



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RAFAELLA PAULA PALMEIRA DOS SANTOS

**ANÁLISE DA EMPREGABILIDADE DO USO DE LODO DE
ETE EM CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS**

Recife
2023

RAFAELLA PAULA PALMEIRA DOS SANTOS

**ANÁLISE DA EMPREGABILIDADE DO USO DE LODO DE ETE EM
CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Monografia apresentada ao curso de graduação em Engenharia Civil referente à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Reuber Arrais Freire

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Rafaella Paula Palmeira dos.

Análise da empregabilidade do uso de lodo de ETE em camadas granulares de pavimentos flexíveis / Rafaella Paula Palmeira dos Santos. - Recife, 2023. 75 : il., tab.

Orientador(a): Reuber Arrais Freire

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2023.

Inclui referências.

1. Pavimento flexível. 2. Cinza de lodo. 3. Estabilização de solos. 4. Melhoria de propriedades. 5. Índice de suporte Califórnia (ISC) 6. Estudos laboratoriais 7. Análise de viabilidade 8. Sustentabilidade 9. Misturas de solo-cinza de lodo. I. Freire, Reuber Arrais. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

RAFAELLA PAULA PALMEIRA DOS SANTOS

**ANÁLISE DA EMPREGABILIDADE DO USO DE LODO DE ETE EM
CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Monografia apresentada ao curso de graduação em Engenharia Civil referente à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Este trabalho foi aprovado pela banca em: 06/10/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^ª Reuber Arrais Freire – UFPE
Orientador

Prof.^a Dr.^ª Mauricio Oliveira de Andrade – UFPE
Avaliador

Prof.^a Dr.^ª Shirley Minnell Ferreira de Oliveira – UFPE
Avaliador

Dedico este trabalho aos meus pais, que não
pouparam esforços para que eu pudesse
concluir meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas e instituições que tornaram possível a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Este trabalho representa o culminar de anos de esforço, aprendizado e dedicação, e não teria sido possível sem o apoio e contribuições de muitos.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, pelo seu valioso auxílio e orientação ao longo deste processo, sua expertise, paciência e comprometimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram a buscar a excelência acadêmica. Seu amor incondicional e apoio moral foram à força motriz por trás de todas as minhas conquistas.

Aos meus colegas de curso, que compartilharam comigo momentos de estudo, desafios e inspiração.

Por fim, gostaria de expressar meu reconhecimento aos participantes da minha pesquisa e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para este TCC.

Obrigado a todos que fizeram parte desta jornada. Este trabalho não seria possível sem o apoio e encorajamento de vocês.

RESUMO

A infraestrutura de pavimentos flexíveis desempenha um papel crucial na mobilidade. A busca contínua por soluções sustentáveis e eficientes levou a uma crescente investigação sobre a melhoria das propriedades geotécnicas dos solos empregados para uso em pavimentos. Nesse contexto, a adição de cinza de lodo proveniente de uma estação de tratamento de esgoto ao solo surge como uma alternativa promissora. Este trabalho tem como objetivo principal avaliar os efeitos da incorporação de cinza de lodo ao solo para possível uso em camadas granulares de pavimento flexível. A pesquisa inclui uma análise detalhada das propriedades geotécnicas do solo estabilizado com cinza de lodo, com ênfase em índice de suporte Califórnia (ISC) como comportamento mecânico. O estudo é baseado em experimentos laboratoriais, que incluem a preparação de diferentes misturas de solo-cinza de lodo, tal com 5%, 10% e 15%. Os resultados obtidos são comparados com as propriedades do solo sem adição de cinza de lodo, permitindo uma avaliação crítica do impacto da estabilização. Os resultados desta pesquisa têm o potencial de contribuir significativamente para a tomada de decisões no projeto de pavimentos flexíveis. A adoção de técnicas de estabilização de solos com cinza de lodo pode não apenas melhorar o desempenho do pavimento, mas também reduzir o impacto ambiental associado à disposição de resíduos de estações de tratamento de esgoto em aterros sanitários.

Palavras-chave: Pavimento flexível, cinza de lodo, estabilização de solos, melhoria de propriedades, Índice de suporte Califórnia (ISC), estudos laboratoriais, análise de viabilidade, sustentabilidade, misturas de solo-cinza de lodo.

ABSTRACT

The flexible sidewalk infrastructure plays a crucial role in mobility. The ongoing search for sustainable and efficient solutions has led to growing research into improving the geotechnical properties of soils used for sidewalks. In this context, the addition of sludge ash from a sewage treatment plant to the soil has emerged as a promising alternative. The main objective of this work is to evaluate the effects of incorporating sludge ash into soil for possible use in granular layers of flexible sidewalk. The research includes a detailed analysis of the geotechnical properties of the soil stabilized with sludge ash, with an emphasis on the California Support Index (CSI) and mechanical behavior. The study is based on laboratory experiments, which include the preparation of different soil-sludge ash mixtures, such as 5%, 10% and 15%. The results obtained are compared with the properties of the soil without the addition of sludge ash, allowing a critical assessment of the impact of stabilization. The results of this research have the potential to contribute significantly to decision-making in the design of flexible sidewalks, offering a viable and sustainable alternative for improving the serviceability of granular layers. The adoption of soil stabilization techniques with sludge ash can not only improve sidewalk performance, but also reduce the environmental impact associated with the disposal of waste from sewage treatment plants in landfills.

Keywords: Flexible pavement, sludge ash, soil stabilization, property improvement, California Bearing Ratio (CBR), laboratory studies, feasibility analysis, sustainability, soil-sludge ash mixtures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1–Estrutura de pavimento, tipo flexível.....	14
Figura 2–Tratamento de esgoto por lodo ativado.....	30
Figura 3–Esquema de um leito de secagem.....	32
Figura 4–Limites de consistência.....	38
Figura 5–Aparelho de Casagrande e aspecto de ranhura.....	40
Figura 6–Vista aerea da ETE cabanga.....	47
Figura 7–Reator de coleta seletiva.....	47
Figura 8a–Amostra secando ar.....	48
Figura 8b–Amostra seca em estufa.....	48
Figura 9a–Mufla elétrica.....	49
Figura 9b–Lodo calcinado.....	49
Figura 9c–Cinza de lodo destorroado.....	49
Figura 10–Amostra em defloculante.....	53
Figura 11–Procedimento de rolagem do solo.....	53
Figura 12–Dimensões das partículas.....	56
Figura 13–Procedimento de rolagem do solo.....	56
Figura 14–Corpos-de-prova imersos.....	58
Figura 15 –Amostra em pistão padronizado.....	58
Figura 16–Curva granulométrica referente à mistura M5.....	61
Figura 17–Curva granulométrica referente à mistura M10.....	61
Figura 18–Curva granulométrica referente à mistura M15.....	62
Figura 19–Limites de Alterberg.....	63
Figura 20–Índice de Grupo.....	63
Figura 21–Curva de compactação referente ao solo natural.....	64
Figura 22–Curva de compactação referente à mistura M5.....	65
Figura 23–Curva de compactação referente à mistura M10.....	65
Figura 24–Curva de compactação referente à mistura M15.....	65
Figura 25–Teor de umidade ótima em percentual.....	66
Figura 26–Curvas pressão penetração.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Sistema Unificado de Classificação de Solos.....	21
Tabela 2-Classificação dos Solos.....	22
Tabela 3-Designação americana e brasileira de peneiras.....	37
Tabela 4- Composição das misturas.....	50
Tabela 5- Energias de compactação.....	57
Tabela 6- Resultado em percentual referente à M5.....	60
Tabela 7- Resultado em percentual referente à M10.....	61
Tabela 8- Resultado em percentual referente à M15.....	61
Tabela 9- Densidade seca máxima e umidade ótima.....	66
Tabela 10- Expansão e ISC.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	California Bearing Ratio
CNT	Confederação Nacional de Transportes
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
HRB	Highway Research Board
ISC	Índice de Suporte Califórnia
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LSI	Laboratório de solos e instrumentações
MR	Módulo de Resiliência
NP	Não Plástico
ONU	Organização das Nações Unidas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	Transportation Research Board

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	13
1.1	OBJETIVOS GERAIS E ESPECIFICOS.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	CONCEITOS GERAIS SOBRE PAVIMENTAÇÃO.....	17
2.1.1	Estradas.....	17
2.1.2	Classificação dos pavimentos.....	18
2.1.3	Classificação e caracterização do solo.....	19
2.1.4	Materiais aplicados a pavimentos.....	24
2.2	SISTEMA DE ESGOTO SANITÁRIO.....	26
2.2.1	Composição.....	26
2.2.2	Geração, tratamento e destinação.....	28
2.2.3	Secagem.....	31
2.3	CINZA DE LODO.....	33
2.4	ESTABILIZAÇÃO.....	34
2.5	ENSAIOS GEOTÉCNICOS.....	35
2.5.1	Ensaio de análise granulométrica.....	36
2.5.2	Ensaio limites de consistência.....	38
2.5.3	Ensaio de índice de suporte Califórnia (ISC).....	41
2.6	ESTUDOS SOBRE O EMPREGO DE CINZA À PAVIMENTAÇÃO.....	42
2.7	CONCLUSÃO.....	43
3	MATERIAS E MÉTODOS.....	45
3.1	MATERIAIS EMPREGADOS.....	45
3.1.1	Resíduo de ETE.....	45
3.1.2	Solo.....	45
3.2	CINZA DE LODO.....	47
3.3	COMPOSIÇÃO DOS SOLOS ESTABILIZADOS.....	50
3.4	ENSAIOS GEOTÉCNICOS DO SOLO NATURAL.....	50
3.4.1	Análise granulométrica.....	51
3.4.2	Ensaio limites de consistência.....	51
3.5	ENSAIOS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS ESTABILIZADOS.....	51
3.5.1	Análise granulométrica.....	52

3.5.2	Ensaio de consistência	55
3.5.3	Ensaio de compactação	57
3.6	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	57
3.6.1	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	60
4.1.1	Análise granulométrica	60
4.1.2	Limites de consistência	62
4.1.3	Compactação	64
4.2	COMPORTAMENTO MECÂNICO	67
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.1	CONCLUSÃO	69
5.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Apesar da vigente estagnação econômica devido à crise brasileira atual, o setor da construção civil segue sendo um setor pertinente economicamente para o país. Por sua vez, o setor de infraestrutura viária, peça chave para o desenvolvimento econômico-social, por promover mobilidade urbana e transporte de mercadorias. Portanto, essa é uma área que demanda atenção e significativos recursos financeiros, uma vez que pode exigir altos gastos no processo de construção e manutenção. Baseando-se nesse fator, o uso de materiais deve ser otimizado a fim de minimizar a utilização de recursos.

O pavimento flexível é construído em várias camadas: o revestimento asfáltico no topo da estrutura, seguido de uma camada de base, outra de sub-base e se necessário uma camada de reforço de subleito. No estado-da-prática no Brasil é bastante comum observar que os materiais utilizados geralmente são granulares, solos ou misturas de solos. A utilização de alternativas como componentes dessas camadas citadas é realizada, visando a melhoria na estabilização e resistência do pavimento, a exemplo, o estudo de uso da escória de aciaria geradas durante o processo de produção de aço em camadas granulares de pavimento (ROHDE, 2002). Portanto, se verifica que o estudo de adição de novos materiais na pavimentação é comumente utilizado no setor.

Em virtude disso, deve-se atentar que os materiais tradicionalmente empregados na pavimentação não são sustentáveis e que o setor segue sendo, portanto, um setor com alto investimento na efetivação da construção. Segundo DNIT (2009), a construção de pista simples é em média 2 milhões de reais por quilômetro construído. Por conseguinte é fundamental a análise de materiais alternativos com intuito de melhorar as propriedades dos materiais, diminuindo assim a espessura das camadas e reduzindo os custos de construção. Ademais, o descarte de resíduos provindos de ETEs muitas vezes se comprova que é feito de forma inadequada, configurando um problema social contemporâneo, sendo possível ratificar que tal problema tem a tendência a ampliar, dado que o saneamento brasileiro está em crescente percentual de atuação.

O descarte de resíduos provindos de ETEs muitas vezes é realizado de forma inadequada. Isto configura um problema social contemporâneo, sendo possível ratificar que tal problema tem a tendência a ampliar, dado que o saneamento brasileiro está em crescente percentual de atuação. Para tanto, de acordo com o novo marco regulatório da saúde, Lei Federal nº 14.026/2020, que altera as regras para a prestação de serviços no setor,

promovendo a ampliação da participação das empresas do setor privado nesse mercado, com o objetivo final de universalizar o acesso ao saneamento, um dos objetivos do Novo Marco Legal é atingir a meta de 90% da população com acesso aos serviços de coleta e tratamento de esgoto até 2033.

Conforme citado, a questão que demanda significativa atenção seria a ocorrência da disposição inadequada final de tal resíduo, pois no estado de Pernambuco, a maior parte do resíduo primário das estações de tratamento de esgoto é tratado no próprio terreno da estação e, em alguns casos, encaminhado para aterros sanitários para tratamento final. Enquanto o lodo do tratamento secundário é estabilizado. Após o tratamento químico, é descartado no terreno da estação ou extraído por terceiros para uso como fertilizante agrícola. (ARAÚJO et al., 2018).

Outrossim, o lodo gerado por uma ETE pode ser utilizado de variados modos na construção civil, por exemplo, na fabricação de cimento, onde o lodo é usado como agregado de construção. Godoy (2013) adicionou as cinzas do lodo ao processo de produção de cimento, e, dessa forma, reduz o custo de produção, ao substituir 35% do consumo de cimento por lodo calcinado entre temperaturas de 700°C a 800°C. Outro modo é a fabricação de tijolos ou produção de cerâmicas que vêm sendo consideradas por pesquisadores. Areias (2018) analisou, a partir de diversos ensaios, a possibilidade da utilização do lodo para a fabricação de cerâmica vermelha, desde que se utilize a proporção adequada de argila-lodo e se aplique o tratamento térmico apropriado (Areias, 2018).

Assim também, materiais alternativos vêm sendo estudados, como exemplo da incorporação de resíduos cerâmicos ao solo argiloso para emprego em pavimentação (Picanço, 2012). A extração de materiais naturais levou ao esgotamento de sedimentos próximos aos locais de estudo. Ao mesmo tempo, o crescimento industrial levou ao aumento da geração de resíduos, tornando o seu descarte cada vez mais difícil, caro e ambientalmente insustentável. A partir dos resultados de Módulo de Resiliência (MR) pode-se concluir que o modelo composto apresenta melhor adequação entre os modelos, pois o comportamento resiliente das misturas foi tanto melhor quanto menor a porcentagem de resíduo cerâmico adicionadas, tais amostras tiveram desempenho mecânico satisfatório, apresentando, portanto, grande potencial para melhoria de solos com baixa capacidade de suporte.

Outro estudo, tal como o anterior, trata a respeito do uso de cinza volante de carvão mineral proveniente de uma termelétrica situada na Região Metropolitana de Fortaleza, para aplicação em camadas granulares de pavimentos (Barros, 2015). Investigou-se, portanto, soluções para a incorporação das cinzas ao solo, chegando-se à conclusão que o MR do solo

resultou no menor valor, isto é, menor é a sua capacidade de se recuperar diante de um determinado carregamento, e que o módulo vai aumentando conforme se aumenta o teor de cinza nas misturas.

A Agenda 2030 (ONU, 2015) para o Desenvolvimento Sustentável dispõe de dezessete objetivos de desenvolvimento sustentável, estando claros nesses objetivos que o intuito é proteger o planeta da degradação iminente, sobretudo por meio do consumo e da produção sustentáveis, portanto, da gestão sustentável dos seus recursos naturais. Para tal, foi mencionada a necessidade de reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso, assim como a melhoria da qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura globalmente. E por último, tal agenda se menciona também o apoio a países em desenvolvimento a fortalecer as suas capacidades científicas e tecnológicas para mudar para padrões mais sustentáveis de produção e consumo.

A Lei nº 12.305/2010, referente a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), cuja finalidade é desenvolver diretrizes para uma destinação ambientalmente adequada para esses resíduos. Essas diretrizes incluem a reutilização, reciclagem, compostagem e uso de energia ou outros destinos permitidos pela autoridade do órgão. Portanto, os rejeitos só podem ser encaminhados para aterro sanitário para disposição final, pois nesse processo são eliminadas todas as possibilidades de tratamento e reciclagem por meio de processos técnicos existentes e economicamente viáveis.

Por essas razões, estudos vêm sendo realizados com o intuito de avaliar a destinação potencial do lodo de ETE em camadas de pavimentação. A título de exemplo foi investigado proporções de lodo ao solo *in nature* por Lucena *et al.* (2017), no qual propôs a caracterização e avaliação do uso de lodos de ETA e ETE, de Igarassu-PE e Recife-PE para uso em base e sub-base de pavimentos. Segundo a autora foram realizados ensaios de caracterização química, física e mecânica, por meio de observação de um ano o recalque da espessura representativa, com misturas de solo granular tipo A-2-4, lodo e estabilizante, nas porcentagens solo +10% de lodo de ETE + 8% e solo +20% de lodo de ETA +1% de emulsão.

1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECIFICOS

Este trabalho tem como principal finalidade analisar a viabilidade mecânica de uso de lodo de ETE como alternativa para estabilização de solos em aplicação nas camadas de pavimento asfáltico. Para atingir o objetivo geral, alguns objetivos específicos serão desenvolvidos:

- Analisar as características físicas do solo estabilizado com lodo de ETE;
- Investigar o comportamento quanto à ruptura do solo estabilizado com lodo de ETE por meio de ensaio CBR;
- Investigar o comportamento quanto à rigidez do solo com lodo de ETE;
- Avaliar o impacto de diferentes teores de lodo na mistura;
- Discutir o uso prático destes componentes visando atestar sua necessidade em estruturas de pavimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITOS GERAIS SOBRE PAVIMENTAÇÃO

2.1.1 Estradas

Em princípio, as rodovias são compreendidas de maneira geral como um componente do espaço sócio-geográfico, na qual atravessa uma certa extensão territorial, permitindo dessa forma que pessoas e mercadorias as utilizem com o intuito de percorrer pontos distintos. Esse componente é de tal pertinência ao desenvolvimento socioeconômico de um país, pois viabiliza cadeias produtivas, permitindo acesso a serviços e insumos.

Segundo Maré (2011) foi no Egito, a partir da construção das pirâmides, que as pessoas perceberam a necessidade de construir rodovias, desde então ao longo da história da humanidade desenvolveu caminhos com o objetivo de estabelecer correlações comerciais.

No entanto, foram os romanos que criaram o conceito rodoviário moderno, introduzindo o que se entende contemporaneamente como planejamento e construção de rodovias. Segundo o autor, a primeira via foi criada em 312 a.C., a partir da necessidade de expansão e os enormes interesses militares que levaram os romanos a construir uma rede viária que acabou por aproximar as populações e proporcionar serviços prestados à civilização e ao comércio. A criação destes eixos permitiu uma circulação mais rápida e segura, facilitando a mobilidade das tropas e o escoamento de mercadorias e mantimentos.

Todavia, com o declínio do império a humanidade culminou em um período histórico denominado como idade média, a qual a criação de rodovias deixou de ser relevante, pois a sociedade era essencialmente agrícola. Somente a partir dos séculos XVII que se verifica a utilização considerável de veículos de rodas, portanto é a partir de então que as rodovias passam a ser novamente construídas.

No Brasil hodierno o transporte por meio de rodovias é de suma importância econômica, pois o Brasil é o país com a maior concentração rodoviária de transporte de cargas e passageiros, possuindo a quarta maior rede de estradas do mundo. Conforme a Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2022), atualmente, as rodovias são responsáveis por cerca de 64,9% de todas as cargas transportadas no país e mais de 90,0% do total de passageiros.

Ainda Segundo o CNT (2022) a densidade rodoviária nacional pavimentada é de 25,1 quilômetros para cada mil quilômetros quadrados, constatando-se que se totaliza 1,563 milhões de quilômetros de malha rodoviária, dos quais 213 mil são pavimentados. De acordo com tal estudo levantando ainda se constatou que 51% das rodovias federais pavimentadas do país apresentavam algum tipo de problema classificado como normal ou péssimo, e esse número é ainda mais grave nas rodovias federais, chegando a 71,7%.

Desse modo, percebe-se que para melhorar a prestação de serviços relacionados à malha viária é necessário que mais recursos sejam direcionados para a melhoria da sua qualidade. Como o Estado detém sob sua responsabilidade grande parte do sistema viário, esse possui participação fundamental na melhoria e manutenção desses. Por outro lado, de acordo com o CNT (2022), atualmente há restrições orçamentárias para investimento em infraestrutura de transporte de 2010 a 2021, a redução de recursos investidos pelo poder público em infraestrutura de transporte chegou a aproximadamente R\$20 bilhões. Nesse âmbito, uma etapa essencial do processo constitui-se na escolha dos melhores projetos, com melhor custo-benefício.

2.1.2 Classificação dos pavimentos

Primeiramente, pavimento é definido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) como uma estrutura construída com o intuito de resistir tecnicamente a esforços repetitivos oriundo do tráfego e distribuí-los às camadas as quais faz parte da estrutura de um pavimento, portanto deve-se ter, como critério, bom rolamento para os veículos, garantindo portando conforto e segurança (DNIT, 2006).

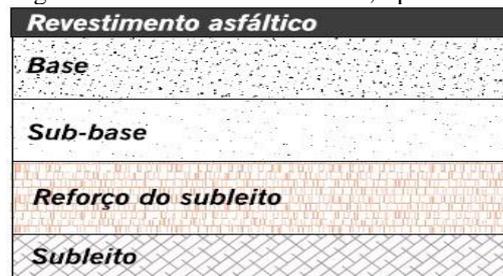
Portanto, no Brasil, o órgão responsável pela manutenção, ampliação, construção, fiscalização e elaboração de estudos técnicos do modal rodoviário é o DNIT, tendo como encargo a conservação das estradas.

Ademais, segundo Bernucci *et al.* (2022) uma rodovia pavimentada é um sistema de certas camadas dispostas sobre uma fundação natural chamada de subleito. O comportamento estrutural frente à solicitação de carregamentos repetidos do tráfego e da ação climática depende do material de cada uma dessas camadas, portanto, um melhor dimensionamento se dá por considerar as propriedades dos materiais a serem utilizados, suas espessuras, rigidez, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento.

Medina *et al.* (2005) considera que há duas categorias de pavimentos, sendo designados como rígidos e flexíveis, sendo essas categorias relacionadas com a transmissão das tensões para o subleito e o comportamento da estrutura de maneira geral. Portanto, o pavimento flexível, segundo o autor, é constituído por um revestimento betuminoso sobre base granular ou solo estabilizado granulometricamente, enquanto o pavimento rígido é constituído por placas de concreto (raramente armadas) assentadas sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária

Ainda segundo Bernucci *et al.* (2022), os pavimentos flexíveis, geralmente associados a pavimentos asfálticos, consistem em uma camada de superfície asfáltica (revestimento), apoiada sobre base, subleito e reforço de subleito, constituída por material granular, solo ou mistura de solo, sem adição de ligantes ou aglutinadores, que aumente a rigidez usual encontrada em materiais granulares e solos. Dependendo do volume de tráfego, capacidade de suporte do subleito, rigidez e espessura da camada e condições ambientais, uma ou mais camadas podem ser suprimidas.

Figura 1- Estrutura de Pavimento, tipo flexível



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

Revestimentos para estruturas de pavimentos flexíveis geralmente estão sujeitos a esforços de compressão e tração devido à flexão, enquanto outras camadas são principalmente comprimidas por serem material granular ou solo. De acordo com Bernucci *et al.* (2022), em alguns casos, a camada subjacente do revestimento pode ser composta por um material estabilizado quimicamente para fornecer coesão e aumentar sua rigidez para que possa resistir ao estresse de tração. Apesar de sua coesão, as camadas de solos finos têm resistência à tração mais baixa, ao contrário dos materiais estabilizados quimicamente.

2.1.3 Classificação e caracterização do solo

O solo é definido como uma matéria resultante da decomposição de uma determinada rocha mãe a qual lhe deu origem, para uma concepção relativa à pavimentação, o solo pode

ser descrito como material orgânico ou inorgânico, inconsolidado ou parcialmente cimentado. Segundo DNIT (2006) qualquer material que possa ser escavado com pá encontrado na superfície da terra sem precisar explodir pode ser considerado como solo.

Para os materiais empregados na base, sub-base e reforço do subleito, admite-se uma etapa preliminar que consiste em averiguar os materiais disponíveis quanto às suas características de natureza para serem empregados na estrutura dos pavimentos. De maneira geral, os materiais de pavimentação devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com a sua função na estrutura.

Portanto, na pavimentação, os materiais de base, sub-base e reforço do subleito são constituídos por agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, entre outros.

A classificação dos materiais dispõe os materiais entre os granulares e os finos, sendo que todos os solos que possuam mais de 35% de finos (passantes na peneira 200 ou 0,074mm) são considerados materiais finos visto que a matriz tende a ser de um solo fino, que comanda as propriedades geotécnicas (BERNUCCI *et al.*, 2022). Compreende-se nesse sentido que para os materiais granulares com presença de frações mais finas, passantes na peneira 200, costuma-se tradicionalmente limitar a porcentagem e a atividade dessas frações de solo para uso como materiais de construção de pavimentos.

Segundo DNIT (2006), o solo por ser um material que ocorre na natureza nas mais diferentes formas, portanto, é indispensável ser classificado de modo que se possam formular métodos de projetos baseados em algumas propriedades de cada grupo. Deste modo foram desenvolvidos vários sistemas de classificação, cada um adequado a uma utilização dos solos ou a métodos de projeto.

Duas classificações de solos bastante utilizadas são o Sistema Unificado de Classificação de Solos (*Unified Soil Classification System - SUCS*), resultante de um trabalho conjunto do *Bureau of Reclamation* e do *Corps of Engineers*, assistido pelo professor Arthur Casagrande, da Universidade de Harvard, foi publicado, em 1953 e a classificação para finalidades rodoviárias (*Transportation Research Board- TRB*), aprovado em 1945.

O SUCS baseia-se na identificação dos solos de acordo com as suas qualidades de textura e plasticidade, agrupando-lhes de acordo com seu comportamento, baseando-se na identificação dos solos de acordo com as suas qualidades de textura e plasticidade. Consideram-se características como porcentagens de pedregulhos, areia e finos (fração que passa na peneira nº200: silte e argila), forma da curva granulométrica, plasticidade e compressibilidade (DNIT, 2006).

Por conseguinte, o SUCS baseia-se, de acordo com o manual do DNIT (2006), na identificação dos solos de acordo com os solos serem divididos em solos de granulação grossa que possuem mais de 50% em massa retida na peneira nº 200, solos de granulação fina que possuem mais de 50% em massa passando na peneira nº 200 e por último, solos altamente orgânicos.

A tabela seguinte demonstra a ordenação da classificação seguida pela metodologia de laboratório para a identificação e caracterização dos grupos de solos.

Tabela 1-Sistema Unificado de Classificação de Solos

Solos de graduação grossa, mais de 50% em massa retido na peneira nº200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino
		Pedregulho com fios	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de pedregulho, areia e silte
			GC	Pedregulhos argilosos ou mistura de pedregulho areia e argila
	Pedregulhos: Mais de 50% da fração graúda passando na peneira nº4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas com ou nenhum fino
			SP	Areias mal graduadas ou areias pedregulhosas com pouco ou nenhum fino
		Areias com finos	SM	Areias siltosas ou misturas de areia e silte
			SC	Areia argilosa ou misturas de areia e argila
Solos de graduação fina 50% ou mais passando pela peneira nº200	Siltes e Argilas com $LL \leq 50$		ML	Siltes inorgânicos - Areias muito finas- Areias finas siltosas e argilosas
			CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - argilas pedregulhosas arenosas e siltosas
			OL	Siltes orgânicos - Argilas siltosas de baixa Plasticidade
	Siltes e Argilas com $LL > 50$		MH	Siltes - Areias finas ou sites micáceos - Siltes Elásticos
			CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade
			OH	Argila orgânica de alta e média plasticidade
	Solos altamente orgânicos		PT	Tufas e outros solos altamente orgânicos

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

Isto posto, vale-se para a classificação TRB a granulometria, o limite de liquidez, o índice de liquidez e o índice de grupo, estando, portanto, intimamente ligado ao método de dimensionamento de pavimentos pelo índice de grupo. Em vista disso, o método reuniu os solos em grupos e subgrupos, em função da sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. Determina-se o grupo do solo, por processo de eliminação no quadro de classificação.

Ademais, faz-se necessário a determinação de um parâmetro denominado de Índice de Grupo (IG) com intuito de se verificar se o solo possui boas características. O IG é calculado de acordo com a equação 1:

$$IG = 0,2 a + 0,005 ac + 0,01 bd \quad (1)$$

Em que, segundo DNIT (2006):

a = % de material que passa na peneira nº 200, sendo este, menos 35. Porém, se a % obtida nesta diferença for maior que 75, adota-se 75; se for menor que 35, adota-se 35. (a varia de 0 a 40);

b = % de material que passa na peneira nº 200, menos 15, e se a % obtida nesta diferença for maior que 55, adota-se 55; se for menor que 15, adota-se 15. (b varia de 0 a 40);

c = Valor do Limite de Liquidez menos 40, mas se o Limite de Liquidez for maior que 60, adota-se 60; se for menor que 40, adota-se 40 (c varia de 0 a 20);

d = Valor de Índice de Plasticidade menos 10. Porém se o índice de Plasticidade for maior que 30, adota-se 30; se for menor que 10, adota-se 10 (d varia de 0 a 20);

O índice de grupo define a capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento, portanto, este índice estabelece uma ordenação dos solos dentro de um grupo, conforme suas aptidões.

Tabela 2-Classificação dos Solos

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira N°200							MATERIAIS SILTO-ARGILOSOS			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria- % passando na peneira											
N°10	50máx.		51min.								
N°40	30máx.	30máx.	10máx.	35máx.	35máx.	35máx.	35máx.	36min.	36min.	36min.	36min.
N°200	15máx.	25máx.									
Características da fração passando na peneira N°40											
Limite de Liquidez				40máx.	41min.	40máx.	41min.	40máx.	41min.	40máx.	41min.
Índice de Plasticidade	6máx.	6máx.	NP	10máx.	10máx.	11min.	10min.	10máx.	10máx.	11min.	11min.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4máx.	4máx.	8máx.	12máx.	16máx.	20máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia.			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosas.				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como Subleito	Excelente a bom							<u>Sofrível a mau</u>			

Fonte: DNIT (2006)

Logo a seguir estão descritas as características de cada grupo e subgrupo de solos do definido pelo DNIT (2006):

Grupo A-1: O material deste grupo é constituído de mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulhos, areia grossa, areia fina e um aglutinante de solo não plástico ou fracamente plástico. Inclui também fragmentos de pedra, pedregulho, areia grossa, cinzas vulcânicas, etc., que não contêm aglutinantes de solo.

Subgrupo A-1-a: Inclui os materiais contendo, principalmente, fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado.

Subgrupo A-1-b: São os materiais constituídos, principalmente, de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado.

Grupo A-2: Inclui grande materiais que se situam entre os grupos A-1 e A-3 e também entre os materiais constituídos de mistura silte-argila dos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7. Inclui todos os solos com 35% ou menos passando na peneira nº 200, mas que não podem ser classificados como A-1 ou A-3, devido ao teor de finos que contêm, ou a plasticidade, ou ambos excedendo os limites estabelecidos para os citados grupos.

Subgrupos A-2-4 e A-2-5: Solo contendo 35% ou menos, passando na peneira nº 200, com uma porção menor retida na peneira nº 40, possuindo as características dos grupos A-4 ou A-5. Materiais tais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos para o Grupo A-1, e ainda areia fina com silte não plástico excedendo os limites do Grupo A-3.

Subgrupos A-2-6 e A-2-7: Solos semelhantes aos descritos nos subgrupos A-2-4 e A-2-5-, exceção feita da porção de finos que contém argila plástica com características dos grupos A-6 ou A-7. Os efeitos combinados dos índices de plasticidade maiores que 10 e porcentagem passando na peneira nº 200, maiores que 15, estão refletidos nos valores dos índices do grupo de 0 a 4.

Grupo A-3: O material deste grupo é areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou possuindo pequena quantidade de silte não plástico. Inclui também misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e pedregulho depositado pelas correntes.

Grupo A-4: O solo deste grupo é siltoso não plástico, ou moderadamente plástico, possuindo, geralmente, 5% ou mais passando na peneira nº 200. Este grupo inclui também misturas de solo fino siltoso com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 8, as porcentagens crescentes de material grosso, dando origem a valores decrescentes para os índices de grupo.

Grupo A-5: Este grupo tem como solo típico aqueles semelhantes ao que foi descrito no A-4, exceto que ele é, geralmente, de caráter diatomáceo ou micáceo, altamente elástico, conforme indica seu elevado limite de liquidez. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 12; esses valores crescentes revelam o efeito combinado do aumento dos limites de liquidez e das porcentagens decrescentes de material grosso.

Grupo A-6: O solo típico deste grupo é argiloso, plástico, tendo, geralmente, 75% ou mais de material passando na peneira nº 200, incluindo também misturas de solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200. Os solos deste grupo comumente sofrem elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 16, esses valores crescentes mostram o efeito combinado do aumento dos índices de plasticidade e diminuição dos materiais grossos.

Grupo A-7: O solo deste grupo é semelhante ao descrito no grupo A-6, com a diferença que possui as características de alto limite de liquidez do grupo A-5, podendo ainda ser elástico e estar sujeito a elevada mudança de volume. Os valores dos índices do grupo variam de 1 a 20; este aumento indica o efeito combinado de crescimento dos limites de liquidez e dos índices de plasticidade, bem como a diminuição dos materiais grossos.

Subgrupo A-7-5: Índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume.

Subgrupo A-7-6: Inclui materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume.

2.1.4 Materiais aplicados a pavimentos

Como demonstra DNIT (2006) todos os materiais aplicados em pavimentação sejam eles granulares ou finos são classificados por sua granulometria, índices físicos e parâmetros de desempenho mecânico, sendo os solos geralmente os materiais mais empregados devido a sua compressibilidade. Para os materiais de base, sub-base e reforço do subleito, empregam-se métodos de seleção e de caracterização de propriedade, na qual consiste em uma etapa preliminar em averiguar os materiais disponíveis quanto às suas características de natureza para serem empregados na estrutura dos pavimentos. As características de natureza interferem nas propriedades geotécnicas obtidas no estado compactado, esses materiais compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com a sua função na estrutura (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Ademais, os materiais empregados são constituídos por agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros. É importante ressaltar que vêm sendo empregados, cada vez mais, materiais como agregados, fíleres, e mesmo materiais com poder pozolânico, reciclados de diferentes origens, dos próprios pavimentos ou de obras civis diversas (edificações, viadutos, entre outras) e de resíduos industriais de diferentes fontes (escórias, produtos da mineração e de termoelétricas, borrachas, plásticos, etc (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Os solos mais utilizados em pavimentação no Brasil são os solos residuais ou saprolíticos grossos, que apresentam graus de evolução variáveis, os solos lateríticos, a qual provém da intemperização dos saprolíticos de diferentes origens ou de colúvios antigos, com cores predominantes de vermelho e amarelo, os cascalhos lateríticos, que são camadas concrecionadas por aporte de hidróxidos de ferro de percolação, evaporação e oxidação e areias e pedregulhos aluvionares de rios e depósitos marginais, terraços, etc. Estes solos sedimentares estão espalhados por todo o território brasileiro (MEDINA *et al.*, 2005).

Ademais, os materiais e solos são divididos em dois grandes grupos, que são os granulares (constituído pela fração areia ou agregado miúdo, pelo pedregulho ou agregado graúdo, e ainda os mais grosseiros) e os finos (silte e argila ou fíler no caso de misturas asfálticas), sendo que todos os solos ou materiais que possuam mais de 35% de finos (passantes na peneira 200) são considerados materiais finos visto que a matriz tende a ser de um solo fino, que comanda as propriedades geotécnicas. Tradicionalmente, no meio rodoviário, tem-se preferência pelos materiais granulares para compor camadas de base, sub-base e reforço do subleito (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Para os materiais granulares com frações de finos, passantes na peneira 200, costuma-se tradicionalmente limitar a porcentagem e a atividade dessas frações de solo para uso como materiais de construção de pavimentos. A limitação dos finos, feita em geral pela plasticidade (empregando os limites de Atterberg, como limite de liquidez e índice de plasticidade), advém do fato que, na maior parte das vezes esses finos reduzem a permeabilidade dos materiais e sua rigidez, aumentam sua deformabilidade e, principalmente, aumentam a expansão volumétrica em presença de água, o que causa também uma redução da sua resistência. Mas, essas características indesejadas dos finos podem não ser observadas em solos tropicais, cuja natureza, microestrutura e propriedades mecânicas podem diferir substancialmente dos solos finos que ocorrem nas regiões de clima frio e temperado (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Para além dos solos, os rejeitos minerários de industriais têm a possibilidade de ampliar o campo de aplicação das técnicas de estabilização de solos em pavimentação,

podendo acrescer os materiais já então utilizados. Materiais como escórias de alto-forno, cinza volante, cal de carbureto, fosfogesso, etc (MEDINA *et al.*, 2005).

2.2 SISTEMA DE ESGOTO SANITÁRIO

2.2.1 Composição

O esgoto é uma terminologia dada às águas que depois de usadas, como águas residuárias, são eliminadas. Porém, conforme a origem a qual essa água residuária veio, ela pode ser dividida em dois grupos que são os esgotos sanitários e os esgotos industriais.

Em sua maioria os esgotos sanitários são constituídos por despejos domésticos, uma parte de águas pluviais e outra de água de infiltração.

O esgoto doméstico ou domiciliar se origina principalmente das residências, edifícios comerciais, instituições que contenham banheiros, lavanderias, ou qualquer outro dispositivo que utilize a água para finalidade doméstica.

Os esgotos costumam ser classificados em dois grupos principais, que são os esgotos sanitários e os esgotos industriais, os primeiros são constituídos essencialmente de despejos domésticos, uma parcela de água pluvial (JORDÃO *et al.*, 2011).

Enquanto que os esgotos industriais são extremamente diversos, provém de qualquer utilização de atividade industrial e adquirem características próprias em função do processo industrial empregado. Assim sendo, cada indústria deverá ser considerada separadamente (JORDÃO *et al.*, 2011).

O lodo de é um resíduo sólido e deve seguir os preceitos da Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei nº 12.305 de 2010 que define resíduos sólidos como sendo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, e cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, no estado sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água.

Segundo a NBR 10.004 (2004) os resíduos são classificados de acordo com os seus potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública para garantir o correto manuseio e destinação. Seus riscos estão diretamente relacionados às suas propriedades físicas, químicas

e/ou infecciosas. Portanto, a norma divide os resíduos em duas categorias: resíduos classe I (perigosos) e resíduos classe II (não perigosos), podendo ser resíduos classe II A (não inertes) e resíduos classe II B (inertes).

As características do lodo variam à medida que passa por várias fases de tratamento, na qual a desidratação faz com que aumente a concentração de sólidos totais (secos sólidos) e redução do volume de lodo. Por outro lado, na digestão ocorre a diminuição da carga de sólidos totais (redução de suspensão de voláteis sólidos) (ANDREOLI *et al.*, 2007). Portanto, os sólidos totais podem ser divididos em sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos. A maioria dos sólidos é representada por sólidos suspensos.

Os principais resíduos sólidos gerados nas ETEs podem representar de 1 a 3 % do volume total de esgoto tratado. Existe inicialmente no estado semi-sólido, líquido ou pastoso comum teor médio de umidade de 98 %, o que corresponde a uma média de 2 % de todos os sólidos, dos quais 70 a 80 % são de matéria orgânica. No entanto, sua gestão é intrincada e cara, podendo representar até 60% dos custos operacionais totais de uma estação de tratamento de efluentes (SILVA, 2019).

Em sua composição química pode ser encontrada várias substâncias, dependendo da sua origem, tais como metais pesados, graxas, ácidos, minerais, dentre outros. Dessa maneira, as características físico-químicas dos lodos dependem da composição das águas residuárias, em consequência das variações nas características dessas e dos processos que compõem o tratamento tanto da fase líquida quanto da fase sólida.

Ademais, o lodo de depuração tende a acumular metais pesados existentes nas águas residuais, sendo esses prejudiciais à saúde dos homens e comprometem o equilíbrio do meio ambiente. De acordo com Tantawy (2012), a composição da lama de depuração e o seu conteúdo em metais pesados variam muito dependendo da origem das lamas e das opções de tratamento, podendo ser encontrados metais como arsênio, mercúrio, chumbo, dentre outros.

Enquanto ao nitrogênio orgânico presente no esgoto fresco, esse está quase todo combinado sob forma de proteína, aminoácidos e ureia, as bactérias no seu trabalho de oxidação biológica transformam tal nitrogênio em amônia, depois em nitritos e em seguida em nitratos. Dessa forma, a concentração com que o nitrogênio aparece sob estas várias formas indicam a idade do esgoto ou a sua estabilização em relação à demanda de oxigênio (JORDÃO *et al.*, 2011).

O lodo de esgoto no seu estado natural (lodo bruto) é rico em organismos patogênicos, que são bactérias, vírus, protozoários, fungos e helmintos, podendo ser de origem humana ou animal. O lodo contém facilmente odores desagradáveis, putrescíveis e em rápido

desenvolvimento. Processos de estabilização foram desenvolvidos com o objetivo de estabilizar a fração biodegradável dos produtos orgânicos matéria presente nas lamas, reduzindo assim também o risco de putrefação como diminuindo a concentração de agentes patogênicos (ANDREOLI *et al.*, 2007).

Os organismos patogênicos são constituintes do lodo que causam mais preocupantes no seu processamento e eliminação final. Bactérias, vírus, protozoários e parasitas intestinais e seus os ovos estão presentes nas lamas de depuração, e uma parte significativa deles são agentes causadores de doenças. A quantidade de agentes patogênicos encontrados no lodo é proporcional às condições sanitárias da comunidade. Por conseguinte, quanto maior for a prevalência de doenças de origem hídrica na comunidade, maior será o cuidado necessário para manusear a lama, principalmente quando a via de eliminação e reciclagem agrícola (ANDREOLI *et al.*, 2007).

2.2.2 Geração, tratamento e destinação

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), para o ano de 2021, estima-se que para uma população atendida de 117,3 milhões de pessoas a média do índice de atendimento total com rede de esgotos foi de 55,8%, e o índice de tratamento de esgotos do país foi igual a 51,2% dos esgotos gerados. Para a região nordeste o índice de atendimento foi de 30,2%, demonstrando que apesar de um número expressivo de indivíduos atendidos, precisa-se aumentar ainda a porcentagem de atendimento.

O tratamento de esgoto consiste desde a captura feita pela rede coletora, no qual as tubulações que recebem os despejos encaminham os seus efluentes às unidades de tratamento.

O esgoto é tratado em três estágios distintos: líquido, gasoso e sólido. O tratamento em fase líquida refere-se à recuperação da maior parte da água presente no esgoto, removendo as partículas indesejadas até que ela atinja suas propriedades finais e seja lançada no receptor. O processamento em fase gasosa envolve o tratamento de gases produzidos durante o processamento que são de cheiro desagradável ou potencialmente perigoso para a saúde e o meio ambiente. O tratamento em fase sólida envolve a remoção de particulados ou resíduos sólidos durante o tratamento em uma estação de tratamento de efluentes (ETE) (SILVA, 2019).

Portanto, essas águas residuais geralmente passam por processos de tratamento fundamentais. A etapa principal na qual consiste no processo para remover sedimentos, mas

com todos os minerais dissolvidos ainda no efluente. A etapa secundária é um processo biológico onde a matéria biológica dissolvida é progressivamente convertida em uma massa sólida. Um passo terciário, que é um químico e/ou processo biológico, também podem ser empregados para remover nutrientes, especialmente elementos como nitrogênio e fósforo, sendo a principal preocupação de eutrofização das águas. Após a etapa terciária, o efluente pode ser adequado para descarga em um riacho, rio, lago, ou pântano, ou usado para irrigação de área pública (QIN LU *et al.*, 2012).

No processo físico, que consiste na remoção de substâncias fisicamente separáveis dos líquidos, inclui remoção de sólidos grosseiros, sólidos sedimentáveis e sólidos flutuantes (JORDÃO *et al.*, 2011). Enquanto no processo biológico, que depende da ação de microrganismo, os principais processos são a oxidação biológica, que pode ser aeróbica ou anaeróbica, como reatores anaeróbios e a digestão de lodo com fossa séptica.

Para o processo químico, que se emprega quando o processo físico e biológico não atende de maneira geral, ou seja, nas características que se deseja remover. Esses processos químicos são floculação, oxidação química, cloração, entre outros (JORDÃO *et al.*, 2011).

O processo de digestão pode ser anaeróbico, aeróbico ou mesmo uma combinação de ambos. Segundo Tantawy *et al.* (2012), a escolha do tratamento depende da quantidade de lodo e de locais com específicas condições.

O processo de digestão anaeróbica, caracterizado pela estabilização das lamas orgânicas, a matéria bioquímica é destruída por diversos grupos de organismos anaeróbios e facultativos num ambiente sem oxigênio. A evolução deste método necessita apenas de confinamento em condições favoráveis às reações bioquímicas inerentes à fermentação natural (JORDÃO *et al.*, 2011).

Essa digestão é um processo em três fases, capaz de estabilizar diferentes tipos de matéria orgânica, sendo a primeira com enzimas que decompõem compostos orgânicos complexos, tais como celulose, proteínas e lipídeos, em compostos solúveis, tais como ácidos gordos, álcool, carbono dióxido e amoníaco. A segunda etapa, os microrganismos convertem os produtos da primeira fase em acético e propiônico, ácido, hidrogênio, dióxido de carbono, além de outros orgânicos de baixo peso molecular. Na última etapa, dois grupos de organismos formadores de metano entram em ação, um grupo produz metano a partir de dióxido de carbono e hidrogênio, enquanto um segundo grupo converte os acetatos em metano e bicarbonato (ANDREOLI *et al.*, 2007).

A lama crua concentra uma grande variedade de organismos patogênicos. A estabilização anaeróbia funciona com a finalidade de destruir ou reduzir a níveis

preestabelecidos os microrganismos e patogênicos, estabilizar substâncias instáveis ou matéria orgânica, reduzir o volume de lodo através de fenômenos de liquefação, gaseificação e adensamento, assim como tem a finalidade de dotar o lodo de características favoráveis a redução de unidade (JORDÃO *et al.*, 2011).

O tratamento aeróbio, de crescimento em suspensão na massa líquida e com retenção de biomassa é também um processo de oxidação bioquímica. A introdução de oxigênio pode ser feita através de diferentes formas, como por meio de aeradores superficiais, sistemas com difusores, até mesmo oxigênio puro pode ser introduzido diretamente nos tanques. Os sólidos biológicos crescem na forma de flocos e são mantidos em suspensão pelo equipamento de aeração. A retenção de biomassa é feita através de recirculação do lodo separado nos decantadores acoplados aos reatores biológicos (VON SPERLING, 1997).

No reator ocorrem as reações bioquímicas de remoção da matéria orgânica e, em determinadas condições, da matéria nitrogenada. No decantador secundário ocorre a sedimentação dos sólidos (biomassa). A biomassa consegue ser facilmente separada no decantador secundário devido a sua propriedade de flocular. Tal se deve ao fato das bactérias possuírem uma matriz gelatinosa, que permite a sua aglutinação e de outros microrganismos, como protozoários (VON SPERLING, 1997).

O processo é caracterizado pela degradação da matéria orgânica com alimentação de ar, ocorrendo em continuação após esgotarem as reservas de alimento, gerando, portanto, uma autodestruição das células dos organismos, sendo uma fase de respiração endógena (JORDÃO *et al.*, 2011).

Para além, dentre os sistemas de tratamento convencionais de uma estação de tratamento de produção de lodo aeróbio, temos como exemplo, um esquema de como funciona o sistema por lodos ativados na figura referida abaixo.



Fonte: Sabesp (2023)

Ademais, a disposição final mais utilizada no Brasil seria a disposição em aterro sanitário, na qual a técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos estaria sendo feita no solo, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra (ABNT, 1992). Ainda assim, o subsolo fica susceptível a ser poluído devido aos líquidos provenientes do aterro que podem atingir o lençol freático.

Para que um sistema de tratamento de esgoto seja considerado eficaz, a disposição deve ser feita de forma adequada, podendo ser destinado de inúmeras formas, desde a aplicação do lodo na agricultura até a sua incorporação na geração de novos produtos.

O complicador no uso de fertilizantes como fonte de nutrientes nos cultivos agrícolas é em função da exigência das culturas para obtenção de alta produtividade e qualidade. A utilização de adubos orgânicos como fonte alternativa de nutrientes e matéria orgânica exige conhecimento científico da interação entre os fatores físicos, químicos e biológicos do solo e dos aspectos fitotécnicos das culturas (COSTA, 2010).

Por fim, dentre os destinos alternativos, a escolha deve ser baseada no ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

2.2.3 Secagem

Um leito de secagem é uma unidade projetada para receber o lodo visando desidratá-lo e elevar o teor de sólidos a fim de reduzir o volume, na qual o processo de secagem ocorre de forma natural por perda de umidade e evaporação.

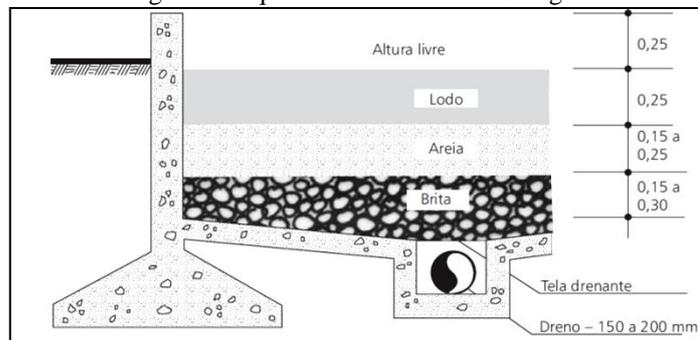
As características do lodo seco são variáveis de acordo com o tipo e equipamento de desidratação e o uso de produtos químicos, além do teor de sólido (JORDÃO *et al.*, 2011). A parte líquida separada, que retorna ao início da estação de tratamento, costuma conter elevada carga de Demanda Bioquímica de oxigênio (DBO) e sólidos em suspensão, portanto, se opta por tratar essa parte separadamente antes de sua incorporação ao fluxo afluyente de esgotos.

A tecnologia de leitos de secagem tem sido utilizada para remoção de água de diversos tipos de tratamento de águas residuárias, e em alguns casos, de abastecimento desde o início do século XX (ACHONC *et al.*, 2008). Ademais, dentre as evoluções ocorridas nesse sistema, podem ser citadas o leito de secagem a vácuo, leitos de secagem de tela em cunha e leitos pavimentados.

Para Achon *et al.* (2008) no leito de drenagem tradicional o tempo de remoção de água constituiu-se na somatória do tempo de drenagem e de evaporação da água, assim, tanto as condições de drenagem quanto às condições climáticas têm devido importância.

Souza *et al.* (1999) afirma que os leitos de secagem constituem o método mais utilizado para desidratação de esgotos sanitários nos EUA, sendo dois terços das estações que utilizam esse método. Os leitos de secagem são constituídos por tanques rasos, com duas ou três camadas de areia com granulométrica diferente e cerca de 30 cm de espessura. O sistema completo é composto por camada suporte, meio filtrante e sistema drenante.

Figura 3-Esquema de um Leito de Secagem



Fonte: Souza *et al.* (1999)

Tradicionalmente, o fundo do leito é geralmente de solo, podendo, às vezes, receber uma camada de concreto simples. O lodo é espalhado em camadas de 20 a 30 cm e uma nova camada deve ser lançada somente após a secagem total do lodo (SOUZA *et al.*, 1999).

Segundo Achon *et al.* (2008), a secagem pode ser feita via natural ou mecanizada. A secagem natural pode ser feita em leitos de secagem ou lagoas de lodo. As lagoas de lodo não devem ser consideradas soluções definitivas muito adequadas. Os leitos de secagem de lodos devem ser empregados de forma mais vantajosa em pequenos sistemas de tratamento. A dificuldade operacional com a remoção do lodo desidratado e a presença excessiva de águas de chuva, portanto as máquinas desaguadoras têm o seu emprego crescido nos últimos anos, principalmente filtros-prensa de placas ou de esteira, bem como os decantadores centrífugos.

Apesar do custo relativamente alto dessas máquinas, a facilidade operacional viabiliza a sua adoção. No Brasil é prática corrente o condicionamento químico com cloreto férrico e cal, em progressiva prática de substituição pelo uso de polieletrólitos.

Portanto, o objetivo dessa estabilização de lodo é reduzir o número de micro-organismos patogênicos presentes; eliminar odores desagradáveis e inibir, reduzir ou eliminar a possibilidade de deterioração do lodo. A estabilização é alcançada pela redução biológica do conteúdo de voláteis, oxidação química de voláteis, adição de produtos químicos ao lodo

para torná-lo inóspito para micro-organismos e aplicação de calor para desinfecção (DAVID, 2002).

Os principais equipamentos de desidratação mecânica adequados para a desidratação de lodos em estações de tratamento de esgoto de grande e médio porte do mercado são: centrífugas, também conhecidas como centrífugas ou decantadores centrífugos; filtro prensa de correia e filtro prensa de placas (DAVID, 2002).

Segundo David (2002), a separação entre as fases líquida e sólida durante o tratamento do lodo gerado na ETE é uma tarefa difícil e cara se comparada a outras operações de tratamento de efluentes. O método de separação mecânica entre líquidos e sólidos, comumente conhecido como desidratação mecânica ou mesmo desaguamento, pode ser realizado por: filtros prensa, filtros prensa de correia e centrífugas. Por meio desses processos, pode-se obter teores de sólidos de 20 a 30%, até 40% utilizando cal na etapa de condicionamento.

2.3 CINZA DE LODO

Para obtenção de cinza de lodo é necessária uma incineração desse. Esse procedimento fundamenta-se como uma forma de diminuir o seu volume e principalmente a sua matéria orgânica, obtendo assim um melhor aproveitamento para a disposição do lodo. Assim, a incineração é o procedimento pela qual se usa a queima como tratamento do lodo reduzindo-o à cinza, sendo inerte em relação ao seu estado natural.

Segundo Lynn *et al.* (2015), o processo de incineração reduz os resíduos em aproximadamente 70% em massa e 90% em volume, tornando-se, portanto, numa das mais apropriadas opções para lidar com os volumes produzidos e os elementos potencialmente inseguros que o lodo de esgoto contém.

Segundo Santos (2003), o volume de cinzas é da ordem de 4% do volume de lodo desidratado que entra no incinerador. A incineração envolve a destruição da matéria orgânica presente no lodo por combustão, que é feita com excesso de oxigênio.

As cinzas de lodo de esgoto, segundo Tantawy *et al.* (2012), têm Al_2O_3 (óxido de alumínio) elevado, Fe_2O_3 (óxido de ferro III) e CaO (óxido de cálcio) devido ao uso de alúmen, sais férricos, e cal no tratamento de águas residuais. A alta porcentagem de P_2O_5 (pentóxido de fósforo) é possivelmente devido aos detergentes domésticos.

Há também poluentes nas emissões atmosféricas na forma sólida, segundo Santos (2003), na qual é formado por matéria particulada fina composta de metais pesados e sólidos em suspensão.

Segundo Tantawy *et al.* (2012), as perdas de peso que ocorrem na temperatura intervalo 200-320°C e 330-390°C são devidos à emissão de matéria orgânica volátil e combustão de não voláteis complexos, respectivamente. Isto porque o lodo é composto de várias espécies de hidrocarbonetos com uma ampla gama em ponto de ebulição. Enquanto que a perda de peso que ocorre na gama de temperaturas 400-670°C é devido à combustão de carbono fixo capturado por materiais inorgânicos, eliminação de água estrutural do mineral argiloso, e decomposição de as matérias carbonáceas presentes na lama de depuração.

Após a incineração em 500°C, a absorção das faixas de matéria orgânica desaparece enquanto que as de carbonato aparecem devido à carbonatação de alguns compostos de cálcio por CO₂ (dióxido de carbono) produzido a partir de combustão incompleta de orgânicos. Incineração das lamas de depuração em 800°C conduz a uma diminuição da intensidade das bandas de absorção de sílica. Isto é uma indicação de aumento do grau de polimerização da rede de sílica como resultado da cristalização da sílica em quartzo.

Segundo Santos (2003), há dois tipos de incineradores atualmente em uso no tratamento de lodos de esgotos que é o incinerador de múltiplas câmaras e o incinerador de leito fluidizado. O primeiro incinerador é subdividido em três zonas de combustão distintas, nas quais é o superior, intermediário e inferior. Este incinerador tende a ser menos utilizado dado seu custo de operação e a qualidade do ar liberado através da chaminé. Enquanto o segundo incinerador é um vaso cilíndrico de câmara única com paredes refratárias. O leito fluidizado de areia, em contato com o lodo, retém as partículas orgânicas até a completa destruição. A operação em condições autógenas a temperatura superior a 815°C garante a completa destruição de compostos orgânicos voláteis a um custo competitivo.

2.4 ESTABILIZAÇÃO

Estabilização de solos para uso em pavimentos são procedimentos na qual se espera aumentar a resistência e tornar mais durável o material a qual se utiliza, fazendo-o resistir, por mais tempo, aos esforços do tráfego e os efeitos das intempéries.

Segundo Baptista (1976), do ponto de vista rodoviário, denomina estabilização de solo aos métodos de construção nos quais os solos são tratados com aditivos ou sem eles, de modo

que se tenha um solo capaz de suportar as cargas de tráfego, sem deslocamentos apreciáveis, resistindo ao desgaste e às intempéries sem degradar.

Existem alguns tipos de estabilização de solo, geralmente divididos em três categorias principais: meios mecânicos (aumento da energia de compactação através do rearranjo de partículas); estabilização granulométrica (mistura de solo, adição ou remoção de partículas); e aqueles que utilizam aditivo como cimento, cal, asfalto, etc. método químico (BARROS, 2015).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), é usável a estabilização de solo com cimento. Para estabilizar economicamente o solo com cimento, este deve conter certa proporção de areia e, se a proporção de argila for muito elevada, então, além de apresentar grande retração, pode ser necessário um teor de cimento elevado e tornar-se demasiado caro. Uma faixa viável é de aproximadamente 5% a 9% de cimento em massa. Solos corrigidos com cimento são usados principalmente para alterar a plasticidade e melhorar a trabalhabilidade de certos solos na pista ou para atender às especificações de tamanho de partícula.

Seja para endurecimento, trabalhabilidade ou redução de expansão, a estabilização do solo com cal segue os mesmos objetivos da mistura de cimento. A cal do solo, preferencialmente aplicada sobre solo argiloso ou siltoso, é utilizada principalmente para o reforço de leitos ou sub-bases de estradas. A capacidade estabilizante da cal depende da sua pureza e origem. A reação rápida (imediate) resulta em floculação e troca iônica, o que reduz a plasticidade, que se traduz em melhor trabalhabilidade do solo e redução da expansividade (BERNUCCI *et al.*, 2022).

2.5 ENSAIOS GEOTÉCNICOS

De acordo com critérios delineados pelo DNIT (2006), para que se possa elaborar um projeto em pavimentação rodoviária requer-se uma investigação geotécnica, sendo, portanto, ensaios de caracterização física e mecânica com o intuito de avaliar se os materiais que possivelmente serão empregados nas camadas dos pavimentos, possuem qualidade adequada para atender aos requisitos exigidos relativos ao tráfego que aquela rodovia estará submetida.

Por conseguinte, os estudos geotécnicos, segundo DNIT, compreendem tanto estudos do subleito, como estudos de ocorrências de materiais para pavimentação. O estudo do subleito tem como objetivo o reconhecimento dos solos visando à caracterização das diversas camadas e o posterior traçado dos perfis dos solos para efeito do projeto de pavimento.

Enquanto que o estudo de ocorrências de materiais para pavimentação tem como objetivo o reconhecimento e a caracterização dos materiais de jazidas como fonte de matéria-prima para a utilização na construção das diversas camadas de Reforço do Subleito, Sub-base, Base e Revestimento, de acordo com o projeto do pavimento.

2.5.1 Ensaio de análise granulométrica

Segundo DNIT (2006), a análise granulométrica consiste na determinação das porcentagens, em peso, das diferentes frações constituintes da fase sólida do solo. Para as partículas de solo maiores do que 0,075 mm o ensaio é feito passando uma amostra do solo por uma série de peneiras de malhas quadradas de dimensões padronizadas. Na prática, utilizam-se faixas granulométricas entre as quais deverá se situar a curva granulométrica do material a utilizar.

A análise granulométrica, para caracterizar um solo sob todos os aspectos que interessam à técnica rodoviária, para que se encontre nos parâmetros, é necessário, na maioria das vezes, ser complementada por outros ensaios DNIT (2006), tais como ensaio de granulometria por peneiramento e ensaios de granulometria por sedimentação.

Segundo Baptista (1974), a análise granulométrica é a única maneira de identificar os solos e chegar ao conhecimento exato dos seus aspectos comportamentais aliado as suas constantes físicas (limite de liquidez e limite de plasticidade).

Para o ensaio de granulometria toma-se uma amostra representativa do solo a ser ensaiado e pesado, obtendo-se o peso da amostra úmida que deve ser aproximadamente 1500g, portanto, para dar continuidade no procedimento:

Passa-se toda a amostra na peneira nº 10, para eliminar todo o material fino. Transfere-se o solo lavado para uma cápsula e seca-se a temperatura de 105 °C a 110 °C. Faz-se, então, o peneiramento do solo até a peneira nº 10. Da fração que passa na peneira nº 10 toma-se cerca de 100 g para o peneiramento fino (da peneira nº 10 à de nº 200), e cerca de 50 g para determinação da umidade higroscópica. Lava-se a amostra destinada ao peneiramento fino na peneira nº 200, seca-se a parte retida, em estufa a 105 °C a 110 °C, procedendo-se, então, ao peneiramento entre as peneiras nº 10 e nº 200.

Enquanto o ensaio de granulometria por sedimentação é o procedimento pela qual se realiza com a fração da amostra representativa do solo que passa na peneira nº 10, para dar continuidade no procedimento:

Toma-se cerca de 120 g, no caso de solos arenosos, ou cerca de 70 g, no de solos siltosos ou argilosos, coloca-se em um recipiente com água destilada, devendo o solo permanecer em imersão durante 18 horas. Passando este tempo, adiciona-se defloculante. Leva-se ao dispersor. Completa-se o volume adicionando água destilada até o traço indicando 1000 ml. Agita-se, deposita-se a proveta e faz-se as leituras densimétricas de acordo com os tempos especificados para o ensaio de sedimentação. Terminando o ensaio de sedimentação, lava-se o solo na peneira nº 200, seca-se em estufa à temperatura de 105 °C a 110 °C, procedendo-se ao peneiramento compreendido entre as peneiras nº 10 e nº 200. Para o cálculo por sedimentação é necessário conhecer o peso específico dos grãos do solo, sendo realizado com um picnômetro de 500 ml e usando a fração da amostra representativa do solo que passa na peneira nº 10 e coloca-se em uma cápsula com água destilada em quantidade suficiente para se obter pasta fluida. Coloca-se a pasta no dispersor e liga-se este durante 15 minutos. Transfere-se a amostra para o picnômetro e junta-se água destilada até aproximadamente metade de seu volume. Faz-se vácuo no picnômetro durante 15 minutos e, em seguida, adiciona-se água destilada até a marca de calibração. Enxuga-se o picnômetro e pesa-se, anotando-se, a seguir, a temperatura da água.

Portanto, para Baptista (1974), o estudo do tamanho das partículas ou grãos do solo e sua distribuição, se dá porcentagem dos grãos que passam em tal peneira, determinando a graduação das partículas constituintes do solo. Na tabela a seguir, pode-se verificar a relação das peneiras para análise granulométrica:

Tabela 3-Designação americana e brasileira de peneiras

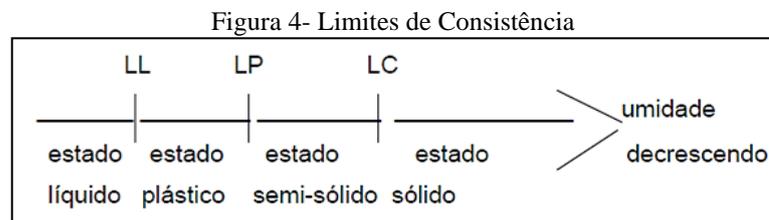
Designação americana em polegadas	Designação brasileira em milímetros
3"	76,2
2 ½"	63,5
2"	50,8
1 ½"	38,1
1"	25,4
¾"	19,1
½"	12,7
3/8"	9,52
n.º 3	6,68
n.º 4	4,8
n.º 8	2,4
n.º 10	2
n.º 16	1,2
n.º 30	0,6
n.º 40	0,42
n.º 50	0,3
n.º 100	0,15
n.º 200	0,075

Fonte: adaptado de Baptista (1974)

2.5.2 Ensaio limites de consistência

Limites de consistência permitem avaliar a plasticidade dos solos, por conseguinte, objetiva a caracterização de um solo segundo a sua plasticidade, está à determinação do limite de liquidez e a do limite de plasticidade. Logo, quando a umidade de um solo é muito grande, ele se apresenta como um fluido denso e se diz no estado líquido, a seguir, à medida que se evapora a água, ele se endurece, passando do estado líquido para o estado plástico, para além, a umidade correspondente ao limite entre os estados líquido e plástico é denominada limite de liquidez, por último ao continuar a perda de umidade, o estado plástico desaparece, passando o solo para o estado semi-sólido, sendo neste ponto, a amostra de solo se desagrega ao ser trabalhado DNIT (2006).

Em vista disso, segundo o DNIT, a umidade correspondente ao limite entre os estados plásticos e semi-sólidos é denominada limite de plasticidade. Continuando a secagem, ocorre a passagem para o estado sólido. O limite entre esses dois últimos estados é denominado limite de contração, onde é possível verificar-se no esquema abaixo:



Fonte: DNIT (2006)

Portanto, a diferença numérica entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) fornece o índice de plasticidade (IP) conforme equação abaixo.

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

Tal índice de plasticidade define a zona em que o terreno se acha no estado plástico e, por ser máximo para as argilas e mínimo para as areias, fornece um valioso critério para se avaliar o caráter argiloso de um solo. Quanto maior o IP, mais plástico será o solo. Quando um material não tem plasticidade (areia, por exemplo), escreve-se $IP = NP$ (não plástico).

Segundo Caputo (1988), o IP pode ser interpretado como o percentual máximo de água que pode ser adicionado numa amostra de solo a partir de seu LP, podendo-se ajuizar o caráter argiloso de um solo. Quando não se tem plasticidade, ou seja, índice de plasticidade nulo, NP (não plástico), tem-se as areias por exemplo.

O Índice de Plasticidade tem importância na classificação de solos finos e também é fundamental para o gráfico de plasticidade de Casagrande, é utilizado no Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS). Ademais, ainda segundo Caputo (1988):

0– Não plástico

1 – 7 Fracamente plástico;

7 – 15 Mediamente plástico;

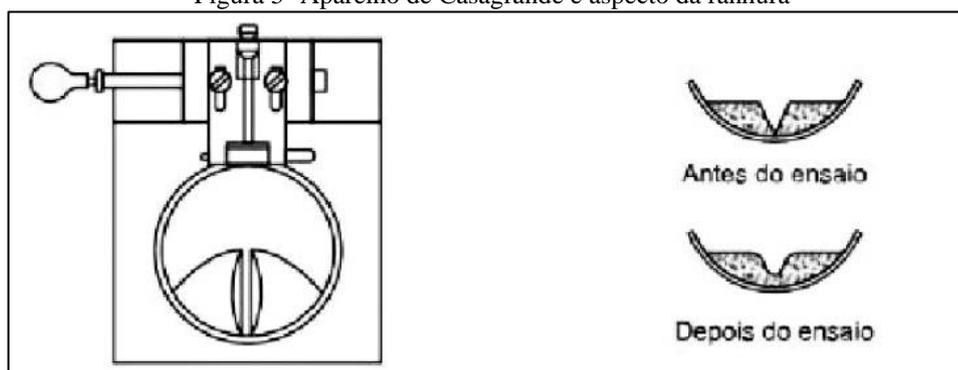
> 15 Altamente plástico.

O limite de liquidez indica a quantidade de água que pode ser absorvida pela fração do solo que passa pela peneira nº 40. Observa-se que quanto maior o LL tanto mais compressível o solo.

Em princípio, o ensaio do limite de liquidez é realizado em um aparelho denominado aparelho de casa grande, que consiste essencialmente de uma concha metálica, na qual é acionada por uma manivela, sendo, portanto, usada após a calibragem correta do aparelho. O ensaio é feito com a fração da amostra representativa do solo que passa na peneira de 0,42 mm de abertura de malha. A quantidade de material necessária para o ensaio é de cerca de 70g. Coloca-se o material em uma cápsula e homogeneizar-se com adição de água destilada, aos poucos, até resultar em massa plástica, com auxílio de uma espátula, tendo como intuito revolver a amostra. Transfere-se parte da massa plástica, assim obtida, para a concha do aparelho, moldando-a de modo que, na parte central da concha, apresenta uma espessura aproximada de 1 cm. Coloca-se a concha no aparelho, procedendo-se, por meio de acionamento da manivela. Golpeia-se à razão de duas voltas por segundo até que as bordas inferiores e unam em 1 cm de comprimento, logo depois, apresentadas as porcentagens de umidade e no eixo das ordenadas em escala logarítmicas são representados os números de golpes DNIT (2006).

Segundo norma ABNT NBR 6459:2016, que estabelece o uso do aparelho de Casagrande, o tempo de homogeneização deve estar compreendido entre 15 e 30 minutos, sendo o maior intervalo para solos argilosos. Molda-se a amostra de modo que na parte central a espessura seja da ordem de 10mm. Ademais, deve-se dividir a massa de solo em duas partes passando o cinzel por meio desta, de modo que se abra uma ranhura na parte central da amostra

Figura 5- Aparelho de Casagrande e aspecto da ranhura



Fonte: ABNT NBR 6459(2016)

Ademais, o procedimento deve-se colocar, cuidadosamente, a concha no aparelho e golpear a amostra contra base, deixando-a cair em queda livre, girando a manivela à razão de duas voltas por segundo. Deve-se a seguir repetir a operação, de modo a obter pelo menos mais três pontos de ensaio, cobrindo o intervalo de 35 a 15 golpes.

Por fim, obtido os resultados, têm-se informação para a construção de um gráfico, no qual as ordenadas (em escala logarítmica), sejam os números de golpes e as abscissas (em escala aritmética), sejam os teores de umidade correspondentes e ajustadas a uma reta pelos pontos obtidos.

Por conseguinte, o ensaio do limite de plasticidade é realizado com uma fração da amostra representativa do solo que passa na peneira de 0,42mm de abertura de malha. A quantidade de material necessária para o ensaio é de cerca de 50g, essa amostra é colocada em uma cápsula e homogeneizada com adição de água aos poucos, até resultar em uma massa plástica. Com uma quantidade de massa plástica obtida, forma-se uma pequena bola, que será rolada sobre uma placa de vidro esmerilhada com pressão suficiente da mão, de modo a resultar em uma forma de cilindro. Quando este atingir a 3mm (verificado com o cilindro de comparação) sem se fragmentar, amassa-se o material e procede-se como anteriormente. Repete-se a operação até que, por perda de umidade, o cilindro se fragmenta quando atinge 3 mm de diâmetro. Transfere-se alguns pedaços do cilindro fragmentado para um recipiente e determina-se a umidade em estufa à temperatura de 105 °C a 110°C. Repete-se o procedimento DNIT (2006).

Segundo norma ABNT NBR 7180:2016, na impossibilidade de se obter um cilindro de 3mm, se considera a mostra como não apresentando limite de plasticidade, ou seja, com a sigla NP (não plástico).

2.5.3 Ensaio de índice de suporte Califórnia (ISC)

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 em um corpo-de-prova até determinado ponto e a pressão necessária para que o referido pistão penetre igual profundidade num solo-padrão de brita graduada. O valor de tal relação, expressa em porcentagem, permite determinar, por meio de equações empíricas, a espessura de pavimento flexível, necessária em função do tráfego (DNIT, 2006).

O seguinte ensaio foi concebido no final da década de 1920 para avaliar o potencial de ruptura do subleito, uma vez que era o defeito mais frequentemente observado nas rodovias do estado da Califórnia naquele período. O ensaio foi concebido, portanto, para avaliar a resistência do material frente a deslocamentos significativos (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Todos os materiais são referenciados por um valor em porcentagem, representando o quão melhor ou pior é sua resistência no ensaio ISC por comparação com aqueles materiais granulares de referência (cujo valor de padrão equivale a 100%), designados. Assim, podem ser encontrados valores de ISC bem baixos, da ordem de unidades, a valores acima de 100%.

A resistência ou capacidade de suporte ISC foi correlacionada empiricamente com o desempenho das estruturas avaliadas no campo levando a um método de dimensionamento de pavimentos que fixa espessuras mínimas da estrutura dependendo do índice de suporte do subleito, de modo a limitar as tensões que nele chegam e, assim, protegê-lo da ruptura.

A resistência no ensaio ISC é uma resposta que combina indiretamente a coesão com o ângulo de atrito do material. O ISC é expresso em porcentagem, sendo definido como a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão referencial. O ensaio ISC, cujo procedimento é regido no Brasil pela norma DNIT, consiste nas seguintes etapas:

a) Compacta-se no molde o material, em cinco camadas iguais de modo a se obter uma altura total de solo com cerca de 12,5cm, após a compactação. Cada camada recebe 12 golpes do soquete (caso de materiais para subleito), 26 ou 55 (caso de materiais para sub-base e base), caindo de 45,7 cm, distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada. O peso do soquete é de 4,5 kg.

- b) Após a compactação, rasa-se o material na altura exata do molde e retira-se do material excedente da moldagem uma amostra representativa com cerca de 100g para determinar a umidade.
- c) Compactam-se outros corpos-de-prova com teores crescentes de umidade, tantas vezes quantas necessárias para caracterizar a curva de compactação.
- d) Colocam-se os corpos-de-prova imersos em água durante quatro dias.
- e) A penetração dos corpos-de-prova é feita numa prensa, a uma velocidade constante de 0,05 pol/min.
- f) Traça-se a curva pressão-penetração. Caso exista um ponto de inflexão, traça-se uma tangente à curva nesse ponto até que ela intercepte o eixo das abscissas; a curva corrigida será então essa tangente mais a porção convexa da curva original, considerada a origem mudada para o ponto em que a tangente corta o eixo das abscissas. Seja c a distância desse ponto à origem dos eixos. Soma-se às abscissas dos pontos correspondentes às penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas a distâncias c . Com isso obtêm-se, na curva traçada, os valores correspondentes das novas ordenadas, que representam os valores das pressões corrigidas para as penetrações referidas.
- g) O índice de suporte Califórnia, em percentagem, para cada corpo-de-prova é obtido pela fórmula:
- $$\text{CBR} = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}}$$
- Adota-se para o índice CBR o maior dos valores obtidos nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas.
- h) Para o cálculo do Índice de Suporte Califórnia final, registram-se de preferência, na mesma folha em que se representa a curva de compactação, usando a mesma escala das umidades de moldagem, sobre o eixo das ordenadas, os valores dos índices do Suporte Califórnia (CBR) obtidos, correspondentes aos valores das umidades que serviram para a construção da curva de compactação. O valor da ordenada desta curva, correspondente à umidade ótima já verificada, mostra o índice de Suporte Califórnia.

2.6 ESTUDOS SOBRE O EMPREGO DE CINZA À PAVIMENTAÇÃO

Há pesquisas envolvendo a técnica de estabilização de solo com cinza de lodo para uso em pavimentação. Leda (2012) investigou o ganho de resistência à compressão de um solo

classificado como A-2-4 (areia siltosa) com cinza de ETE, assim como, com agentes estabilizantes, como a cal. O autor considerou percentuais de misturas ao solo de 5%, 10%, 15% e 20%, havendo valores de ISC de 9%, 33%, 20% e 9%, dosou-se as misturas com cal e cimento, chegando aos resultados para os ensaios de ISC um ganho de capacidade de suporte quando adicionados à cal e o cimento como estabilizantes e uma redução do ISC quando foi adicionada emulsão.

Alves (2019) estudou uma análise laboratorial dos lodos desidratados vindos do processo de potabilização de água das captações do Sistema Rio das Velhas e Sistema Rio Manso/Paraopeba, buscando verificar a viabilidade de utilização dos mesmos em camadas de pavimento, os resultados referentes ao ISC indicam que os lodos poderão ser utilizados como reforço do subleito e sub-base de pavimentos, sendo que os mesmos possuem capacidade de suporte tal quais valores de ISC são de 36,3% e 62,1%.

Enquanto Pereira (2012), considerado um solo de classificado como ML (silte inorgânico) por método SUCS e A-4 (solo siltoso) por TRB, demonstrou que a partir da comparação dos comportamentos da resistência à compressão simples, é possível afirmar que houve aumento da resistência para todos os teores de cinza e cimento incorporados a misturas com 86% solo + 9% cimento e 5% cinza obteve-se uma média de 24,22kgf/cm² e para 61% solo + 9% cimento e 30% obteve-se uma média de 27,21kgf/cm².

Kelm (2014) a partir da análise MR, considerando um solo classificado como SC (areia argilosa) para sistema SUCS e no sistema HRB, o solo é classificado como A-7-6 (argila plástica), chegando a obter valores de MR inversamente proporcionais ao teor de lodo adicionado, ou seja, não trazendo nenhuma melhoria aos materiais em termos de deformabilidade. Entretanto, as misturas com estabilizantes, cal ou cimento, para os dois materiais: solo, pó de pedra e lodo nas condições utilizadas apresentaram valores de modulo de resiliência satisfatórios para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos.

2.7 CONCLUSÃO

Alicerçado ao levantamento bibliográfico apresentado, infere-se que o tratamento de esgoto sanitário, como pode ser discutido, é de grande relevância para a sociedade hodierna, uma vez que se produz cada vez mais esgoto nas grandes cidades, portanto, um tratamento adequado proporciona perenidade dos cursos d'água a qual tal produto poderia ser lançado,

consolidando, como consequência, uma melhor qualidade de vida para a população. Por conseguinte, deve-se buscar alternativas de disposição final dos resíduos gerados no processo de tratamento, tal qual a incineração, que é a redução do crescente volume de lodo de esgoto produzido, mas que, para ser dada como solução completa de, deve ser incentivado o reaproveitamento das suas cinzas.

Para tal, a utilização deste material, quando inerte, em pavimentação seria de grande conveniência, pois utilizado na concepção de camadas de pavimento flexível, por se tratar de uma matéria com grandes condições de aproveitamento, sendo utilizado na forma puro ou estabilizado quimicamente com cal ou cimento.

Logo, como os pontos de captação de esgoto para tratamento geralmente estão localizados próximos aos centros das cidades com grande aglomeração de atividades humanas, a utilização dos mesmos em camadas dos pavimentos das vias urbanas, traria uma maior viabilidade econômica, tanto para as estações de tratamento, como para o processo de construção de pavimentos, na qual deve-se buscar material em jazidas em todo processo. Trazendo consigo, maior rentabilidade econômica de utilização e encurtamento de distâncias intermédias transporte para a sua execução.

3 MATERIAS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentados os materiais utilizados e os procedimentos metodológicos adotados para a realização deste estudo, assim como os materiais utilizados na pesquisa, sendo estes, a cinza de lodo, proveniente da calcinação do lodo oriundo da estação de tratamento ETE Cabanga, solo obtido por meio de uma pesquisa adjacente em laboratório da UFPE, sendo um solo recorrente, de característica predominante de finos, assim como os critérios adotados para a escolha desses materiais. Logo, o objetivo é fornecer uma visão geral completa das etapas envolvidas na pesquisa e das ferramentas utilizadas para coleta e análise de dados para que os objetivos propostos sejam alcançados. Para mais, todos os ensaios foram realizados no Laboratório de solos e instrumentação (LSI) da UFPE, assim como Laboratório de Construção Civil do DECIV/UFPE.

3.1 MATERIAIS EMPREGADOS

3.1.1 Resíduo de ETE

Foi-se coletada uma amostra representativa de lodo proveniente da ETE Cabanga. Essa amostra foi submetida a uma caracterização detalhada, incluindo análises físicas, junto ao solo, em composição, para determinar propriedades relevantes para o uso em pavimentação.

Para mais, a amostra foi transformada em cinza de lodo, a qual é um subproduto resultante da incineração e tratamento térmico desse, sendo ocorrido no laboratório de Construção Civil do DECIV/UFPE. Portanto, este subproduto foi obtido por meio da queima controlada do lodo, resultando na redução do volume e na eliminação de materiais orgânicos, bem como na concentração de minerais e metais presentes no lodo original.

3.1.2 Solo

Considerando Oliveira *et al.* (2016), no subsolo presente misturadas grosseiras como argila e areia ou em camadas bem definidas de espessuras diversas. Evidencia-se,

portanto, predominância de solos argilosos ou siltosos no subsolo da cidade do Recife, optou-se por selecionar, inicialmente por meio de análise visual, um material que apresentasse características físicas próprias dessa fração granulométrica, além optar-se por um solo de característica predominante de finos, pois incorporar finos em solos finos apresenta um desafio significativo na engenharia geotécnica, especialmente em projetos de pavimentação e construção de infraestrutura.

O processo de incorporação visa melhorar as propriedades do solo fino, como a capacidade de suporte, a estabilidade e a drenagem. A baixa capacidade de suporte em solos finos pode limitar sua utilização em projetos de engenharia. A incorporação de finos, como cinzas do lodo, visa melhorar essas propriedades e aumentar a viabilidade de tal uso.

O solo utilizado na pesquisa para compor as misturas com a cinza de lodo de ETE foi proveniente do laboratório da UFPE, sendo este, um solo classificado como argila siltosa (A6) segundo classificação TRB ou Areia argilosa (SC) segundo classificação SUCS. O solo A6 foi submetido a ensaios de caracterização física e granulométrica para determinar suas propriedades naturais, incluindo distribuição de tamanhos de partículas, índice de plasticidade, limite de liquidez, entre outros parâmetros relevantes. Neste estudo, foi-se analisado o solo com misturas contendo 5%, 10% e 15% de cinza de lodo em relação ao seu peso seco. O objetivo da definição de tais percentuais é observar o comportamento físico e mecânico do solo natural misturado com pequenas quantidades de agregado e compará-los, ou seja, avaliar as porcentagens que podem resultar em grandes mudanças.

Com a finalidade de caracterizar fisicamente o solo e as misturas, realizaram-se ensaios geotécnicos de limites de consistência, de compactação proctor e de análise granulométrica. Os procedimentos citados para os ensaios seguiram as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), de acordo com as seguintes normas: NBR 6457/2016 Amostras de solo– Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. NBR 7181/2016 Solo– Análise Granulométrica. NBR 6459/2016 Solo– Determinação do Limite de Liquidez. NBR 7180/2016 Solo– Determinação do Limite de Plasticidade. NBR 7182/2016 Solo– Ensaio de Compactação.

Os resultados desses ensaios permitiram a classificação do solo e das misturas segundo os Sistemas Unificado de Solos (*Unified Soil Classification System*) e *Transportation Research Board* (TRB).

3.2 CINZA DE LODO

O lodo de esgoto utilizado neste estudo foi proveniente da estação de tratamento de esgoto Cabanga, localizada na Zona Sul da cidade do Recife. O lodo foi coletado no mês de agosto de 2023, com ajuda dos funcionários da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA). A Figura 6 apresenta a imagem de satélite da ETE. Conforme mostrado na Figura 7, o material foi coletado do reator *Huber* de coleta seletiva e armazenado em recipientes herméticos (recipiente plástico), a quantidade total de lodo natural foi de cerca de 50 litros.

Figura 6- Vista aérea a ETE Cabanga



Fonte: Google Maps (2023)

Figura 7- Reator de coleta seletiva



Fonte: autora (2023)

A ETE Cabanga é a primeira ETE que começou a funcionar no Recife em 1959 e continua sendo o maior sistema do estado até hoje, sendo composta por uma rede coletora com 214 km de extensão, 17 estações elevatórias e uma estação de tratamento, abrangendo uma área de aproximadamente 1.718 hectares. O complexo tem hoje capacidade para tratar 925 litros de esgoto por segundo por meio de centrífugas decantadoras e biodigestores. Principal responsável pela coleta, transporte, tratamento e disposição final do esgoto gerado na capital pernambucana (COMPESA, 2023).

Por conseguinte, a amostra de lodo recolhida e seca ao ar por um período de um dia (Figura 8a) obtendo-se o lodo seco *in natura*, em seguida, o lodo foi seco em estufa a 100°C por 72 horas (Figura 8b) a fim de eliminar o excedente de umidade, no Laboratório de Construção Civil do DECIV/UFPE.

Figura 8 - Procedimento de secagem das amostras: (a) Ao ar livre; (c) Na estufa



(a)



(b)

Fonte: autora (2023)

Seguidamente, o lodo foi calcinado (Figura 9b), em uma mufla elétrica da marca *Linn Elektro Therm*[®], apresentada na Figura 9a, no mesmo laboratório DECIV/UFPE, a incineração foi há uma taxa de aquecimento de 10°C/min e um tempo de permanência 120 minutos, ao fim desse processo, as cinzas foram resfriadas naturalmente até atingir a temperatura ambiente. Em seguida foi destorreado conforme Figura 9c.

Figura 9a- Mufla elétrica



Fonte: autora (2023)

Figura 9b- Lodo calcinado



Fonte: autora (2023)

Figura 9c- Cinza de lodo destorroado



Fonte: autora (2023)

A determinação da faixa de temperatura para a calcinação do lodo de esgoto baseou-se em resultados obtidos na literatura, notadamente em Tantawy *et al.* (2012), no qual a temperatura mínima para o desaparecimento da matéria orgânica indesejável é de 500°C. Dessa forma, a temperatura de 700°C foi utilizada para obtenção da cinza de lodo.

Para mais, observa-se que para uma amostra de cerca de 13 kg de lodo seco em estufa, obteve-se cerca de 5kg de cinza de lodo sendo esta uma redução de aproximadamente 60%.

3.3 COMPOSIÇÃO DOS SOLOS ESTABILIZADOS

Com base nas características dos materiais, diferentes proporções de cinza de lodo (5%, 10% e 15%) serão adicionadas ao solo natural para a formulação da mistura, visando atender às especificações de pavimentação. Serão realizados ensaios de compactação proctor com energia modificada para avaliar a influência da cinza no solo na densidade máxima e umidade ótima das misturas, assim como, será conduzido ensaio de resistência à compressão para avaliar as propriedades mecânicas das misturas com cinza, comparando-as com o solo natural.

Por conseguinte, as misturas idealizadas neste estudo foram denominadas conforme mostra a Tabela 4, sendo S o solo natural e C corresponde à cinza de lodo, sendo a sua porcentagem constituinte na composição. Salienta-se que M0 exprime o solo natural com nenhuma adição de cinza, enquanto M5, M10 e M15 representa porcentagens de 5%, 10% e 15% de adição de cinza ao solo, respectivamente.

Tabela 4- Composição das misturas

Misturas	Composição (%)	
	Solo (S)	Cinza(C)
M0	100	0
M5	95	5
M10	90	10
M15	85	15

fonte: autora (2023)

As misturas confeccionadas foram submetidas aos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC), estes foram submetidos à imersão de 96 horas (4 dias) para posterior ruptura.

3.4 ENSAIOS GEOTÉCNICOS DO SOLO NATURAL

Nesta seção, descreve-se o uso de ensaios geotécnicos necessários para caracterização do solo realizado por trabalho em desenvolvimento em laboratório LSI. A metodologia detalhada auxilia na avaliação da validade e confiabilidade dos resultados obtidos no estudo.

A escolha de utilizar a classificação de solo desenvolvida por outro pesquisador é fundamentada em diversos aspectos que contribuem para a robustez e relevância do estudo, na qual ressaltam a validade e a utilidade dessa classificação para os objetivos específicos de tal pesquisa.

Por fim, ao utilizar uma classificação de solo já estabelecida economiza tempo e recursos que seriam necessários para desenvolver uma nova classificação.

3.4.1 Análise granulométrica

Selecionou-se cuidadosamente as amostras de material granular para o ensaio de granulometria. Após a coleta, as amostras foram cuidadosamente preparadas para a análise granulométrica. Primeiramente, as amostras foram secas em uma estufa a uma temperatura constante para eliminar qualquer teor de umidade. Em seguida, as amostras foram trituradas e homogeneizadas para garantir uma distribuição uniforme das partículas antes da análise.

3.4.2 Ensaio limites de consistência

Para determinar o limite de liquidez, o pesquisador seguiu o procedimento do ensaio de Casagrande. As amostras de solo foram moldadas em um cone de Casagrande e submetidas a golpes padronizados em um aparelho de impacto. Enquanto o limite de plasticidade foi determinado usando o método da umidade da ranhura. O pesquisador moldou pequenas porções de amostra em uma forma de ranhura e adicionou água gradualmente até que a ranhura fechasse com uma profundidade de 3 mm. A umidade correspondente foi registrada e utilizada para calcular o limite de plasticidade.

Portanto, com os valores dos limites de liquidez e plasticidade em mãos, o pesquisador avaliou a natureza do solo com base na classificação de solos de acordo com o sistema de classificação de Alterberg.

3.5 ENSAIOS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS ESTABILIZADOS

Nesta seção, apresenta-se a metodologia detalhada adotada para a realização do ensaio de granulometria na mistura de solo e cinza de lodo. A granulometria é um aspecto essencial para entender as características físicas da mistura e pode influenciar diretamente suas propriedades mecânicas e comportamento em diferentes aplicações.

Vale ressaltar que as misturas foram realizadas utilizando um método de mistura manual, garantindo uma combinação uniforme das partículas de solo e cinza de lodo.

Foram coletadas amostras representativas do solo natural e da cinza de lodo. Além disso, as três porcentagens de mistura (5%, 10% e 15% de cinza de lodo em relação ao volume total) foram definidas com base em critérios técnicos e objetivos do estudo. Foram realizados ensaios geotécnicos em cada uma das três porcentagens de misturas de solo e cinza de lodo.

Em resumo, a metodologia adotada para os ensaios geotécnicos em três porcentagens de misturas de solo com cinza de lodo foi cuidadosamente planejada e executada, permitindo avaliar sua viabilidade para diferentes aplicações geotécnicas e engenharia civil.

O estudo do subleito caracteriza e avalia os solos das diversas camadas e traça os perfis dos solos para efeito do projeto de 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, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansibilidade.

Portanto, detalha os materiais utilizados e como foram caracterizados, a composição da mistura e os testes realizados. Os resultados obtidos serão apresentados no próximo capítulo, onde serão discutidos.

3.5.1 Análise granulométrica

Amostras representativas de solo natural com cinza de lodo foram coletadas e preparadas para o ensaio. Em seguida, as amostras foram destorroadas e seguiu-se o procedimento de granulometria por adensamento.

As misturas foram imersas em defloculante (metafosfato de sódio) por 12 horas (Figura 10). Após isso, foram selecionados recipientes de sedimentação adequados para o ensaio, garantindo que sejam limpos e isentos de partículas indesejáveis.

Figura 10- Amostras em defloculante



Fonte: autora (2023)

O recipiente foi colocado sobre um agitador mecânico e agitado em baixa velocidade para garantir a suspensão das partículas no líquido. A agitação foi mantida constante por um período de tempo de cerca de um minuto. Imediatamente após a agitação, o recipiente foi colocado em repouso, e o cronômetro foi iniciado imediatamente, anotando-se a hora exata de início da sedimentação. Os tempos necessários para que as partículas sedimentassem e atingissem níveis predeterminados no recipiente foram registrados com precisão, sendo esses: 30seg, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h e 25h, conforme norma NBR 7181/2016.

Figura 11- Leitura de sedimentação



Fonte: autora (2023)

Com base nos tempos registrados, a velocidade de sedimentação para cada tamanho de partícula foi calculada usando a Lei de Stokes, a qual estabelece uma relação entre o diâmetro das partículas e a sua velocidade, conforme fórmulas abaixo. A partir das velocidades de sedimentação, os diâmetros equivalentes das partículas foram calculados e usados para

construir a curva granulométrica. A curva granulométrica foi analisada, destacando os tamanhos de partículas predominantes.

$$d = \sqrt{\frac{1800n}{\gamma_g - \gamma_a} \times \frac{a}{t}} \quad (3)$$

$$Q = \alpha \frac{\gamma_g}{\gamma_{g-1}} \times \frac{L_c}{P_s} \quad (4)$$

Onde:

d = diâmetro equivalente da partícula, isto é, o diâmetro de uma esfera de mesmo peso específico e que sedimenta com a mesma velocidade;

γ = peso específico das partículas de solo;

n = coeficiente de viscosidade do meio dispersor;

a = altura de queda das partículas, correspondentes à leitura do densímetro;

t = tempo de sedimentação;

Q = porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro;

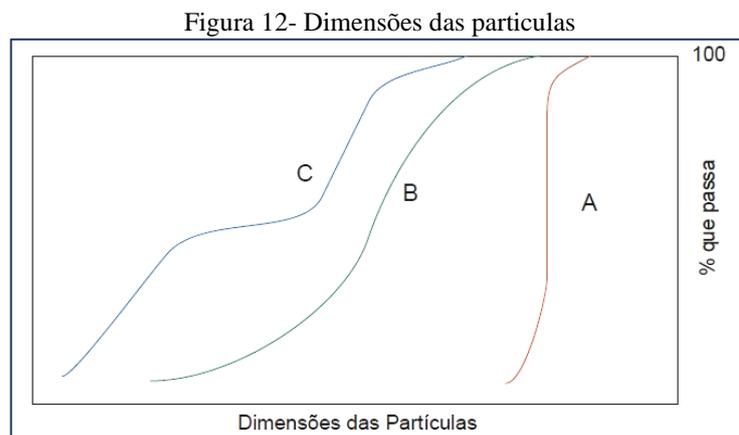
α = porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm (peneira nº 10);

L_c = Leitura corrigida do densímetro ($L_c = L + \Delta L$; em que L é a decimal da leitura na parte superior do menisco multiplicada por 103 e ΔL a correção);

P_s = peso do solo seco usado na suspensão.

Segundo DNIT (2006), com base nos resultados obtidos no ensaio granulométrico, a curva granulométrica é traçada como um gráfico semi-logarítmico, sendo a abscissa o logaritmo do tamanho da partícula e a ordenada a porcentagem em peso do material com tamanho médio menor que a dimensão considerada (porcentagem de material que passa).

Ainda de acordo com DNIT (2006), a depender da forma da curva, podemos distinguir os seguintes tipos de granulometria uniforme (curva-A); bem graduada (curva-B); mal graduada (curva-C), conforme indicado na Figura abaixo.



Fonte: DNIT (20106)

Os resultados da granulometria das misturas de solo e cinza de lodo foram interpretados em comparação com as características granulométricas do solo sem adição. Isso permitiu entender como a adição da cinza de lodo influenciou a distribuição granulométrica da mistura.

3.5.2 Ensaios limites de consistência

As amostras de solo natural foram secas em uma estufa para eliminar qualquer teor de umidade. A cinza de lodo também foi seca antes da mistura. As amostras foram então misturadas nas proporções estabelecidas e homogeneizadas para garantir uma distribuição uniforme das partículas.

Para determinar os limites de liquidez e plasticidade da mistura, foram realizados ensaios de acordo com as normas de ensaio padronizadas NBR 6459/2016 e 7180/2016. O aparelho de Casa grande foi empregado para determinar o limite de liquidez, registrando o número de golpes necessários para fechar uma ranhura padronizada, sendo a amostra homogeneizada com água destilada. Anota-se assim, o número de golpes, em seguida retira-se a quantidade da amostra junto às bordas que se uniram para colocar em estufa para determinar a umidade; logo após adiciona-se mais água e repetem-se o procedimento outras quatro vezes. O limite de liquidez é determinado conforme as Equações (5), (6) e (7) a seguir.

$$LL \cdot h \cdot \frac{(N)}{25} \cdot 0,156 \quad (5)$$

Ou

$$LL = h \cdot K_{(N)} \quad (6)$$

Onde:

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

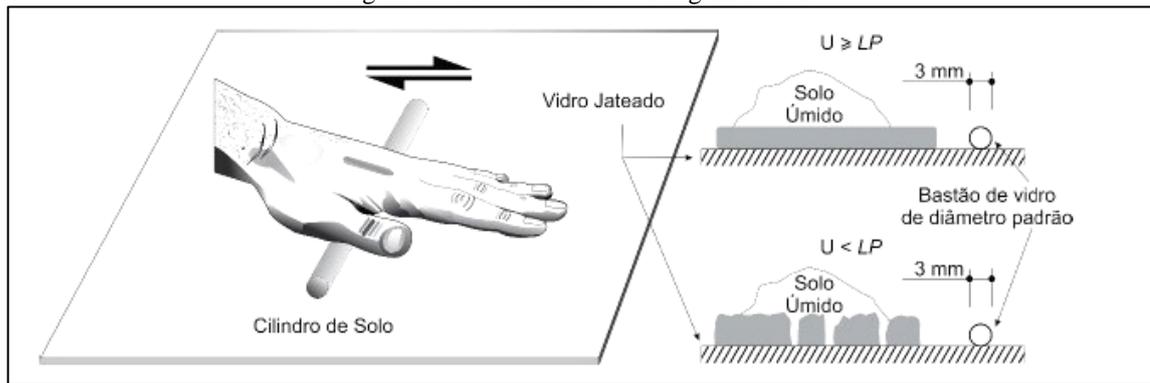
N- Número de golpes na determinação de uma ponte de ensaio;

LL- Limite de liquidez (%).

$$K_{(N)=\frac{(N)}{25}} \cdot 0,156 \quad (7)$$

Procede-se com a rolagem de uma amostra de material até que se forme um cilindro de 3 mm de diâmetro repetidamente de maneira que o cilindro de solo forme fissuras ao longo do corpo sob pressão requerida para rolagem. A Figura 15 exemplifica este processo. O limite de plasticidade foi determinado pelo método da umidade da ranhura.

Figura 13- Procedimento de rolagem do solo



Fonte: Molina JR (2017)

Portanto, segundo norma NBR 7180:2016, transferem-se imediatamente os seus fragmentos para um recipiente e determina-se a umidade pela equação (8):

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \cdot 100 \quad (8)$$

Na qual:

h- teor de umidade, em porcentagem;

P_h- massa de solo úmido;

P_s- Massa de solo seco em estufa a 100°C, até a consistência de massa.

Repete-se as operações até que se obtém cinco valores. O LP é expresso pela média dos teores de umidade obtidos. Ao final, define-se seu Índice de Plasticidade (IP), conforme equação abaixo:

$$IP = LL - LP \quad (9)$$

Onde:

IP- Índice de plasticidade;

LL- Limite de liquidez;

LP- Limite de plasticidade

Os valores obtidos para os limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade foram analisados e comparados entre as diferentes porcentagens de cinza de lodo na mistura. Isso permitiu avaliar como a adição de cinza de lodo afeta as características de plasticidade da mistura.

3.5.3 Ensaio de compactação

Para determinar as características de compactação das misturas, foram realizados ensaios de acordo com a norma de ensaio padronizada NBR 7182/2016. O ensaio de compactação proctor foi escolhido, onde as amostras foram compactadas com energia proctor intermediária, sendo utilizado cilindro pequeno, na qual a norma define três camadas com 21 golpes com o soquete grande, conforme demonstrado na tabela abaixo.

Tabela 5- Energias de compactação

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27

Fone: ABNT NBR 7182 (2016)

Após a compactação das amostras, os valores de densidade máxima seca e umidade ótima foram determinados para cada proporção de cinza de lodo das misturas referenciadas acima como M5, M10 e M15.

Os valores obtidos para a densidade máxima seca e a umidade ótima foram analisados e comparados entre as diferentes porcentagens de cinza de lodo na mistura. Isso permitiu avaliar como a adição de cinza de lodo influencia a densidade máxima e a umidade ótima da mistura compactada.

3.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

3.6.1 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

A partir da aquisição da umidade ótima de compactação, obtida nos ensaios de compactação proctor intermediário, foram expressas as condições reais de campo para análise ISC.

Os corpos de prova foram moldados segundo o DNIT – ME 172/2016 (Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas). O ensaio

de ISC é normatizado pela ABNT NBR 9895/2016. Moldou-se um corpo de prova para mistura, logo, foi-se peneirado as amostras secas para remover as partículas maiores que a abertura da peneira de 19 mm. Em seguida foi misturada a porção passante na peneira de 19 mm com água para atingir uma umidade específica ótima de cada uma das misturas.

A posteriori, a amostra foi colocada no molde, nivelando-a e centralizando-a. Para os ensaios de ISC o material, ainda dentro do cilindro, foi realizado a imersão por mais 96 horas (4 dias) para posterior rompimento dos corpos-de-prova. Para a determinação do percentual de expansão foi submetido as leituras diárias, conforme Figura 14, sendo analisado a cada 24 horas.

Determina-se a capacidade de percentual de suporte à penetração de um pistão em velocidade padronizada, sendo analisado, para assim ter-se valor comparativo em relação a uma brita graduada padrão, conforme Figura 15:

Figura 14- Corpos-de-prova imersos



Fonte: autora (2023)

Figura 15- Amostra em pistão padronizado



Fonte: autora (2023)

Foi-se moldado um corpo-de-prova para cada mistura. A energia de compactação adotada foi a intermediária

Para mais, para obter-se o ISC, em porcentagem, segundo DNIT (2006) para cada corpo-de-prova é obtido pela fórmula:

$$CBR = \frac{\text{Pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{Pressão padrão}} \quad (10)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados nas misturas propostas em estudo. Primeiro, são apresentadas as características físicas dessas e os resultados da compactação e ensaios mecânicos (ISC). Por fim, serão discutidos os resultados de ensaios mecânicos das misturas, assim como a comparação com o solo sem adição.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.1.1 Análise granulométrica

Em pavimentos cada camada deve atender a uma granulometria especificada para que se obtenha uma fundação mecanicamente estável.

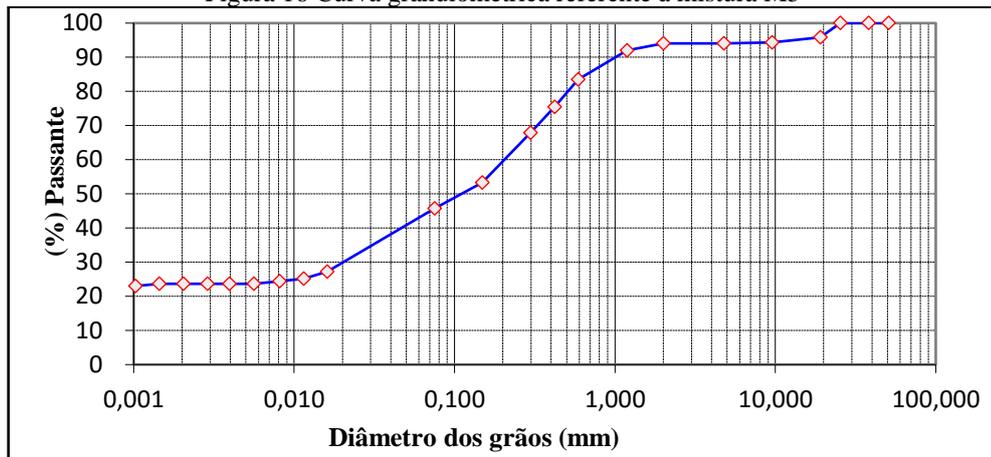
Os resultados em percentual encontrados nas análises granulométricas são apresentados a seguir. As curvas granulométricas referentes às misturas M5, M10 e M15 estão apresentadas nas figuras 16, 17 e 18. Pode-se verificar que essas misturas apresentam uma granulometria mal graduada, porém possuindo grãos com dimensões quase uniformes de finos como siltes e argilas. Pode-se observar que a quantidade de finos (#200) do material referente à M5 é de 45,72%.

Tabela 6- Resultado em percentual referente à M5

Tipo	Pedreg. Grosso	Pedreg. Médio	Pedreg. Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	silte ou argila
%	4,16%	5,70%	0,22%	10,63%	15,58%	22,15%	45,72%

Fone: Autora (2023)

Figura 16 Curva granulométrica referente à mistura M5



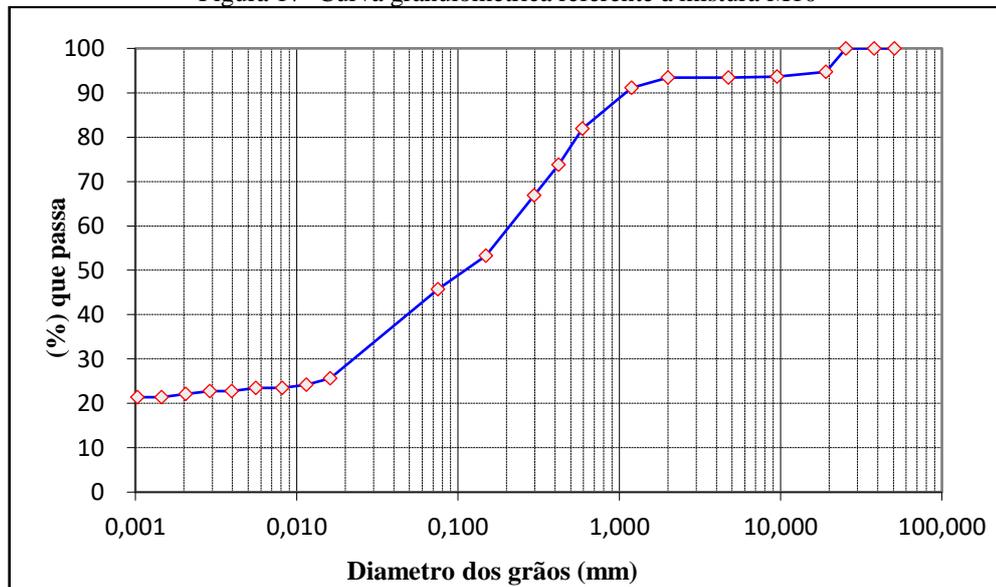
Fonte: autora (2023)

Tabela 7- Resultado em percentual referente à M10

Tipo	Pedreg. Grosso	Pedreg. Médio	Pedreg. Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	silte ou argila
%	5,25%	6,37%	0,21%	11,51%	15,02%	21,15%	45,74%

Fone: Autora (2023)

Figura 17- Curva granulométrica referente à mistura M10



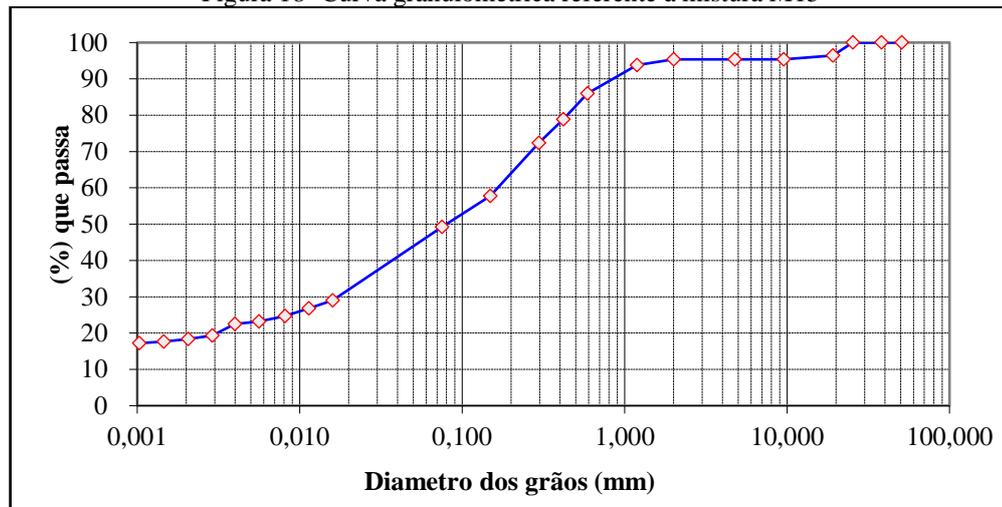
Fonte: autora (2023)

Tabela 8- Resultado em percentual referente à M15

Tipo	Pedreg. Grosso	Pedreg. Médio	Pedreg. Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	silte ou argila
%	3,54%	4,63%	0,00%	9,38%	13,63%	23,11%	49,25%

Fone: Autora (2023)

Figura 18- Curva granulométrica referente à mistura M15

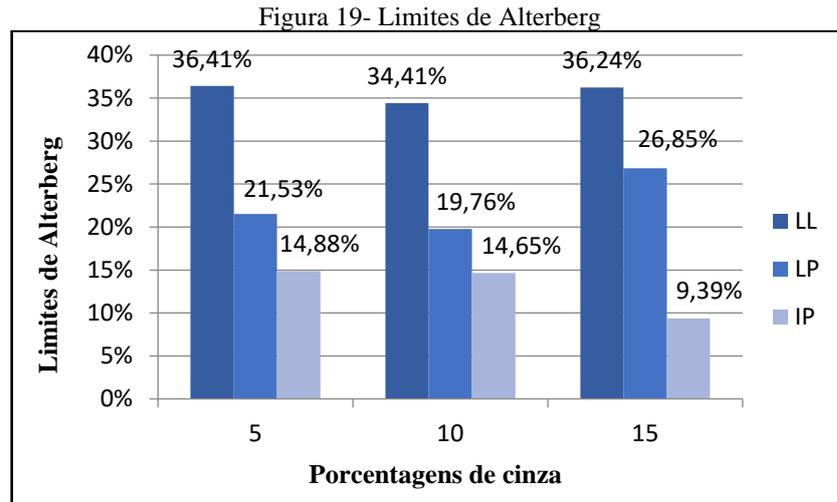


Fonte: autora (2023)

4.1.2 Limites de consistência

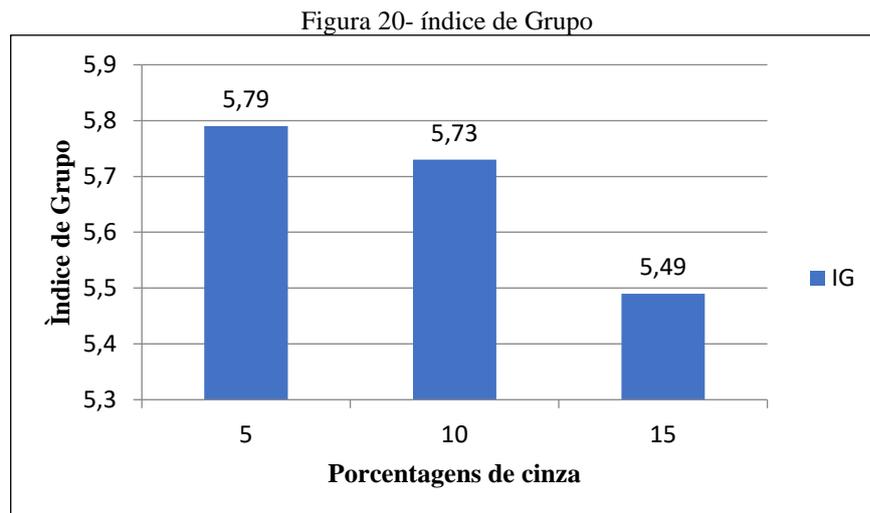
As misturas M5, M10 e M15 foram submetidas aos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, granulometria por sedimentação com defloculante e compactação. Dos experimentos realizados, aqueles referentes aos limites de consistência e granulometria tiveram por finalidade a classificação das misturas segundo a textura e plasticidade.

Portanto, visando avaliar a influencia da adição do resíduo no solo, quanto ao seu índice de plasticidade, realizaram-se ensaios de limite de liquidez e plasticidade com as misturas, cujos resultados encontram-se expostos na Figura 19. Os dados apontam uma diminuição dos limites conforme aumenta o teor de resíduo de 5% para 10%, porém observa-se que o mesmo não ocorre quando se aumenta para 15%, havendo um aumento evidente no limite de plasticidade. O índice de plasticidade do solo natural (15,58%) indica um solo altamente plástico de acordo com classificação de Caputo (1988) e das misturas indicaram valores menores que 15% classificando-os como mediamente plásticos.



Fone: Autora (2023)

Ademais, calculou-se o parâmetro IG (Índice de Grupo) a partir da formulação 1, com o intuito de classificá-lo segundo sistema TRB, como demonstra-se o resultado abaixo:



Fone: Autora (2023)

Com base nos resultados de distribuição granulométrica, índice de consistência e índice de grupo, o solo acrescentado de 5% e 10% de cinza de lodo não variou a sua classificação em relação ao solo natural, sendo este classificado como A-6 (argila siltosa), enquanto ao acréscimo de 15% de resíduo, a amostra se classifica como A-4 (solo siltoso), conforme o sistema de classificação TRB (*Transportation Research Board*). A classificação TRB indica que os solos da categoria A4 e A-6 são inadequados como materiais de base e subbase, devido à grande proporção de finos, porém adequado como material de reforço de subleito. Para mais, buscou-se um melhor detalhamento para a classificação, utilizando-se do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) que afirma que se $IP < 4\%$, ele possui características siltosas, se $4\% \leq IP \leq 20\%$, possui características intermediárias entre siltosas e

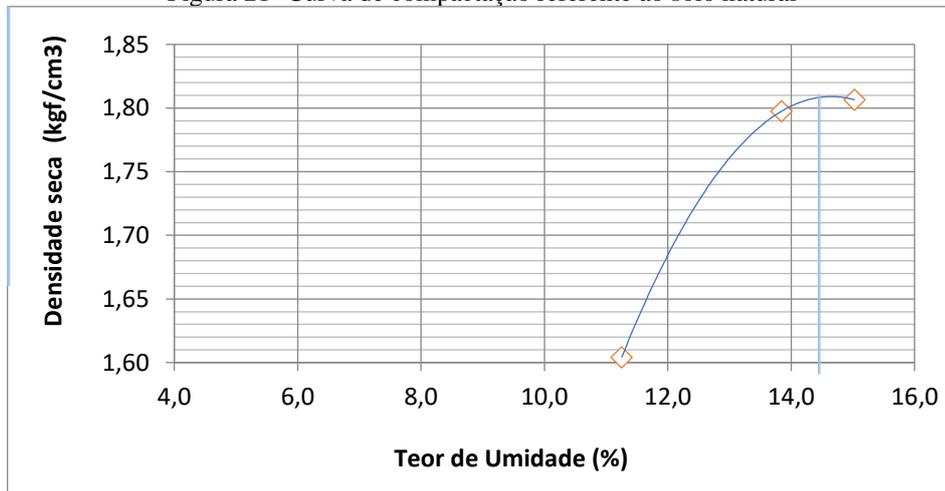
argilosas e finalmente se o $IP > 20\%$, a mistura possui características exclusivamente argilosas. Por conseguinte, a classificação conforme SUCS resultou em solo SC (areia argilosa) para os três percentuais, assim como o solo natural.

Ressalta-se que, à luz dos resultados de LL e IP, 36,41%, 34,41% e 36,24% e 14,88%, 14,65% e 9,39% respectivamente, as misturas não podem ser aplicadas para base estabilizada granulometricamente, pois apresenta índices que não atendem aos limites estabelecidos pelo DNIT (2006) que limita, no máximo, os valores do LL e do IP em 25% e 6%, respectivamente.

4.1.3 Compactação

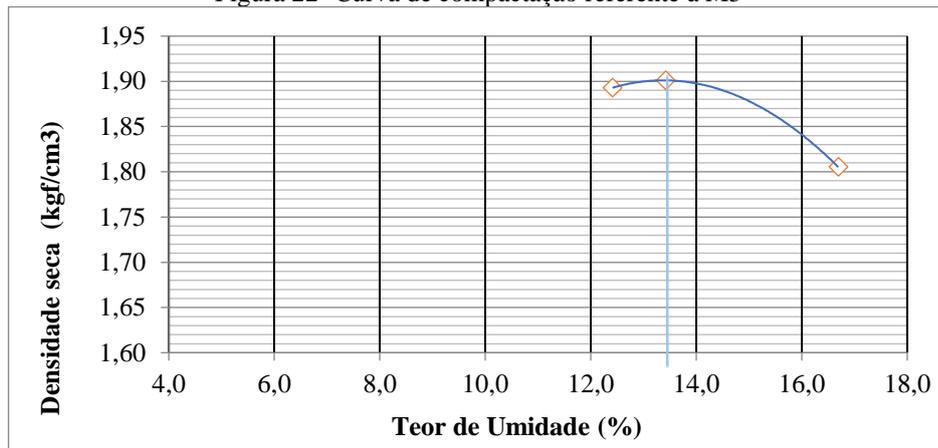
Enquanto a curva de compactação, ensaiado para a energia intermediária (21 golpes), onde as amostras depois de homogeneizadas foram amolgadas, adicionando-se diferentes quantidades de água, a qual foram fracionadas em três camadas de compactação, A curva de compactação foi obtida através do ensaio que se utiliza de amostras trabalhadas conforme a norma. As Figuras a seguir apresentam a curva de compactação para cada percentual, assim como para o solo natural.

Figura 21- Curva de compactação referente ao solo natural



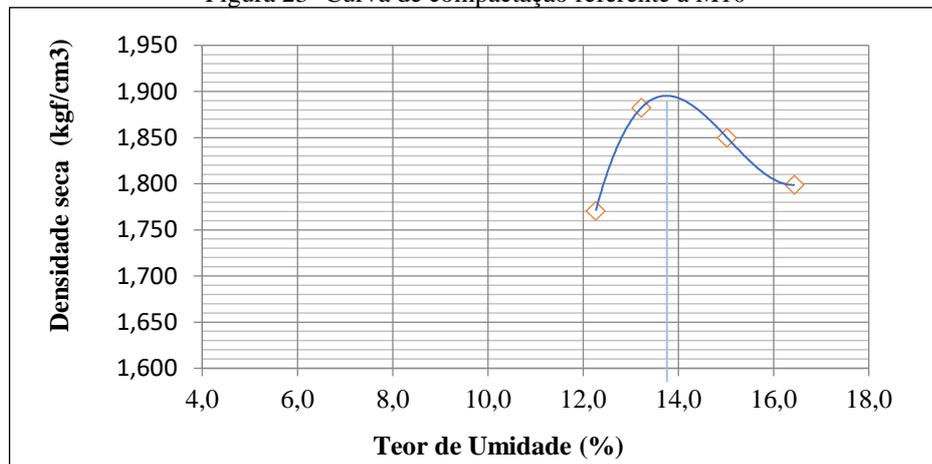
Fonte: autora (2023)

Figura 22- Curva de compactação referente à M5



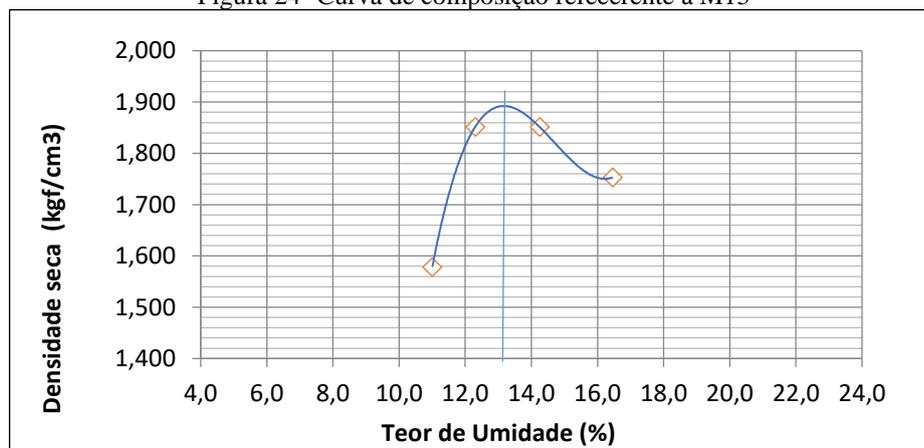
Fonte: autora (2023)

Figura 23- Curva de compactação referente à M10



Fonte: autora (2023)

Figura 24- Curva de composição refeerente à M15



Fonte: autora (2023)

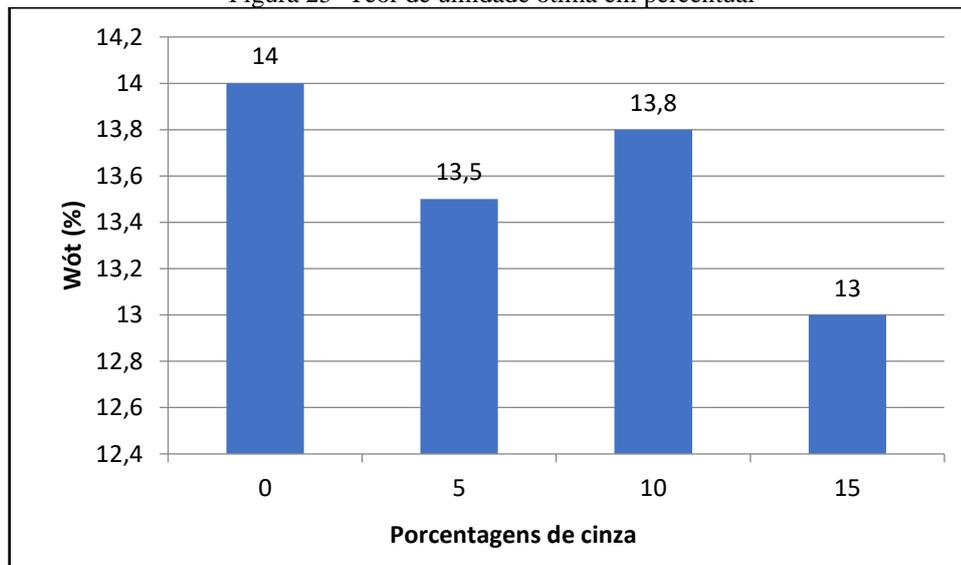
Tabela 9- Densidade seca máxima e umidade ótima

Solo natural		Solo + 5% cinza		Solo + 10% cinza		Solo + 15% cinza	
γ_{seco} g/cm ³	Wót (%)						
1,604	11,25	1,893	12,41	1,771	12,27	1,579	11,00
1,798	13,84	1,901	13,42	1,882	13,22	1,852	12,30
1,806	15,03	1,805	16,69	1,850	15,02	1,851	14,25
-	-	-	-	1,799	16,44	1,753	16,46

Fone: Autora (2023)

Outrossim, a partir das curvas de compactação das respectivas densidades seca máxima e umidades ótimas, alcançou-se o teor de umidade ótima a qual cada amostra deve estar ao ser compactada para análise de ISC. A seguir a Figura 25 com valores em percentual

Figura 25- Teor de umidade ótima em percentual



Fone: Autora (2023)

Portanto, para os materiais de subleito, o DNIT (2006) exige o ensaio de compactação. 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)

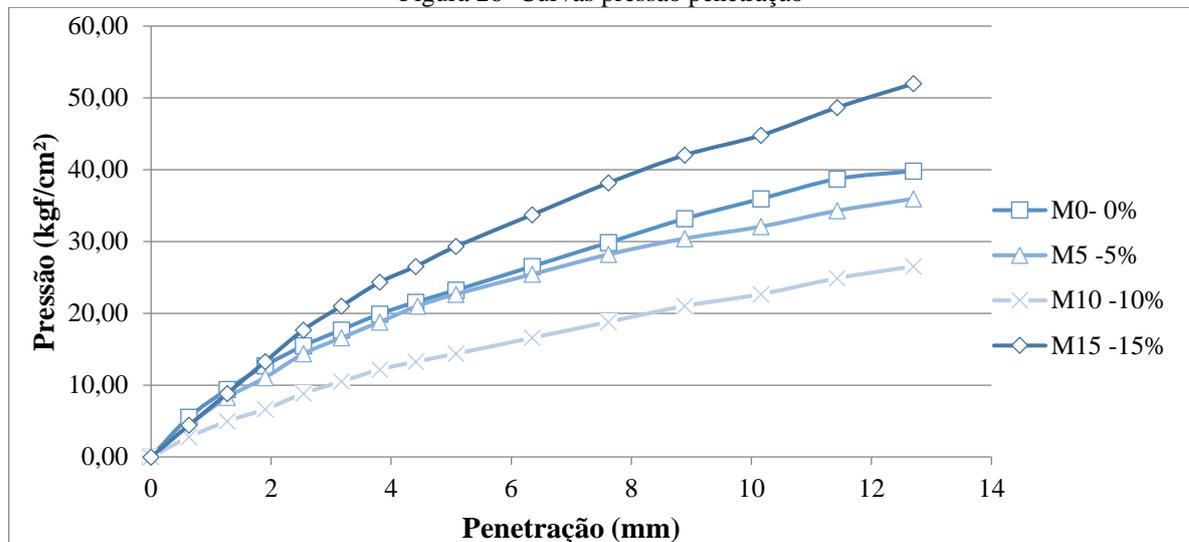
máximo de 6%, caso o $LL > 25\%$ e/ou $IP > 6$, tem-se a opção de usar o solo em base estabilizada.

4.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Para que se apresentem os resultados dos ensaios de ISC que se seguiram para as amostras estudadas de solo, 5%, 10% e 15% de resíduo ao solo, foram homogeneizadas na umidade ótima de compactação da energia intermediária

Como será verificado na tabela 10, o solo com 0% de adição apresentou uma resistência à penetração maior do que a resistência encontrada com 5% e 10%, verificando-se que a adição de 5% apresentou 5,95% menor em relação ao solo e verificando-se que a adição de 10% apresentou 40,48% menor em relação ao solo. Enquanto a adição de 15% de cinza demonstrou maior resistência à penetração que o solo natural, sendo esta 20,24% maior que o solo natural.

Figura 26- Curvas pressão penetração



Fonte: autora (2023)

Tabela 10- Expansão e ISC

	Solo natural	Solo + 5% cinza	Solo + 10% cinza	Solo + 15% cinza
Expansão	0,439%	0,693%	0,254%	0,298%
ISC	22%	21%	13%	26%

Fone: Autora (2023)

Os resultados encontrados indicam que os valores de ISC encontrados mostram que os as misturas M5 e M10 poderão ser utilizados como sub-base de pavimentos, segundo

parâmetros do DNIT, uma vez que apresentou $ISC \geq 20\%$ e $expansão \leq 1\%$. Sendo que a mistura M15 apresentou $ISC < 20\%$, sendo possível a utilização em reforço de subleito.

Já quanto à expansão, as quatro misturas (M0, M5, M10 e M15) atenderam ao limite exigido, sendo este, no máximo de 1% para emprego em sub-base.

Portanto, as análises laboratoriais confirmaram seu potencial de aplicação em pavimentação, o que poderá gerar uma nova possibilidade de disposição dos materiais, evitando-se o descarte em aterros e impactos ambientais.

A análise da textura do solo após a incorporação da cinza de lodo revelou um aumento na proporção de partículas finas, como argila e silte. Isso indica uma melhoria na estrutura do solo, podendo contribuir para uma melhor retenção de umidade. A análise do ISC demonstrou um aumento significativo na capacidade de suporte do solo quando a cinza de lodo foi adicionada como aditivo de 15%, sendo este elencado como fator de incorporação diferencial, uma vez que adição de 5% e 10% diminuiu a capacidade de suporte, seguindo-se o que sugere a literatura, a qual indica que a adição de finos em solos finos tenderia a diminuir sua capacidade de suporte. O valor de ISC para M4 aumentou consistentemente em comparação com o solo sem a cinza de lodo, indicando uma maior resistência do solo à compressão. Isso é essencial para a pavimentação, pois sugere que o solo modificado com cinza de lodo é mais adequado para suportar cargas de tráfego.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

O acréscimo da cinza de lodo, outrora descartável, em aterro sanitário ao solo alterou sua classificação quanto à textura. No entanto, levou a uma redução do Índice de Plasticidade, ou seja, com acréscimo de 5%, 10% e 15% de resíduo foi classificado com mediantemente plásticos, sendo uma diferença de 36,7% entre a mistura M5 e M15. Essa redução do IP melhora a trabalhabilidade do solo, uma vez que diminui a suscetibilidade do solo em presença de água.

No que se refere aos resultados de ISC, as misturas M0 e M5 apresentaram uma resistência à penetração semelhante entre si (cerca de 20%), enquanto M15 apresenta um valor de 26%, se comparadas às outras duas misturas M15 demonstra um acréscimo da capacidade de suporte. Ademais, as misturas M5 e M15 apresentaram valores maiores do que 20%, valor este considerado pelos DNIT, o mínimo adequado para uso em camada de sub-base de pavimento. Já quanto à expansão, as misturas M5, M10 M15 atenderam ao limite, na qual exige que é no máximo de 1% (sub-base). Sendo posto, como matérias não expansivos.

Considerando a grande quantidade de resíduos gerados em uma estação de tratamento de esgoto, chegando a cerca de 5 toneladas de lodo por dia como a ETE Cabanga, levando em consideração o desempenho mecânico satisfatório da mistura solo-lodo na maioria das amostras, pode-se concluir que este resíduo apresenta grande potencial como agregado alternativo. Dentre as amostras analisadas, a mistura de solo com 15% apresentou os melhores resultados quanto ao comportamento mecânico.

Portanto, a análise mostrou que o uso de cinza de lodo como aditivo, levando em consideração o desempenho mecânico satisfatório da mistura maioria das amostras, para pavimentação é uma opção mais sustentável em comparação com métodos tradicionais. A reutilização de resíduos industriais, como a cinza de lodo, reduz a quantidade de resíduos dispostos em aterros, contribuindo para a preservação do meio ambiente.

Em resumo, considerando apenas o método clássico do DINIT de dimensionamento, os resultados deste demonstraram que a incorporação de cinza de lodo no solo é uma estratégia promissora destinado à pavimentação, considerando ademais, a análise baseada apenas em um corpo-de-prova de ISC por mistura. Acrescenta-se que o benefício ambiental

torna a cinza de lodo uma opção viável e sustentável para a indústria de pavimentação, abrindo caminho para futuras pesquisas mais detalhadas e aplicações práticas.

O foco central do estudo é a investigação dos efeitos da cinza de lodo em um determinado solo, sendo este um solo A-6 (argila siltosa), de acordo com o sistema de classificação TRB ou SC (areia argilosa) de acordo com o sistema SUCS, como um aditivo específico para melhorar as propriedades do solo visando sua aplicação em pavimentação, obtendo-se valores de 21%, 13% e 26% para as misturas M5, M10 e M15 respectivamente.

Em comparação com tal estudo sobre o uso de um resíduo em solo, há outros trabalhos mencionados com resultados específicos para a cinza de lodo, na qual indicam que este resíduo pode ser um aditivo eficaz para a pavimentação. Ou seja, há pesquisas envolvendo a técnica de estabilização.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando dar continuidade a esta pesquisa e contribuir para a compreensão da credibilidade do uso de cinza de lodo como adição ao solo para pavimentação, recomenda-se que:

Avaliação mais direta da resiliência do pavimento, pois o ensaio de MR avalia diretamente a capacidade do pavimento de absorver e recuperar energia sob cargas de tráfego, o que está diretamente relacionado à sua capacidade de suportar deformações e cargas repetidas. O ISC, por outro lado, é mais focado na resistência à compressão, que pode não refletir completamente o comportamento do pavimento sob carregamento dinâmico.

Avaliar percentuais maiores que 15% de cinza de lodo.

Analisar a adição de cal à mistura solo+ cinza de lodo, como possível melhoraria de sua capacidade de suporte e possível utilização como base de pavimentação.

Investigar o potencial pozolânico e o efeito filler da cinza por meio de análises químicas, bem como sua aplicação em misturas asfálticas.

Aplicar em trechos experimentais bases e/ou subbases de misturas solo+cinza, monitorando seus comportamentos mecânicos e interações ambientais no decorrer do tempo.

Por fim, realizar pesquisas sobre viabilidade econômica do reaproveitamento deste material em camadas de pavimento.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ALVES, H. C. Análise laboratorial de lodos desidratados de estações de tratamento de água da região metropolitana de belo horizonte – MG para uso em pavimentação. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Ouro Preto, 2019. 114p.
- ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Sludge Treatment and Disposal. London: IWA Publishing, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2016.
- 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 7181: Solo – Análise Granulométrica. 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8419: Apresentação de projeto de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- 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 9895: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT; 2004.
- BAPTISTA, C. N. Pavimentação. Tomo I: Ensaios fundamentais para a pavimentação dimensionamentos dos pavimentos flexíveis. Porto Alegre: Editora Globo, ABEDA, 1974.
- BARROS, K.S. Estudo de cinzas de uma termelétrica da região metropolitana de Fortaleza-CE para aplicação em camadas granulares de pavimentos. Dissertação (Mestrado)– Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2015. 135 p.
- BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. Pavimentação asfáltica, formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2 ed., 2022.
- BRASIL. Lei Nº 12.305, de 12 de fevereiro de 1998. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1998.

CAPUTO, H.P. Mecânica dos solos e suas aplicações. Rio de Janeiro: LTC editora, 6ed., 1988.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. O transporte move o Brasil, propostas da CNT ao país. Brasília, 2022. 144 p.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SABESP (2023) (Brasil) (org.). Tratamento de esgotos. 2023. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=49>.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO- COMPESA (org.) Esgotamento sanitário. 2023. Disponível em: <https://servicos.compesa.com.br/esgotamento-sanitario>.

COSTA, A. N. Aproveitamento do lodo de esgoto na agricultura, Espírito Santo – Brasil. IX Congresso Latino americano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA 2010, XXXIX Congresso de Engenharia Agrícola – CONBEA, 2010.

BAPTISTA, C.F.N. Pavimentação, v.II. Porto Alegre, GLOBO, 2 ed., 1976.

DAVID, A. C. Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo(USP), São Paulo, 2002. 163p.

DINIZ, M.A.O.M.; MELO, D.C.P. Potencial aproveitamento de lodo de ETE na construção civil em Recife/PE, Pernambuco – Brasil. Revista Ibero-Americana de ciências Ambientais, Ago a Set 2019 -v. 10, n. 5, p., 2019.

DNIT, Rio de Janeiro. Manual de Pavimentação. DNIT, 2006. 278 p.

FERREIRA, G.O. Abordagem sistêmica do uso de lodo de ETE e ETA em pavimentação. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do São Carlos. São Carlos, 2021. 181 p.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. Rio de Janeiro: ABES, 6 ed., 2011.

KELM, T. A. Avaliação do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. 230p.

LEDA, C. L. Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e subbase de pavimentos. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2012. 291p.

LUCENA, L.C.L.; SILVA, J.A.; FILHO, P.G.T.M.; PORTELA, M. G. Monitoramento de parâmetros físicos e ambientais de camadas de solo estabilizadas com lodo de ETA e de ETE, Paraná – Brasil. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 10, n. 3, p. 873-890, 2016.

LYNN, C. J.; DHIR, R. K.; GHATAORA, G. S.; WEST, R. P. Sewages ludge ash characteristics and potential for use in concrete. Construction and Building Materials, v. 98, p. 767-779, 2015.

MARÉ, F.L. História das infra-estruturas rodoviárias. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Porto, 2011. 129 p.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. Mecânica dos pavimentos. Rio de Janeiro: SIBI/UFRJ, 2 ed., 2005.

MOLINA JR, W.F. Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas. ESALQ/ USP, 2017

OLIVEIRA, M. S.; ROCHA, F. M. A.; FERREIRA, S.R.; OLIVEIRA J, T. R. Identificação e Classificação de Perfis Típicos de Solos na Planície do Recife. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2016.

PEREIRA, K. L. A. Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Juiz Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2012. 125p.

PICANÇO, H.M. Incorporação de resíduos cerâmicos a um solo argiloso superficial de Manaus visando seu emprego em pavimentação. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2012. 55 p.

PINTO, S. Estabilização de areia com cal e cinza volante. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1971.

RODHE, L. Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos, estudo laboratorial. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002. 94p.

QIN LU, Z.L. He; STOFFELLA, P.J. Land Application of Biosolids in the USA: A Review. Hindawi Publishing Corporation. v.2012. 11p.

SANTOS, A.D. Estudo das Possibilidades de Reciclagem dos Resíduos de Tratamento de Esgoto da Região Metropolitana de São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003. 265p.

SILVA, A.M.R.B. Caracterização e avaliação do potencial de uso de lodos de estações de tratamento de esgoto doméstico da região metropolitana do Recife. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2001. 249p.

SILVA, A. R. Gestão dos riscos ocupacionais no manejo do lodo de estações de tratamento de esgotos e a NBR ISO 31000. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, 2019. 138p.

SOUZA, A.G.; BARRETO, E.; CARVALHO, E.H.; BRANDÃO, J.; CORDEIRO, J. S.; PATRIZZI, L. J.; BERNARDO, L.; REALI, M.A.P.; SCALIZE, L.J.; GONÇALVES, R.F.; PIOTTO, Z. Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Rio de Janeiro: PETROBRAS, PROSAB, 1999.

TANTAWY, M. A.; EL-ROUDI, A. M.; ABDALLA, E. M.; ABDELZAHER, M. A. Evaluation of the pozzolanic activity of sewages ludge ash. *ISRN Chemical Engineering*, 8p., 2012.

VON SPERLING, M. *Lodos ativados*. 2ed. Belo Horizonte; Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 1997.