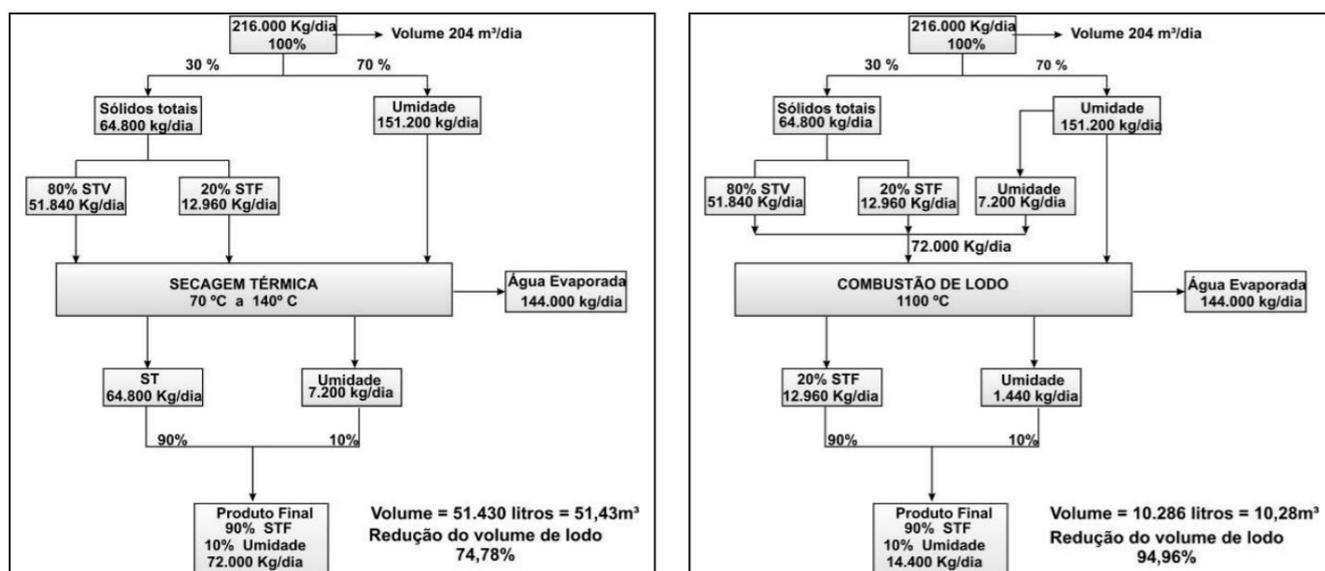
Posteriormente, conforme apresentado na Figura 10.3, Silva et al., (2017) buscou alternativas para viabilizar economicamente os esquemas de secagem térmica e combustão propostas anteriormente pela SANEAGRO.

Para isto, foram realizadas análises econômicas comparativas, com as seguintes alternativas para combustíveis de secagem térmica:

Alternar o processo vigente de tratamento primário quimicamente assistido e implantação do processo convencional de lodos ativados com digestores anaeróbios para geração de biogás e inserção da secagem térmica. Com este estudo, Silva et al., (2017) demonstrou que, além dos gastos adicionais para adicionar os digestores, o biogás gerado não seria o necessário para a secagem térmica, solicitando assim uma complementação com óleo diesel, tornando esta opção inviável economicamente.

As demais fontes energéticas externas para a secagem térmica seriam o gás GLP, cavaco de madeira (eucalipto) e bagaço de cana de açúcar. Para estas opções considerou-se um período de 17 anos a partir do início do processo de tratamento secundário, reajuste de preços atuais dos combustíveis em 6% ao ano. Apesar do uso de cavaco de cana e cavaco de madeira apresentarem viabilidade, descartaram-se pela interferência com a operação diária da ETE, devido a exigência na movimentação excessiva de caminhões para descarregar os materiais, sendo necessário a construção de galpões para estocagem em períodos de chuva, em outras palavras, uma operação paralela ao normal funcionamento da ETE.

Figura 10.3 - Balanço de massa de secagem térmica e combustão do lodo da ETE Dr. Hélio de Seixo de Britto.



Fonte: Silva et al., (2017).

Em seu estudo, Carneiro et al., (2017) teve como proposta determinar a quantidade de energia térmica desprendida na combustão de diferentes misturas de lodo anaeróbio e espuma (material orgânico finamente em suspensão), assim como lodo aeróbio e lodo de ETA, com o intuito de analisar se essas combinações aumentam a quantidade de energia térmica útil para aproveitamento energético.

Exceto o lodo de ETA, com uma energia liberada na ordem de 1,6 Kj/g de lodo, por conta da elevada taxa de sólidos inorgânicos (30,2%), os resultados demonstrados por Carneiro et al., (2017), comprovaram a capacidade energética dos resíduos sólidos produzidos nas ETE's. com destaque as amostras de espuma e a mistura de lodo anaeróbio e espuma, que apresentou as maiores quantidades de energia liberada de 9,3 kJ/g e 7,0 kJ/g de lodo, respectivamente. Na Tabela 7.5 apresentam-se os resultados obtidos por meio da análise térmica realizada na temperatura de 0°C a 600°C com uma taxa de aquecimento de 2,5°C/min num período de 4 horas.

Tabela 7.5 -Quantidade de energia envolvida na combustão das amostras puras e combinadas de lodo de ETA e ETE.

AMOSTRAS (Puras e combinadas)	ENERGIA CONSUMIDA NA SECAGEM DO LODO (kJ/g)	ENERGIA ÚTIL LIBERADA (kJ/g)
Escuma	0,04	9,3
Escuma + Lodo Aeróbio	0,6	7,0
Lodo Anaeróbio	0,4	6,3
Lodo Aeróbio + Lodo Anaeróbio	0,3	6,0
Escuma + Lodo Anaeróbio	0,4	5,7
Lodo de ETA + Lodo Anaeróbio	0,2	4,9
Lodo Aeróbio	0,4	4,5
Lodo de ETA + Lodo Aeróbio	0,5	3,9
Lodo de ETA + Escuma	0,1	3,9
Lodo de ETA	0,6	1,6

Fonte: Caneiro et al., (2017).

Ainda que estes estudos apresentados por Sobrinho (2011), Silva et al., (2017) e Carneiro et al., (2017) avaliaram em parte a viabilidade técnica e econômica, Júnior et al., (2018) avaliou de forma estimada em valores os custos de secagem térmica de lodo de ETE, ao coletá-lo num reator UASB e realizar a secagem térmica em estufa convectiva, com uma massa de 500 g de amostra, nas temperaturas de 60, 70,80 e 90°C, apresentando possibilidade de aplicação para exemplificar o processo de secagem térmica de lodo de ETE em escala de bancada. Ao final deste estudo, o autor sugeriu a temperatura de 90°C como a temperatura de maior capacidade de aplicação neste processo de secagem, por conta da redução do tempo do mesmo, proporcionando uma relação de custo/benefício mais favorável, conforme apresentado pela Tabela 7.6, demonstrando os valores gastos em consumo de energia elétrica do aparelho de bancada. Este estudo realizou uma análise fidedigna conceituados nos modelos estatísticos de avaliação propostos por Midilli et al., (2002) e Page (1949), com base nas variáveis de parâmetros como a umidade, sólidos totais, sólidos totais voláteis, carbono orgânico total, nitrogênio total e fósforo total.

Tabela 7.6 -Estimativa do custo de secagem do lodo de ETE.

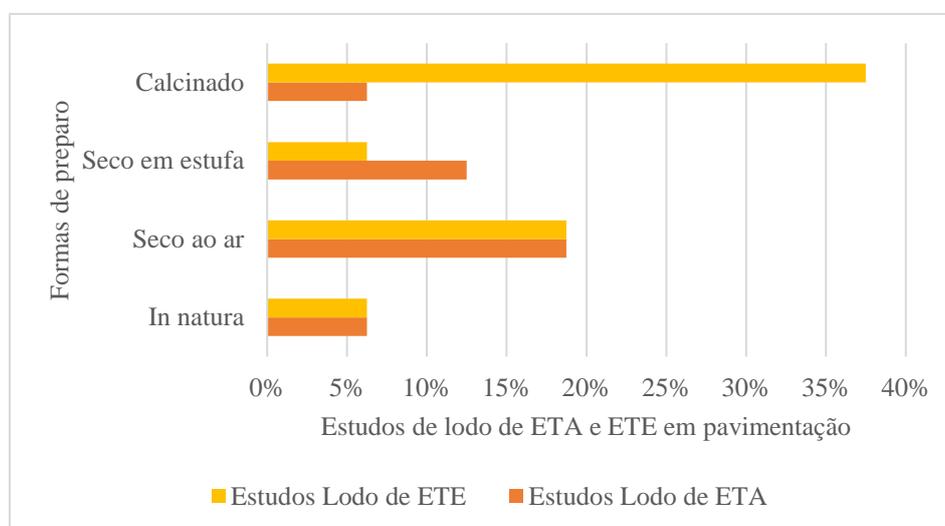
TEMPERATURA	CUSTO DE SECAGEM PARA CADA 1Kg DE LODO A SER SECO
60°C	R\$ 0,64
70°C	R\$ 0,53
80°C	R\$ 0,46
90°C	R\$ 0,41

Fonte: Júnior et al., (2018)

Apesar do estudo de Júnior et al., (2018) não ter sido realizado em escala real num possível projeto piloto, são demonstrados em seus dados, indícios do comportamento energético ao solicitar a remoção de água de um lodo, onde a hipótese do custo ser inversamente proporcional a temperatura de secagem num equipamento em escala real, pode ser levantado futuramente e avaliado, juntamente com as questões de alternativas de combustíveis renováveis empregados no equipamento de secador mecânico, em estudos posteriores com o intuito de viabilizar economicamente o uso benéfico do lodo de ETA e ETE em pavimentação.

A Figura 10.4 apresenta a compilação dos estudos levantados em dados percentuais na questão dos tipos de preparos realizados no lodo para aplicação no pavimento. Sendo o eixo das abcissas, os percentuais dos estudos levantados de acordo com a forma de preparo do lodo de ETA ou de ETE apresentados no eixo das ordenadas.

Figura 10.4 - Formas de preparo dos lodos de ETA e ETE em pavimentação nos estudos levantados.



Fonte: Autor (2021).

Ao avaliar o gráfico da Figura 10.4, observa-se que nos estudos em lodo de ETA 19% secaram ao ar, 13% secaram em estufa e 6% calcinaram ou usaram in natura, no caso do lodo de ETE, 38% calcinaram o resíduo, enquanto que 19% secaram ao ar e 6% secaram em estufa ou utilizou-se o lodo de ETE in natura.

Sendo assim, pode-se afirmar que para o lodo de ETA, os autores tiveram como preferência o uso do lodo seco ao ar, isso pode ser devido a fatores como um possível benefício ao ser avaliado sua viabilidade econômica de emprego em estudos futuros, a natureza do tratamento físico-químico da ETA e conseqüentemente as propriedades químicas resultantes deste resíduo. No cenário do lodo de ETE, observa-se que a maioria dos estudos optaram por utilizar o lodo calcinado, uma das hipóteses pode ser

o fator do alto teor de matéria orgânica presente neste resíduo, que ao ponto de vista da geotecnia é uma questão prejudicial a resistência mecânica e ao desempenho do pavimento.

5.3.3. AVALIAÇÃO DOS TEORES DE LODO DE ETA E ETE EMPREGADOS NAS MISTURAS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO.

Nas Tabelas 7.7 e 7.8 são apresentadas a compilação dos estudos levantados em função dos teores dos lodos aplicados nas misturas avaliadas, seja no solo, em emulsão asfáltica ou no concreto para o pavimento em questão.

Tabela 7.7 -Teores de lodo de ETA empregados nas misturas em pavimentação.

PUBLICAÇÕES				
LODO DE ETA				
nº	AUTORES	Ano	LOCAL	Misturas em % com lodo de ETA
1	Rodrigo Vaz Coelho; Fernando Shigueu Tahira; Fernando Fernandes; Heliana Barbosa Fontenele; Raquel Souza Teixeira	2015	Londrina-PR (ETA Cafezal)	50% solo argiloso + 50% lodo; 45% solo argiloso+ 45% lodo + 10% cimento; 75% solo arenoso + 25% lodo.
2	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela	2012	Igarassu-PE (ETA Botafoço)	5,10,15 e 20% lodo + solo fino siltoso.
3	Jessica Vannesa Colmenares Delgado	2016	Nova Iguaçu-RJ (ETA Guandu)	95% pó de pedra + 5% lodo; 90% pó de pedra + 10% lodo; 85% pó de pedra + 15 % lodo; 85% pó de pedra + 15% lodo + 2% cimento; 95% solo arenoso + 5% lodo; 90% solo arenoso + 10% lodo; 95% solo argiloso + 10% lodo.
4	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela	2014	Igarassu-PE (ETA Botafoço)	20% lodo + 80% solo fino siltoso + (1,2,3 ou 4% de cimento, cal ou emulsão asfáltica).
5	J.G Bastidas-Martínez, J.Camapum de Carvalho, L.C Lucena, M.M.Farias, H.A Rondón-Quintana.	2020	ETA de Brasília-DF	1% lodo + 99% de mistura asfáltica a quente

	Sahar A. Ali Dawood, Hayder Abbas				
6	Obaid, Tameem Mohammed Hashim e Hadeel Kareem Jasim	2019	Iraque (ETA Al Hilla)		30, 50,70 e 100% do volume de lodo substituindo a areia* + mistura asfáltica a quente

7	Yue Liu, Yan Zhuge, Christopher W.K. Chow, Alexandra Keegan, Danda Li, Phuong Ngoc Pham, Jianyin Huang, Rafat Siddique.	2020	Austrália (ETA Happy Valley)		5,10,15 e 20% lodo + concreto
---	---	------	------------------------------	--	-------------------------------

*Sendo 85% do volume da mistura asfáltica a quente composto por agregados minerais (por exemplo a areia) segundo Ali Dawood et al., (2019).

Fonte: Autor (2021).

Tabela 7.8 -Teores de lodo de ETE empregados nas misturas em pavimentação

PUBLICAÇÕES				
LODO DE ETE				
nº	AUTORES	Ano	LOCAL	Misturas em % com lodo de ETE
1	Tamile Antunes Kelm, Laura Maria Goretti da Motta, Mariluce de Oliveira Ubaldo.	2014	Rio de Janeiro - RJ (ETE do Caju)	82% solo arenoso + 15% lodo seco + 3% cal; 80% solo arenoso + 15% lodo seco + 5% cal; 90% solo arenoso + 5% lodo seco + 5% cal; 83% pó de pedra + 15% lodo seco + 2% cimento; 91% pó de pedra + 5% lodo seco + 4% cimento; 91% pó de pedra + 5% lodo in natura + 4% cimento; 81% pó de pedra + 15% lodo in natura + 4% cimento; 80% solo arenoso + 15% lodo calcinado + 5% cal; 95% solo + 5% cal.
2	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela.	2012	Recife-PE (ETE Cabanga)	5,10,15 e 20% lodo + solo fino siltoso.
3	Leda C. Lucena, José F. T. Juca, Jorge B. Soares, Suelly H. A. Barroso, Manoel G. Portela.	2014	Recife-PE (ETE Cabanga)	10% lodo + 90% solo fino siltoso + (2,4,6 ou % de cimento, cal ou emulsão asfáltica)
4	Kiev Luiz Pereira	2012	Natal-RN (Empresa limpa fossa - lagoa de estabilização anaeróbia)	5,10,20,30% lodo + 95,90,80,70% solo siltoso+(0,3,6,9% cimento).

5	J.G Bastidas-Martínez, J.Camapum de Carvalho, L.C Lucena, M.M.Farias, H.A Rondón-Quintana.	2020	ETE de Brasília- DF	1% lodo + 99% de mistura asfáltica a quente	
6	Kaling Taki, Saurabh Choudhary, Sharad Gupta, Manish Kumar	2019	Gandhinagar - Índia (ETE Jaspur)	68% Lodo seco + 32% água + 0,2,4,6, e 8% de cal por peso da mistura	
7	Deng-Fong Lin, Huan-Lin Luo, Darn-Horng Hsiao, Chien- Ta Chen, Ming-Du Cai.	2016	Tawain (ETE não identificada)	0,2,4,8,16, 22% lodo/cimento (razões 1:1,2:1;3:1 e 4:1) + solo argiloso	
8	Hamza Güllü e Halil İbrahim Fedakar	2016	Turquia (ETE Gaziantep)	0,5,10,15,20,30,40,50,60% lodo + solo argiloso	
9	Yuan Zhang, Zhen Leng, Fuliao Zou, Lei Wang, Season S. Chen, Daniel C.W. Tsang	2017	Tuen Mun -Hong Kong (ETE T- Park)		ND*

Notas: -ND =Não disponibilizado. No artigo não foi apresentada ou especificada esta informação
*

Fonte: Autor (2021).

Ao realizar uma análise dos teores empregados de lodo de ETA e ETE em pavimentação, observa-se num primeiro momento, uma variação ampla de dosagens de lodo nas misturas estudadas de 0 a 85%.

Dentre os parâmetros relevantes para esta extensão de traços utilizados nas aplicações, pode-se elencar os seguintes fatores:

i) Objetivo proposto pelo estudo:

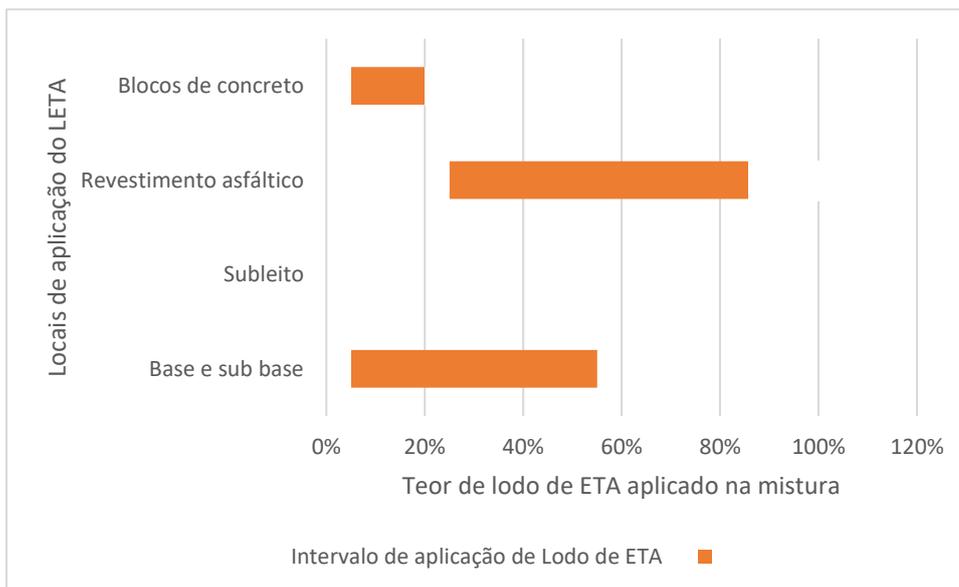
As metas definidas são pontos importantes, pois de acordo com o tipo de pavimento e o local definido, seja em camadas de base e sub-base, no revestimento asfáltico ou em blocos de concreto para pavimentação, existem intervalos de quantidade de lodo utilizados nestes estudos encontrados. Essas faixas podem ser justificadas pelos requisitos de resistência mecânica exigidos pelos órgãos regulamentadores, onde para cada tipo de aplicação, haverá uma solicitação de resistência distinta, impactando na quantidade de lodo ETA ou ETE aplicado. Sendo os seguintes intervalos:

- Base e sub base de 5 a 50% para lodo de ETA e de 5 a 60% para lodo de ETE;
- Subleito de 2 a 22% para lodo de ETE;
- Revestimento asfáltico de 25% a 85% para lodo de ETA e 1% para lodo de ETE;
- Blocos de concreto para a pavimentação de 5 a 20% para lodo de ETA;

A Figura 10.5 e 10.6 apresenta de forma gráfica, as faixas de lodo de ETA e ETE percentuais empregados em função do local do pavimento. No eixo das abcissas tem-se o intervalo com a variação

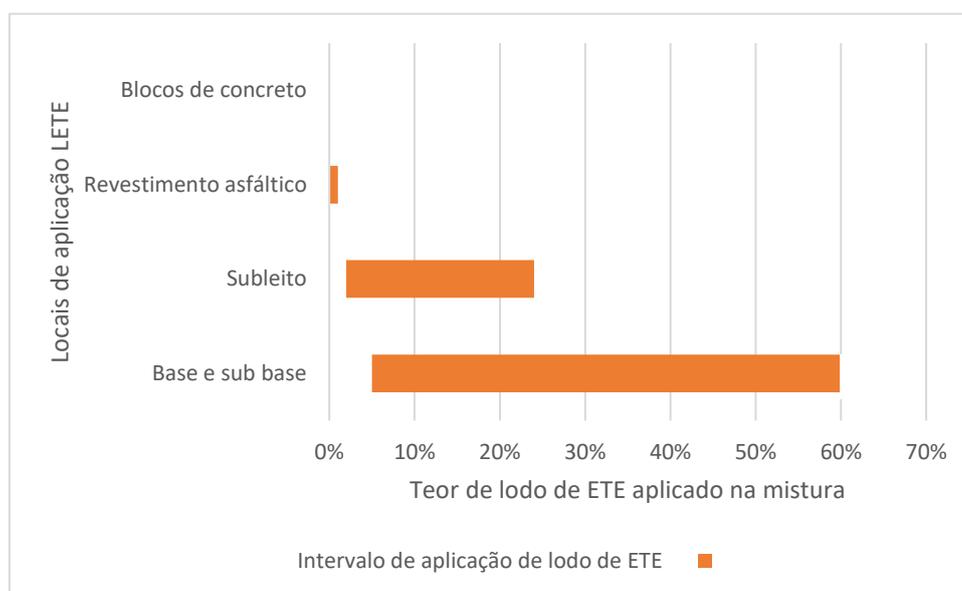
percentual da quantidade de lodo aplicado no pavimento em função do local do pavimento e tipo, seja de ETA ou de ETE, apresentado no eixo das ordenadas.

Figura 10.5 -Intervalos de uso do lodo de ETA em função do local do pavimento nos estudos levantados.



Fonte: Autor (2021).

Figura 10.6 -Intervalos de uso do lodo de ETE em função do local do pavimento nos estudos levantados.



Fonte: Autor (2021).

Conforme pode-se observar pela Figura 10.5 e 10.6 há uma proximidade das faixas de lodo de ETA e ETE utilizadas em base e sub-base, sendo 5 a 50% e de 5 a 60%, respectivamente. Nas demais formas de aplicação em pavimentação, vê-se uma disparidade entre faixas conforme o tipo de aplicação, para subleito, apenas obteve-se estudos em lodo de ETE com faixa de 2 a 22%, para revestimento asfáltico, encontra-se a maior diferença dentre todas analisadas, para lodo de ETA a faixa varia de 25 a 85%, vale lembrar que para o estudo de Ali Dawood (2019), que utilizou o maior teor de lodo de ETA em revestimento asfáltico, da ordem de 85%, este percentual está em função do volume da mistura, enquanto os demais estão com percentuais em função da massa da mistura, em comparação ao lodo de ETE o percentual aplicado foi de 1%. Para o caso dos blocos em concreto para pavimentação, apenas foi encontrado estudos de aplicação com lodo de ETA, com a faixa de variação de 2 a 20%.

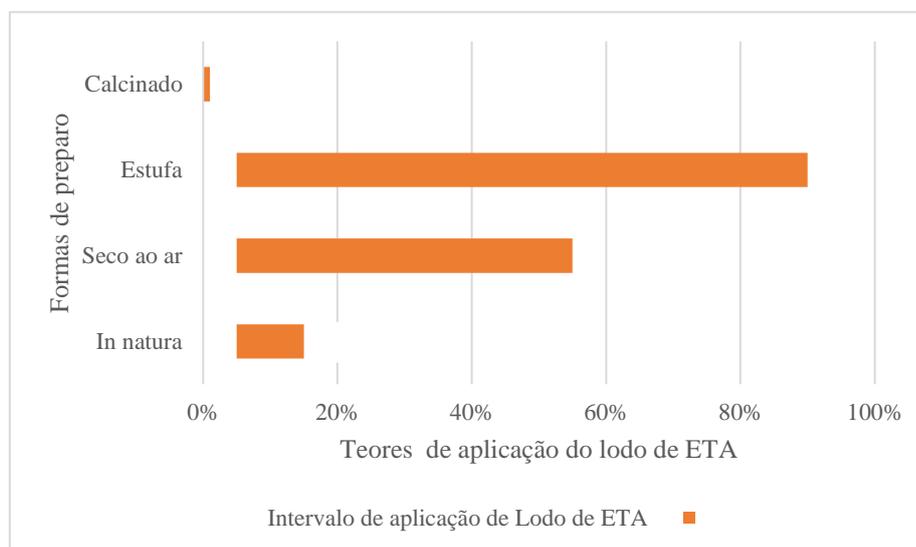
ii) Formas de preparo da amostra:

O modo como é utilizado o lodo pode ser considerado um item importante pois a água é um elemento crucial ao avaliar questões técnicas, econômicas e ambientais de uso benéfico do lodo em pavimentação. Dentre os estudos encontrados tem-se os seguintes percentuais de lodo de ETA e ETE aplicados nas misturas em função do grau de remoção de água da amostra:

- Lodo in natura de 5 a 15% para lodo de ETA e ETE;
- Lodo seco ao ar de 5 a 50% para lodo de ETA e de 5 a 68% para lodo de ETE;
- Lodo seco em estufa de 5 a 85% para lodo de ETA e de 5 a 15% para lodo de ETE;
- Lodo calcinado de 1% para lodo de ETA e de 1% a 60% para lodo de ETE.

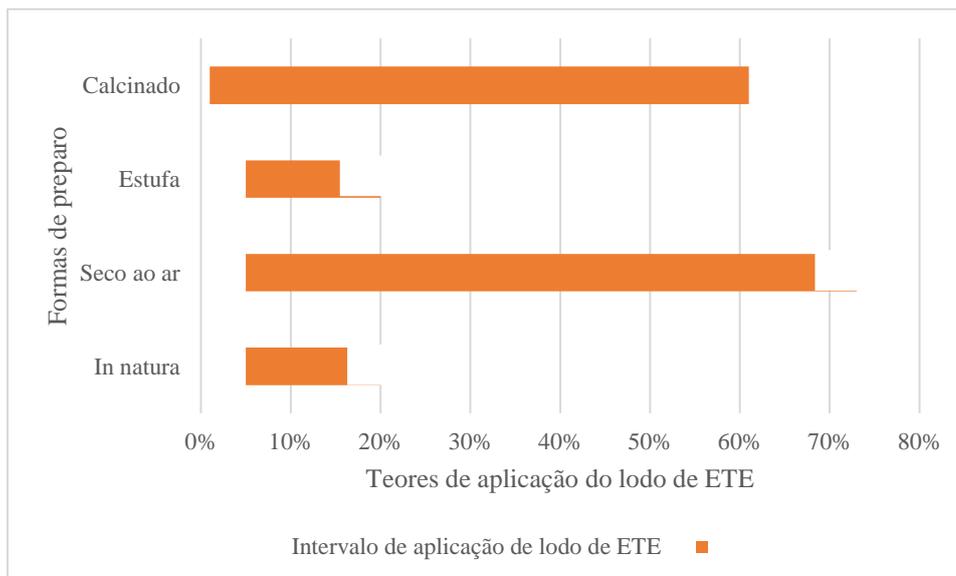
A Figura 10.7 e 10.8 apresenta de forma gráfica, os teores de lodo de ETA e ETE percentuais empregados em função das formas de preparo da amostra. No eixo das ordenadas tem-se a faixa com a variação percentual da quantidade de lodo aplicado no pavimento em função do modo de preparo da amostra, seja de ETA ou de ETE, apresentado no eixo das abcissas.

Figura 10.7 - Intervalos de uso do lodo de ETA em função da forma de preparo nos estudos levantados.



Fonte: Autor (2021).

Figura 10.8-Faixas de uso do lodo de ETE em função da forma de preparo nos estudos levantados.



Fonte: Autor (2021).

Pela Figura 10.7 e 10.8, observam-se no que diz respeito ao uso de lodo in natura em pavimentação para lodo de ETA e ETE, que as faixas de utilização possuem variações iguais de 0 a 15%, sendo a menor faixa de aplicação juntamente com o lodo de ETE seco em estufa, isso pode ser devido ao fato que o lodo in natura, tanto para ETA e ETE, devido ao seu alto teor de água presente possivelmente acarretaria efeitos nocivos ao desempenho do pavimento se estes resíduos fossem aplicados em percentuais maiores. Para o lodo seco ao ar, em estufa e calcinado, verifica-se uma disparidade entre faixas de aplicação para lodo de ETA e ETE. No caso do lodo seco ao ar, esta diferença de 18% a mais na faixa de aplicação de lodo de ETE, pode ser devido ao fato da secagem térmica, seja em processos naturais ou mecânicos, ser benéfico na eliminação de matéria orgânica presente neste resíduo, fato este prejudicial a aplicação em pavimentação, e aliado principalmente a questão futura de viabilidade econômica de emprego, o lodo seco ao ar seja um possível atrativo técnico e principalmente econômico para testar percentuais mais elevados. O processo de secagem em estufa para preparo do lodo dentre as formas de aplicação do resíduo, possuiu uma diferença percentual comparando lodo de ETA e ETE, na ordem de 60%, fato este sem uma justificativa técnica, ambiental ou econômica a não ser o método de tentativa e erro empregado para avaliar a maior faixa possível de aplicação de lodo de ETA nos estudos em pavimentação, sendo assim uma questão de análise para trabalhos futuros. No que diz respeito a calcinação do lodo de ETA e ETE, observa-se também uma disparidade considerável de 60% entre as faixas de aplicação, fato este justificado também por conta do elevado teor de matéria orgânica presente no lodo de ETE, que é necessário ser eliminado se possível em sua totalidade, para garantir a qualidade da mistura de aplicação no pavimento.

iii) Tipo de lodo coletado:

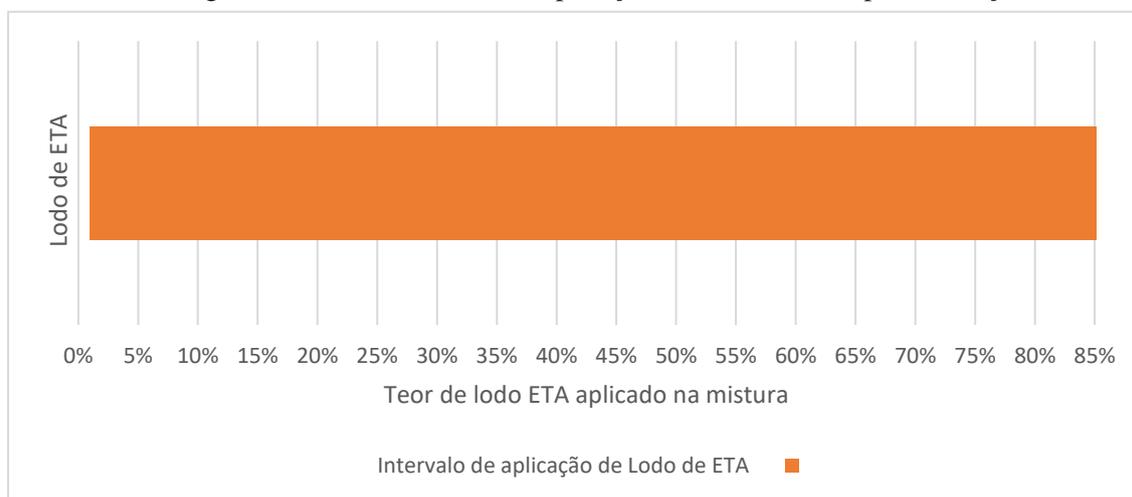
A natureza do lodo coletado nos estudos também pode ser levantada como uma questão importante a ser considerado, por conta principalmente das características intrínsecas ao material, sendo o lodo de ETE um resíduo de um processo de tratamento biológico, com alto teor de matéria orgânica, e de outro lado, o lodo de ETA, um resíduo originado de um tratamento físico-químico, com propriedades químicas distintas, como a alta concentração de coagulantes, características estas que impactam diretamente no desempenho do pavimento ao ser misturado com estes materiais. Sendo as seguintes faixas por tipo de lodo:

-Lodo de ETA de 1 a 85%;

-Lodo de ETE de 1 a 68%.

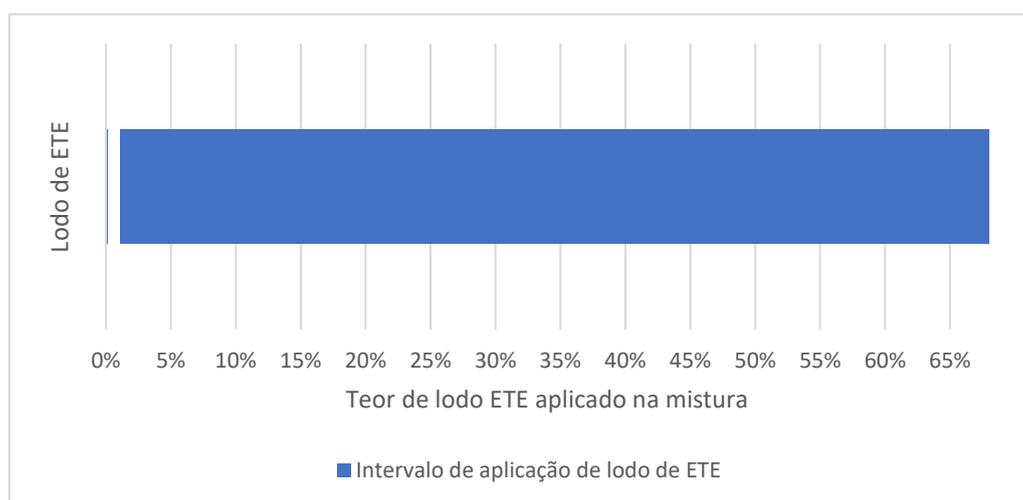
A Figura 10.9 e 11.1 apresentam de forma gráfica, as faixas percentuais empregadas de lodo de ETA ou ETE em função do tipo de lodo coletado. No eixo das abcissas, tem-se o intervalo com a variação percentual da quantidade de lodo aplicado no pavimento em função do tipo de lodo coletado, apresentado no eixo das ordenadas.

Figura 10.9 -Intervalo total de aplicação de lodo ETA em pavimentação.



Fonte: Autor (2021).

Figura 11.1 -Intervalo total de aplicação de lodo ETE em pavimentação.



Fonte: Autor (2021).

Analisando a Figura 10.9 e 11.1, observa-se que há uma maior variação de aplicação para lodo de ETA (1 a 85%) em pavimentação, comparado com o lodo de ETE (1 a 68%), essa diferença pode ser devido ao fato do lodo de ETA possuir propriedades químicas melhores avaliadas, sob o ponto de vista da geotecnia, comparados ao lodo de ETE, decorrente do processo de tratamento, que no caso do lodo de ETA, possui coagulantes a base de óxido de ferro, que podem conferir melhores índices físicos comparados ao lodo de ETE, que contém também maior conteúdo de matéria orgânica, impactando negativamente na resistência mecânica do pavimento.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs uma análise sistêmica, através da ferramenta de RBS, para avaliar os estudos encontrados em três bases de dados indexadoras de periódicos científicos, na questão do uso benéfico do lodo de ETA e ETE em pavimentação.

Como resultado desta análise, observou-se alguns pontos de relevância, em três aspectos importantes:

- técnico, a luz dos conceitos de saneamento e geotecnia;
- econômico, sob a ótica dos modos de preparo do resíduo; e
- ambiental, em relação as considerações de possíveis impactos ao lençol freático.

Partindo deste procedimento analítico, as pesquisas com aplicações em pavimentação do lodo, seja de ETA ou ETE, não possuíram um único fator de critério preponderante para criar-se um padrão de uso benéfico deste resíduo na categoria da geotecnia, ou mesmo um grupo constante de parâmetros atendidos. O que observou-se foram diversas variáveis, as quais nesta pesquisa, somente aquelas de

maior número de recorrências foram avaliadas, sendo estas: os ensaios de caracterização físicos, químicos e mecânicos; as formas de preparo da amostra e os percentuais de lodo aplicados na mistura.

A partir destas avaliações, pode-se inferir os seguintes apontamentos considerando as pesquisas selecionadas na literatura:

- i) O lodo de ETA e ETE apresentaram-se com propriedades distintas em função da sua localidade ao redor do mundo, mesmo em casos de estações de tratamento brasileiras, a variação regional implicou em resultados distintos de desempenho do material misturado;
- ii) Apesar da maior tendência em propostas de uso benéfico em misturas asfálticas e base e sub-base, as faixas de lodo de ETA e ETE empregados nas misturas são diversos e sem uma justificativa prévia de aplicação, sendo um procedimento de tentativa e erro para avaliar o desempenho, e se determinada configuração em percentual misturado é adequada;
- iii) Todos os estudos avaliados neste trabalho obtiveram o sucesso de aplicação, pelo menos tecnicamente, em no mínimo uma das configurações de percentuais testadas, demonstrando a viabilidade técnica do uso de lodo tanto de ETA quanto de ETE no pavimento. Sendo que, os percentuais para lodo de ETA: 50% no subleito (Coelho et al., 2015); 5% e 15% em base e sub-base (Delgado, 2016); 20% em base e sub-base (Lucena et al., 2012) e com aditivos estabilizantes a base de betume (Lucena et al., 2014); 1% no revestimento asfáltico (Martinez et al., 2020); 30 a 50% no revestimento asfáltico (Ali Dawood et al., 2019) e 10% em blocos de concreto para pavimento (Liu et al., 2020). Nos percentuais para lodo de ETE: 10% em base e sub-base (Lucena et al., 2012) e com aditivos estabilizantes a base de betume (Lucena et al., 2014); 5% em base e sub-base (Kelm, 2014); 20% em base, sub-base e subleito (Pereira, 2012); 1% no revestimento asfáltico (Martinez et al., 2020); 2% no subleito (Lin et al., 2016) e 50% em sub-base (Gülü e Fedakar, 2016);
- iv) A questão ambiental foi observada na minoria dos estudos, porém houve em alguns estudos analisados a preparação das amostras para testes de lixiviação e solubilização, realizados tanto em pesquisas brasileiras quanto internacionais, para lodo de ETA e ETE. Os resultados demonstraram teores elevados de metais pesados quando avaliado o lodo puro. Por outro lado, quando o lodo estava misturado ao solo estes índices decaíam abaixo dos níveis máximos permitidos pelas normas referenciadas;
- v) Observou-se uma maior inclinação no uso de lodo de ETE calcinado para pavimentação, corroborado pelo percentual de trabalhos com lodo de ETE calcinado de 38% contra os 19% com o uso de lodo seco ao ar, indicando a possível preocupação com as características orgânicas deste resíduo nas pesquisas analisadas;

- vi) A questão da viabilidade econômica do uso de lodo em pavimentação não foi um aspecto abordado como objetivo de avaliação nas pesquisas selecionadas. Em alguns estudos, como o de Delgado (2016) e Kelm (2016), o uso do lodo de ETA e ETE *in natura* foi justificado com o argumento de uma possível economia, porém ainda não se tem dados que comprovem a viabilidade em custo desta forma de uso benéfico de lodo de ETA e ETE. Nas demais pesquisas, o emprego de calor para remoção de água do lodo por meios mecânicos precisam ser avaliados, com o intuito de computar os gastos monetários em função da energia consumida para elevar esta temperatura e, desta forma, avançar mais uma etapa de análise da viabilidade de uso de lodo de ETA e ETE, em escala real, na pavimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – **Mechanistic-empirical pavement design guide**. American Association of Highways and Transportation Officials. Washington, D.C., 2002.

ACHON, C. L. ; CORDEIRO, JOÃO S. . **Gestão de resíduos dos serviços de saneamento (água e esgoto), a Lei 12.305/2010 e os desafios no Brasil**. In: XXXV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (AIDIS), 2016, Cartagena. XXXV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (AIDIS), 2016.

ACHON, C. L. ; BARROSO, M. M. ; CORDEIRO, J. S. . **Leito de drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água**. Engenharia Sanitária e Ambiental , v. 13, p. 54-62, 2008.

ACHON, C. L., BARROSO, M. M., CORDEIRO, J.S. **Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.18 n. 2, pg. 115-122, 2013.

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. . **Riscos da destinação de lodos de ETAs - Leis 9.605/1998 e 12.305/2010**. In: XVII Exposição de Experiências Municipais em Saneamento, 2013, Vitória. XVII Exposição de Experiências Municipais em Saneamento. 43º Assembléia nacional do ASSEMAE, 2013.

ALEM SOBRINHO, P. **Considerações sobre os efeitos do lançamento do lodo da ETA João Leite na ETE Dr. Helio Seixo de Britto de Goiânia**. USP, São Paulo, 2011.

ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. (orgs.). **Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções**. 2. ed. Curitiba: SANEPAR, FINEP, 2001. 288 p.

ANDREOLI, C.V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. **Lodo de esgoto: Tratamento e disposição final**. Rio de Janeiro: Editora ABES, 2001. 483p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 51: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”**. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12583: Agregado graúdo – Determinação da adesividade ao ligante betuminoso**. 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15087: Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.** 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada – Método de ensaio.** 1ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.** 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16018: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida.** 1ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica.** 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.** 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12052: Solo ou agregado miúdo – Determinação de equivalente de areia – método de ensaio.** 1ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9895: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio.** 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.005: **Lixiviação de resíduos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.004. **Resíduos sólidos: classificação**. 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.006: **Solubilização de resíduos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2004.

AWWARF (American Water Works Association Research Foundation), Advancing the science of water: AWWARF and water treatment residuals. In.: AWWARF, **State of the Science Reports: Research on Residuals from Water Treatment**. American Water Works Association Research Foundation, 2007.

BABATUNDE, A.; ZHAO, Y. **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. 129-64, 2007.

BABATUNDE, A.O.; ZHAO, Y.Q. **Equilibrium and kinetic analysis of phosphorus adsorption from aqueous solution using waste alum sludge**. Journal of Hazardous Materials, v. 184, p. 746-52, 2010.

BALKAYA, M. **Evaluation of the geotechnical properties of alum sludge, zeolite and their mixtures for beneficial usage**. Environmental Progress & Sustainable Energy, v. 34, p. 1028- 1037, 2015.

BASHAR, N.A.M.; ZUBIR, Z.H.; AYOB, A.; ALIAS, S. **Water treatment sludge as an alternative liner for landfill site: FTIR and XRD analysis**. In: International Conference on Advanced

Science, Engineering and Technology, 1. 2015, Penang, Malaysia. Proceedings, New York: American Institute of Physics, v. 1774, p. 030026-1 – 030026-8, 2016.

BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G. et al. **Preliminary study of hot mix asphalt containing water treatment and sewage sludge.** Archives Of Civil Engineering, Warsaw, Poland, v. 1, n. 66, p. 1-16, dez. 2020.

BERETON ET AL. **Lessons from Applying the Sistematic Literature Review Process within the Software Engineering Domain.** The Journal of System and Software, v. 80, p.571-583, 2007.

BERNUCCI, L. M. G. MOTTA, J. A. P. CERATTI, J. B. SOARES, **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros** (3ª Reimpressão.), PETROBRAS, ABEDA, Rio de Janeiro (2010) 509.

BARROSO, MARCELO MELO. **Influência das micro e macro propriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leito de drenagem.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 2007. São Carlos – SP. 249p.

BRASIL (2010). Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Congresso Nacional, Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Snis. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2017.** 2017. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2017>. Acesso em: 30 jun. 2020.

BEECHER, N. **Overview: Moving Forward the Sustainable and Welcome Uses a Global Resource.** In: LeBLANC, R.J.; MATTHEWS, P.; RICHARD, R.P. (eds.) Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge, and Biosolids Management: Moving Forward the Sustainable and Welcome Uses a Global Resource. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT), 2008.

BIOLCHINI, J.C.A., ET AL. **Scientific research ontology to support systematic review in software engineering.** Advanced Engineering Informatics, v.21, n.2, p.133-151, 2007.

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, São Paulo, v. 32, n. 8, p. 2018-2022, 2009.

CARNEIRO, MARTINA; VIDEIRA, LETÍCIA GAZIELE; STEPHANES, BETTINA LAPORTE; BILOTTA, PATRICIA; POSSETT, GUSTAVO RAFAEL COLLERE. **Determinação da quantidade de energia térmica liberada em diferentes misturas de lodo e espuma de estações de tratamento de esgoto e de água visando otimizar o aproveitamento energético do lodo seco.** ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Curitiba - Pr, v. 310, n. 2, p. 1-8, fev. 2017.

CARRINGTON, E. G. **Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction: final report.** Study contract no B4-3040/2001/322179/MAR/A2. European Commission. Set/2001. p.42.

CHÁVEZ-PORRAS, A.; ISAAC, R.L.; MORITA, D. **Incorporação do lodo das estações de tratamento de água e agregado reciclado de resíduo da construção civil em elementos de alvenaria - tijolos estabilizados com cimento.** Ciencia e Ingenieria Neogranadina, v. 18, n. 2, p. 5-28, 2008

CHEN, Y.C.; KUO, J. **Potential of greenhouse gas emissions from sewage sludge management: a case study of Taiwan.** Journal of Cleaner Production, v.129, p.196-201, 2016.

CHEN, Z.; LI, J.S.; POON, C.S. **Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks.** Journal of Cleaner Production, v. 171, p. 1447–1459, 2018.

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.** Goiânia: Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v.10, n.2, p.11-22, 2015.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SABESP (2020) (Brasil) (org.). **Tratamento de esgotos.** 2020. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=49>. Acesso em: 01 jul. 2020.

CONFORTO, E. C., AMARAL, D. C., & SILVA, S. L. (2011). **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos.** *In Anais Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produtos*, Porto Alegre.

CORDEIRO, J. S. ; BARROSO, M. M. ; ACHON, C. L. . **Resíduos de estações de tratamento de água e a saúde ambiental.** In: 7ª Jornadas Técnicas Internacionais de Resíduos, 2011, Porto. 7ª Jornadas Técnicas Internacionais de Resíduos - Energia dos Resíduos, 2011.

CORDEIRO, J. S. **Importância do tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de Estações de Tratamento de Água.** In: Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodo de Estações de Tratamento de Água. Cap.1, p.1-19. RiMa/ABES/PROSAB. Rio de Janeiro,1999

CORDEIRO, J. S. **O problema dos lodos gerados nos decantadores em estações de tratamento de água.** São Carlos, 341p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1993.

CORDEIRO, J. S. **Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs).** In: Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos. RiMa/ABES/PROSAB, Rio de Janeiro, 2001.

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

CORNWELL, D.A.; ROTH, D.K. **Water treatment plant residuals management.** In: EDZWALD, J.K. (ed.). Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water. New York: McGraw- -Hill, 2011.

CORREIA, J. E. **Caracterização Físico-química e microbiológica do lodo gerado na estação de tratamento de esgoto contorno.** Feira de Santana, BA.2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2009.

CHAO, I.R.S.; YABROUDI, S.C.; MORITA, D.M. **Remoción de fósforo de efluentes de lagunas de estabilización empleando lodo de estaciones de tratamiento de agua.** Interciencia (Caracas), v. 36, p. 774-778, 2011.

SILVA, D.R.; DANIEL, L.A. **Aproveitamento de lodos gerados em ETAs e a importância de auxiliares de floculação naturais.** Revista DAE, v. 58, n. 183, p. 21-24, 2010.

SILVA, ALESSANDRA VALADARES ALVARES DA; SILVA, MANUEL OSVALDO SENRA ALVARES DA; SANTOS, FAUSTO BATISTA ALVES DOS; RESENDE, MERCIA LUCCAS. **Avaliação de alternativas para redução dos volumes de lodo da ETE Goiânia**. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte - Mg, v. 511, n. 2, p. 1-8. 2017.

DASSANAYAKE, K.B; JAYASINGHE, G.Y.; SARAPANENI, A.; HETHERINGTON, C. **A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges**. *Waste Management*, v. 38, p. 321-335, 2015.

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio**. Dissertação de Mestrado em Engenharia. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2002.

DAWOOD, SAHAR A. ALI; OBAID, HAYDER ABBAS; HASHIM, TAMEEM MOHAMMED; JASIM, HADEEL KAREEM. **Influence of using alum sludge as an aggregate on hot mix Asphalt**. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, [S.L.], v. 584, p. 012032, 15 ago. 2019.

DNER (1994) DNER-ME 078-94 – **Agregados – adesividade a ligante betuminoso**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília.

DNER (1998) DNER-ME 035-98 – **Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília.

DNER (1998) DNER-ME 194-98 - **Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília.

DNER (1997) DNER-ME 054-97 – **Equivalente areia**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília.

DNER (1995) DNER-ME 043-95 – **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília.

DNER (2018) DNER-ME 134-2018 – **Pavimentação – solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Brasília.

DNER (1994) DNER-ME 080-94 – **Solos – Análise Granulométrica por Peneiramento**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília.

DNER (1994) DNER-ME 004-94 – **Solos coesivos – Determinação da compressão simples de amostras indeformadas**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília.

DNER (1994) DNER-ME 228-94 – **Solos – Compactação em equipamento miniatura**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília.

DNER (1994) DNER-ME 082-94 - **Solos - Determinação do Limite de plasticidade**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília.

DNER (2016) DNER-ME 172-2016 - **Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília.

DNER (1994) DNER-ME 122-94 - **Solos - Determinação do Limite de Liquidez – método de referência e método expedito**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília.

DNIT (2004) DNIT-ME 043-2004 – **Pavimento Rígido – Selante de juntas – Absorção de água – Método de ensaio**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

DNIT (2018) DNIT-ME 183-2018 – **Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

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

DI BERNARDO, L. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. Luiz Di Bernardo, Angela Di Bernardo Dantas, Paulo Eduardo Nogueira Voltan. São Carlos, LDiBe, 2012.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água**. 1ª ed. Editora LDiBe, São Carlos – SP, 2011.

DNIT, Rio de Janeiro. **Manual de Pavimentação**. DNIT, 2006. 278 p. Disponível em: https://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf. Acesso em: 01 Jul. 2020.

MONTALVAN, EDY LENIN TEJEDA. **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo de estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP**. 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo -Sp, 2016.

FADANELLI, L.E.A.; WIECHETECK, G.K. **Estudo da utilização do lodo de estação de tratamento de água em solo cimento para pavimentação rodoviária**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 2, n. 2, 2010.

GALAN, M.J.G.; DÍAZ-CRUZ, M.S.; BARCELO, D. **Removal of sulfonamide antibiotics upon conventional activated sludge and advanced membrane bioreactor treatment**. Anal. Bioanal. Chem., v.404, 2012, p.1505–1515.

GIBBONS, M.K.; GAGNON, G.A. **Understanding removal of phosphate or arsenate onto water treatment residual solids**. Journal of Hazardous Materials, v. 186, p. 1916-1923, 2011.

GEORGANTAS, D.A.; GRIGOROPOULOU, H.P. **Phosphate removal from synthetic and municipal wastewater using spent alum sludge**. Water Science & Technology, v. 52, n. 10, p. 525-532, 2005.

GÜLLÜ, HAMZA; FEDAKAR, HALIL İBRAHİM. **Use of factorial experimental approach and effect size on the CBR testing results for the usable dosages of wastewater sludge ash with coarse-grained material**. European Journal Of Environmental And Civil Engineering, [S.L.], v. 22, n. 1, p. 42-63, 3 maio 2016.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K.F.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E.M.; ANDREOLI, C.V. **Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento portland para reduzir o impacto ambiental**. Química Nova, v. 29, n. 1, p. 79- 84, 2006.

HAMMER, M. J. **Sistemas de abastecimento de água e esgotos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979. 563 p.

IDE, Carlos Nobuyoshi. **Eficiência da estabilização de lodos de ETEs com cal e ferrato (IV) de potássio**. Porto Alegre-RS, 1994. Tese de Doutorado - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

JING, G.; LUAN, M.; DU, W.; HAN, C. **Treatment of oily sludge by advanced oxidation process**. *Environ. Earth Sci.*, v.67, 2012, p.2217–2221.

JÚNIOR, ALEXANDRE; LEITE, VALDERI DUARTE; VIEIRA, FERNANDO FERNANDES; BARROS, ALDRE JORGE MORAIS; NASCIMENTO, KETYLIA KARLA RODRIGUES DO. **Avaliação da secagem térmica de lodo de esgoto sanitário**. *Revista DAE*, [S.L.], v. 67, n. 219, p. 55-72, 2019.

KELM, T. A. 2014. **Avaliação do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 230p.

KIZINIEVIČ, O.; ŽURAUSKIENĖ, R.; KIZINIEVIČ, V.; ŽURAUSKAS, R. **Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products**. *Construction and Building Materials*, v. 41, p. 464- 473, 2013.

KYNCL, M. **Opportunities for water treatment sludge re-use**. *GeoScience Engineering*, v. LIV, n.1, p. 11-22, 2008.

LAI, J.Y.; LIU, J.C. **Co-conditioning and dewatering of alum sludge and waste activated sludge**. *Water Science & Technology*, v. 50, n. 9, p. 41-48, 2004.

LEE, E. S. H.; SANTOS, F. J. **Caracterização de lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético**. Londrina: II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2011.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3 ed. Campinas: Editora Átomo, 2010.

LIN, DENG-FONG; LUO, HUAN-LIN; HSIAO, DARN-HORNG; CHEN, CHIEN-TA; CAI, MING-DU. **Enhancing soft subgrade soil with a sewage sludge ash/cement mixture and nano-silicon dioxide**. *Environ Earth Sci*, Berlim - Alemanha, v. 619, n. 75, p. 1-11, 01 abr. 2016.

LEDA, C., L. DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, J. THOME JUCA, J. SOARES AND M. PORTELA. **Characterization And Evaluation Of The Potential Use Of Sludge From Stp And Wtp In Paving.** *Eng. Agríc.*, Jaboticabal , v. 36, n. 1, p. 166-178. Feb 2016.

LUCENA, LÊDA CHRISTIANE LOPES; SILVA, JOSÉ DE ARIMATEIA; MARINHO FILHO, PAULO GERMANO TAVARES; PORTELA, MANOEL GUALBERTO. **Monitoramento de parâmetros físicos e ambientais de camadas de solo estabilizadas com lodo de eta e de ete.** *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente - Rama, Maringá - PR*, v. 10, n. 3, p. 1-18, 04 set. 2017.

LEDA, C., L. DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, J. THOME JUCA, J. SOARES AND M. PORTELA, 2014. **Potential uses of sewage sludge in highway construction.** *J. Mater. Civil Eng.*, 26(9): 04014051.

LUCENA, LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIRÊDO LOPES; JUCA, JOSÉ FERNANDO THOMÉ; SOARES, JORGE BARBOSA; MARINHO FILHO, PAULO GERMANO TAVARES. **Use of wastewater sludge for base and subbase of road pavements.** *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, [S.L.], v. 33, p. 210-219, dez. 2014.

LEVY, Y.; ELLIS, T.J. **A system approach to conduct an effective literature review in support of information systems research.** *Informing Science Journal*, v.9, p.181-212, 2006.

LIU, YUE; ZHUGE, YAN; CHOW, CHRISTOPHER W.K.; KEEGAN, ALEXANDRA; LI, DANDA; PHAM, PHUONG NGOC; HUANG, JIANYIN; SIDDIQUE, RAFAT. **Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: microstructural analysis, durability and leaching properties.** *Journal Of Environmental Management*, [S.L.], v. 262, p. 110352, maio 2020.

MEDEIROS, S. A. **Incorporação de lodo de tanque séptico como matéria-prima de uma mistura asfáltica.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte –UFRN, Natal. 2006.

METCALF & EDDY; TCHOBANOGLOUS, G.; STENSEL, H.D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery.** 5ed., McGraw-Hill Education, New York, 2013.

MONTEIRO, S.N.; ALEXANDRE, J.; MARGEM, J.L.R.; SANCHES, R.; VIEIRA, C.M.V. **Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic.** *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 6, p. 1281-1287, 2008.

MOREIRA, R.C.A.; GUIMARÃES, E.M.; BOAVENTURA, G.R.; MOMESSO, A.M.; LIMA, G.L. **Estudo geoquímico da disposição de lodo de estação de tratamento de água em áreas degradadas.** Química Nova, v. 32, n. 8, p. 2085-2093, 2009

MORTARA, F. C. **Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011. 241p.

MORTULA, M.M.; GAGNON, G.A. **Phosphorus treatment of secondary municipal effluent using oven-dried alum residual.** Journal of Environmental Science and Health, Part A, v. 42, p. 1685-1691, 2007.

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, São Paulo , v. 50, n. 316, p. 324-330, Dec. 2004.

PEREIRA, K.L. (2012). **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** Dissertação de mestrado, UFRN, Natal, RN, 125p.

PINHEIRO, A. V. **Alternativas para destinação final do lodo gerado no tratamento de esgoto sanitário.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.

RAGHU, D.; HSIEH, H.; NEILAN, T.; YIH, C. **Water treatment plant sludge as landfill liner.** In: ASCE GT Special Conference - Geotechnical Practice for Waste Disposal'87, 1987, Ann Arbor Michigan. Proceedings... New York: ASCE, p. 747-758, 1987.

REALI, M. A. P. . **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água.** 1. ed. Rio de Janeiro: Editora da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental-ABES, 1999. v. 1. 250p .

REIS, R. F. **Sistema de Remoção de Água de Lodo Gerado em Estação de Tratamento de Esgoto com Duas Fases: Desaguamento Inicial em Leito de Drenagem Seguido de Biossecagem.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

RIBEIRO, K D; SOUZA, L K. **Limites de atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos**. Brazilian Journal Of Biosystems Engineering, Minas Gerais - Bh, v. 12, n. 2, p. 185-196, 28 jun. 2018.

RICHTER, C.A. **Tratamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2001.

ROSA, L.A. **Secagem térmica de lodos de estações de tratamento de esgotos domésticos. Trabalho de Conclusão de Curso**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre-RS, 2014.

SANIN, F. D.; CLARKSON, W. W.; VESILIND, P. A. **Sludge Engineering: The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges**. 1. ed. United States of America, 2010.

SANTOS, H. M.; ARRUDA, A. F.; TAVARES, M. G. O.; MOREIRA, R. C. **Caracterização de lodo e efluente de ETE e água de rio a partir de avaliação química e ecotoxicológica**. Goiânia: Instituto de Química – Universidade Federal de Goiás, 2012.

SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná. **Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto do Paraná**. Curitiba: SANEPAR, 1997. 96 p.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE SÃO CARLOS (SAAE) (São Carlos - Sp) (org.). **Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)**. 2020. Disponível em: <https://www.saaesaocarlos.com.br/saaesc/index.php/esgoto/e-t-e-s>. Acesso em: 01 jul. 2020.

SILVA, E.M.; MORITA, D.; LIMA, A.C.M.; MACHADO, L.C.G.T. **Manufacturing of ceramic bricks with polyaluminum chloride (PAC) sludge from water treatment plant**. Water Science and Technology, v. 71, p. 1638-1645, 2015.

SILVA, Alysson Rogerio da. **Gestão dos riscos ocupacionais no manejo do lodo de estações de tratamento de esgotos e a NBR ISO 31000**. 2019. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de pós-graduação em Engenharia Urbana, PPGEU, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, 2019.

SILVA, Cynthia Algayer da *et al.* **Classificação dos lodos formados durante o processo de coagulação/floculação da água com os coagulantes pac e moringa oleifera**. Engevista, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 302-309, dez. 2012. Mensal.

SILVA, M.V.; FUNGARO, D.A. **Caracterização de lodo de estação de tratamento de água e cinzas de carvão visando sua utilização na manufatura de tijolo**. In: International workshop advances in cleaner production, 3. São Paulo, 2011. Proceedings..., São Paulo: Unip, p. 1-10, 2011.

SILVEIRA, L. R. **Aspectos geotécnicos e ambientais para a disposição adequada de lodo de esgoto**. 2014. 216f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SOARES, A. F. S.; MACHADO A. O. V.; CUNHA A. B. L.; LAGES, F. A. E. **Orientações básicas acerca do impacto do lodo gerado nas ETAs, alternativas de tratamento/disposição e legislação correlata**. Ministério Público do Estado de Minas Gerais. CEAT/MA, 2009.

SOCKANATHAN, S. **Water Treatment Plant Sludge as Sanitary Landfill Liner**. 1991. 104p. Thesis (Masters) - Department of Civil and Environmental Engineering, New Jersey Institute of technology, Newark, NJ, 199a.

SOUZA, Ricardo Andrade de. **Estudo comparativo dos ensaios de CBR e mini-CBR para os solos de Uberlândia-MG**. 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14236/1/RASouzaDISPRT.pdf>>. Acesso em: 30 Dez. 2020.

SPERLING, M. V.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 1. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.

TAO, J.; WU, S.; SUN, L.; TAN, X.; YU, S.; ZHANG, Z. **Composition of Waste Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plant**. *Procedia Environ. Sci.*, v.12: 2012, p.964–971.

TAKI, KALING; CHOUDHARY, SAURABH; GUPTA, SHARAD; KUMAR, MANISH. **Enhancement of geotechnical properties of municipal sewage sludge for sustainable utilization as engineering construction material**. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 251, p. 119723, abr. 2020.

TARTARI, R.; DIAZ-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.T.; MELO, W.J. **Plant nutrients in a degraded soil treated with water treatment sludge and cultivated with grasses and leguminous plants.** Soil Biology and Biochemistry, v. 39, n. 6, p. 1348 – 1354, 2007.

TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; SOUZA, A. E.; ALESSIO, P.; SOUZA, S.A.; SOUZA, N.R. **The effect of incorporation of a Brazilian Water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials.** Applied Clay Science, V. 53, n. 4, p. 561 – 565, out. 2011.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. **Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do Estado de São Paulo.** In.: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001. Anais..., ABES: Rio de Janeiro, 2001.

URBAN, R. C. **Metodologia para Gerenciamento Lodo de ETA e ETE.** Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil, na área de Saneamento e Ambiente – CAMPINAS-SP, 2016.

URBAN, Rodrigo Custodio; ISAAC, Ricardo de Lima; MORITA, Dione Mari. **Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte.** Revista DAE, [S.L.], v. 67, n. 219, p. 128-158, 2019. Revista DAE.

VAN HAANDEL, A.C.; MARAIS, G.V.R. **O comportamento do sistema de lodo ativado.** Campina Grande: Epgraf, 1999.

VERLICCHI, P.; MASOTTI, L. **Reuse of drinking water treatment plant sludges in agriculture: problems, perspectives and limitations.** In: International Conference on the FAO ESCORENA Network on recycling of agricultural, municipal and industrial residues in agriculture, 9. Gargano, Italy, 2000. Proceedings... Rome: FAO, p. 67-73, 2001.

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.

WATANABE, Y.; KOMINE, H.; YASUHARA, K.; MURAKAMI, S. **Batch Leaching Test Focusing on Clod Size of Drinking Water Sludge and Applicability to LongTerm Prediction Using**

Column Leaching Test. Geo-Frontiers 2011 @ Advances in Geotechnical Engineering. Anais...ASCE, 2011.

YANG, Y.; ZHAO, Y.Q.; BABATUNDE, A.O.; KEARNEY, P. **Two strategies for phosphorus removal from reject water of municipal wastewater treatment plant using alum sludge.** Water Science & Technology, v. 60, n. 12, p. 3181-3188, 2009.

ZHANG, YUAN; LENG, ZHEN; ZOU, FULIAO; WANG, LEI; CHEN, SEASON S.; TSANG, DANIEL C.W.. **Synthesis of zeolite A using sewage sludge ash for application in warm mix asphalt.** Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 172, p. 686-695, jan. 2018.

ZHAO, X.H.; ZHAO, Y.Q. **Investigation of phosphorus desorption from P-saturated alum sludge used as a substrate in constructed wetland.** Separation and Purification Technology, v. 66, n. 1, p. 71-75, 2009

ZHAO, Y.Q.; BABATUNDE, Y.S.; HU, Y.S.; KUMAR, J.L.G.; ZHAO, X.H. **Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment.** Process Biochemistry, v. 46, n. 1, p. 278-283, 2011.