

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

MAYARA SILVEIRA DE ARAÚJO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA MISTURA SOLO E LODO DE ESTAÇÕES DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO PARA APLICAÇÃO EM BASE E SUB-  
BASE NA PAVIMENTAÇÃO**

CAMPINA GRANDE

2021

MAYARA SILVEIRA DE ARAÚJO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA MISTURA SOLO E LODO DE ESTAÇÕES DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO PARA APLICAÇÃO EM BASE E SUB-  
BASE NA PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Unidade Acadêmica de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

CAMPINA GRANDE

2021

**MAYARA SILVEIRA DE ARAÚJO**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA MISTURA SOLO E LODO DE ESTAÇÕES DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO PARA APLICAÇÃO EM BASE E SUB-  
BASE NA PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a  
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil do  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da  
Universidade Federal de Campina Grande, para  
encerramento do componente curricular e  
conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Leda Christiane Lopes Lucena  
Orientadora

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Carina Silvani  
Examinador(a)

---

M. Sc. Sonaly Mendes Arruda  
Examinador(a)

**AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus acima de tudo, porque sei que tudo que tenho e que sou, e o que serei é graças a sua vontade.

Aos meus pais, Marcos de Araújo e Éldria Silveira de Araújo, por todo o carinho, amor e atenção, além da educação que me foi dada, o que me fizeram ser a pessoa que sou hoje.

À minha irmã, Mayrla Silveira de Araújo, por todo carinho que me dedica diariamente, e por ser uma grande incentivadora em minha vida.

A toda minha família que de forma direta ou indireta me acompanharam durante essa trajetória, em especial aos meus avós, João José de Araújo e Ramilda Silveira de Araújo.

Ao meu esposo Anderson Diniz Gusmão, pelo companheirismo, apoio, incentivo e compreensão. Também aos meus sogros por todo suporte e carinho que me dão.

Aos meus amigos, que de alguma maneira contribuíram para o meu aprendizado, e por todos os momentos de descontração.

A minha orientadora, Prof. Lêda Lucena, por se disponibilizar a me orientar neste trabalho tão importante para minha vida pessoal e profissional, compartilhando seus conhecimentos.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil, por todos os ensinamentos, além de toda dedicação em toda minha trajetória acadêmica.

E por fim, porém não menos importante, agradeço a todos que de certa forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“Se você quer um pedacinho do paraíso,  
acredite em Deus. Mas se você quer conquistar  
o mundo, acredite em você, porque Deus  
já te deu tudo aquilo que você precisa  
para você vencer.”

Augusto Branco

## RESUMO

O lodo que é gerado devido a operação das Estações de Tratamento de Água e de Esgoto caracteriza-se por ser um material semissólido que possui em sua composição constituintes perigosos ao meio ambiente, como metais pesados e poluentes patogênicos. As soluções mais usuais para destinação destes resíduos no Brasil são enviá-los para os aterros sanitários e, em alguns casos, são destinados para os rios, o que se caracteriza por ser altamente danoso ao meio-ambiente. Diante do exposto, a aplicação destes resíduos para a pavimentação caracteriza-se como uma alternativa de aproveitamento do resíduo. O presente trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade de aplicação dos resíduos das estações em camadas de base e sub-base da pavimentação com uso da técnica de estabilização. A metodologia adotada para a pesquisa se deu por meio de ensaios para caracterização física dos materiais com base em normas técnicas e posteriormente foram realizados ensaios de compactação e Índice de Suporte California para os teores de 5% e 10% dos resíduos, para análise qualitativa do uso de aditivos para aplicação da mistura em camadas de base e sub-base de pavimentos foi realizada uma revisão bibliográfica. Este trabalho concluiu que o solo estabilizado com o lodo de estação de tratamento de água apresentou melhores resultados em termos de resistência comparado à estabilização com o lodo de Estação de Tratamento de Esgoto. A partir da revisão de trabalhos acadêmicos foi verificado que ambos os resíduos demonstraram potencial de estabilização química e se caracterizam como uma alternativa ao aproveitamento do resíduo para fins de utilização na pavimentação.

Palavras-chaves: Lodo de ETA, Lodo de ETE, Estabilização de solo, Estação de Tratamento de água.

## **ABSTRACT**

The sludge that is generated due to the operation of the Water and Sewage Treatment Stations is noted for being a semi-solid material that has in its composition constituents that are dangerous to the environment, such as heavy metals and pathogenic pollutants. The most common solutions for the disposal of this waste in Brazil are to send it to landfills and, in some cases, are applied to rivers, which stands out for being highly harmful to the environment. In view of the above, the application of these residues for paving is emphasized as an alternative for using the residue. The present work had as objective to study the feasibility of application of the residues of the stations in base and sub-base layers of the paving with the use of the stabilization technique. The methodology adopted for the research took place through tests for the physical characterization of materials based on technical standards and subsequently, compaction tests and the California Support Index were performed for the contents of 5% and 10% of the residues, for qualitative analysis of the use of additives to apply the mixture in base and sub-base layers of floors a bibliographic review was carried out. This work is known that the soil stabilized with the sludge from the water treatment plant presents better results in terms of resistance compared to the stabilization with the sludge from the sewage treatment plant. From the review of academic papers, it was verified that both residues showed potential for chemical stabilization and are characterized as an alternative to the use of the residue for use in paving.

Key words: Waster water, Sludge, Soil Stabilization, Water Treatment Plant.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1- Domicílios cuja principal fonte de água era a rede geral de abastecimento em 2018 em % .....  | 19 |
| Figura 2 - Domicílios com coleta de esgoto pela rede geral em 2018 em %.....  | 19 |
| Figura 3 - Etapas do tratamento de água .....   | 21 |
| Figura 4 - Esquema de funcionamento das lagoas da fase secundária .....   | 24 |
| Figura 5 - Estratégias de produção e eliminação de lodo de esgoto (SS) para países da União Europeia (DUCOLI et. al, 2021) .....                            | 26 |
| Figura 6 - Principais meios de disposição do lodo nos países .....  | 27 |
| Figura 7 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas.....  | 32 |
| Figura 8 - Linhas de tendência dos resultados dos ensaios de módulo de resiliência do solo e das misturas solo de ETE – lodo estudadas por KELM (2014)..... | 35 |
| Figura 9 - Variação do módulo de resiliência com o teor de lodo de ETA para o material solo arenoso .....   | 35 |
| Figura 10 - Módulo de Resiliência para as misturas com lodo de ETA e cal obtidos por LUCENA (2012) .....  | 36 |
| Figura 11 - Módulo de Resiliência para as misturas com lodo de ETE e cal obtido por LUCENA (2012) .....   | 36 |
| Figura 12 - Módulo de Resiliência para as misturas com lodo de ETA e cimento obtidos por LUCENA (2012).....   | 37 |
| Figura 13 - Módulo de Resiliência para as misturas com lodo de ETE e cimento obtidos por LUCENA (2012).....   | 37 |
| Figura 14 - Módulo de Resiliência para as misturas com lodo de ETA e emulsão obtidos por LUCENA (2012).....   | 37 |
| Figura 15 - Módulo de Resiliência para as misturas com lodo de ETE e emulsão obtidos por LUCENA (2012).....   | 38 |
| Figura 16 - Etapas de Ensaios de Caracterização .....   | 39 |
| Figura 17 - Localização da Estação de Tratamento de Esgoto .....  | 40 |
| Figura 18 - Localização da Estação de Tratamento de Água Nova Camará.....   | 40 |
| Figura 19 - Solo seco ao ar e passado na peneira de nº40.....   | 41 |
| Figura 20 - Lodo após o processo de secagem ao ar (a) Lodo da ETE; (b) Lodo da ETA .....  | 42 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 21 - Detalhes da moldagem do CP para ensaio ISC (a) preparo da amostra;<br>(b) molde utilizado .....                 | 45 |
| Figura 22 - Curva de granulometria dos lodos e do solo puro .....   | 49 |
| Figura 23 - Curva que descreve a massa específica aparente seca em função da<br>umidade e a saturação de 100% .....         | 52 |
| Figura 24 - Curvas de compactação do solo puro e solo+ lodo ETA nas<br>porcentagens de 5% e 10% .....                       | 52 |
| Figura 25 – Curvas de compactação do solo puro e solo+ lodo ETE nas<br>porcentagens de 5% e 10% .....                       | 53 |
| Figura 26 – Gráfico que apresenta o valor do ISC (%) em função do acréscimo de<br>lodo ao solo .....                        | 54 |
| Figura 27 - Gráfico da distribuição de referências que utilização um ou mais dos<br>aditivos (Cimento, Cal e Emulsão) ..... | 57 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Produção média de lodo por região demográfica do estado de Pernambuco (2015 – 2016).....              | 22 |
| Tabela 2 - Volume de lodo de ETE produzido nas principais ETE da Região Metropolitana São Paulo .....            | 24 |
| Tabela 3 - Volume de lodo produzido nos diversos tipos de tratamento .....                                       | 25 |
| Tabela 4 - Comparação dos custos da disposição final do lodo de esgoto .....                                     | 25 |
| Tabela 5 - Resultados de massa específica aparente seca dos lodos e respectiva umidade.....                      | 50 |
| Tabela 6 - Índices físicos da amostra de solo .....  | 50 |
| Tabela 7 - Resultados obtidos no ensaio de ISC – Proctor intermediário .....                                     | 53 |
| Tabela 8 - Valores de referência de ISC para solos estabilizados granulometricamente para base e sub-base.....   | 54 |
| Tabela 9 - Valores obtidos por Lucena (2012) para os ensaios de ISC e MR para os respectivos teores de lodo..... | 55 |
| Tabela 10 - Valores estimados para o MR com base no valor do ISC .....   | 56 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 -Trabalhos acadêmicos referentes a aplicação dos lodos na engenharia .                  | 28 |
| Quadro 2 - Normas Referentes aos ensaios .....   | 42 |
| Quadro 3 – Referências que utilizaram algum tipo de estabilizante para a mistura solo-lodo ..... | 47 |
| Quadro 4 Quadro de referências que estudam a aplicação do lodo na pavimentação .....             | 57 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**ABNT**- Associação Brasileira de Normas Técnicas.

**CONAMA**- Conselho Nacional do Meio Ambiente

**CP** – Corpo de prova

**DNIT**- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte

**ETA**- Estação de Tratamento de Água

**ETE**- Estação de Tratamento de Esgoto

**HRB** - Highway Research Board

**ISC**- Índice Suporte Califórnia

**LVDT**- Linear Variable Differential Translucers

**MR**- Módulo de Resiliência

**NBR**- Norma Brasileira

**SABESP**- Companhia de Saneamento Básico de São Paulo

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>   | 15 |
| 1.1 Objetivos  | 17 |
| 1.1.1 Objetivo Geral   | 17 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos  | 17 |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>  | 18 |
| 2.1 Lodo de Estações de Tratamento   | 18 |
| 2.1.1 Lodo de ETA  | 20 |
| 2.1.2 Lodo de ETE  | 22 |
| 2.2 Uso apropriado do lodo   | 25 |
| 2.3 Estabilização de Solos   | 29 |
| 2.4 Estabilização/Solidificação da mistura solo-resíduo                        | 30 |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>  | 39 |
| 3.1 Materiais  | 39 |
| 3.1.1 Resíduo de Lodo da ETE   | 39 |
| 3.1.2 Resíduo de lodo da ETA   | 40 |
| 3.1.3 Solo   | 41 |
| 3.2 Métodos  | 41 |
| 3.2.1 Preparo das amostras de lodo   | 42 |
| 3.2.2 Caracterização dos materiais   | 43 |
| 3.2.2.1 Massa Específica   | 43 |
| 3.2.2.2 Análise Granulometria  | 43 |
| 3.2.2.3 Limites de consistência  | 43 |
| 3.2.2.4 Determinação da matéria orgânica nas amostras de lodo                  | 44 |
| 3.2.2.5 Compactação  | 45 |
| 3.2.2.6 Índice de Suporte California   | 45 |
| 3.2.3 Ensaio para as misturas de solo e lodo                                   | 46 |
| 3.2.4 Análise qualitativa da resistência mecânica                              | 46 |
| 3.2.5 Análise qualitativa do desempenho dos estabilizantes à mistura solo lodo | 47 |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>  | 49 |
| 4.1 Caracterização física  | 49 |
| 4.1.1 Análise granulométrica   | 49 |
| 4.1.2 Determinação das propriedades físicas                                    | 50 |
| 4.2 Ensaio das misturas de solo e lodo   | 51 |
| 4.2.1 Ensaio de compactação  | 51 |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2.2 Ensaio de ISC para as misturas                                    | 53        |
| 4.2.3 Análise qualitativa para a capacidade de resiliência das misturas | 55        |
| 4.2.4 Análise qualitativa do uso dos aditivos estabilizantes            | 56        |
| <b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</b>                 | <b>59</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b>  | <b>61</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos problemas ambientais mais relevantes na atualidade é o destino adequado para as toneladas de resíduos geradas, diariamente, por todo o mundo. O crescimento da população, aliado à intensa urbanização e ao aumento do uso de novas tecnologias, implicam no aumento da produção de quantidades de resíduos (JACOBI; BESEN, 2011). Além disto, no Brasil, segundo Lucena (2012) esta situação se agrava devido às poucas soluções existentes consideradas adequadas para a disposição final destes materiais.

Os resíduos sólidos causam impactos ambientais quando são dispostos de maneira inadequada no meio ambiente, acarretando o comprometimento de corpos e fontes de água, degradação do solo, acréscimo de inundações, contribuição para a poluição do ar e ainda a reprodução de vetores de saúde em centros urbanos (BESEN *et al.*, 2010).

As estações de tratamento de água e de esgoto possuem participação na produção destes resíduos com a geração do lodo. Os lodos são resíduos semissólidos resultantes do processo de tratamento, de água e esgoto, nestas estações e cujas composições apresentam elementos contaminantes

Uma alternativa comumente utilizada para a destinação final do lodo são os aterros sanitários (KELM, 2014; DUCOLI; ZACCO; BONTEMPI, 2021). De acordo com Kelm (2014) a maioria destes encontram-se com sua capacidade praticamente esgotada além de apresentarem riscos de contaminação e estarem sujeitos à custos elevados. Por este motivo, verifica-se a importância de se estudar novas alternativas que propiciem a utilização destes elementos de forma sustentável e que tenham viabilidade econômica e socioambiental.

A utilização de resíduos como produto para aproveitamento na produção de materiais ligados a obras de Engenharia Civil, como forma de reduzir os impactos ambientais provocados por estes, têm sido alvo de estudos, seja na indústria da construção (SMOL *et. al*, 2015), na fabricação de tijolos (AREIAS *et. al*, 2020), na agricultura (NASCIMENTO *et. al*, 2020) e na pavimentação (CORDEIRO, 2007; LUCENA, 2012; PEREIRA, 2012; COELHO, 2015;).

A possibilidade de adição do lodo ao solo para uso na pavimentação, resultaria não somente na destinação segura e eficiente do resíduo, por meio de uma destinação correta com os contaminantes aprisionados em uma matriz sólida, como também na economia do volume de solo utilizado.

Cordeiro (2007) considera que a pavimentação se constitui de uma alternativa ao reaproveitamento de resíduos, principalmente aqueles com certo potencial de estabilização pelo fato de sua extensão e grandes volumes de solo mobilizado. Estes materiais, quando usados nas localidades próximas em que são produzidos, podem reduzir os gastos com transporte, resultando geralmente, em soluções de baixo custo, permitindo aplicações proveitosas na execução de bases e sub-bases de estradas.

Molliou et. al. (2007) cita que a eliminação de resíduos perigosos é uma etapa vital para um plano de gestão de resíduos eficaz. A principal razão pela qual o processo de estabilização é amplamente aceito é porque ele imobiliza e estabiliza as substâncias perigosas (como metais pesados que são encontrados no lodo de esgoto).

O uso da técnica de estabilização/solidificação permite obter o encapsulamento de constituintes perigosos de um resíduo, os quais são transformados e mantidos em suas formas menos solúveis ou tóxicas confinados em cápsulas, partículas ou blocos, por meio das reações químicas que fixam elementos, ou compostos tóxicos, em polímeros impermeáveis ou cristais estáveis, chamados encapsulantes (ADASKA, 1998; CORDEIRO, 2007; HUNCE, 2012). Assim estabilizados, ficam menos agressivos ao meio ambiente. Os reagentes que promovem a estabilização podem ser: orgânicos (não muito empregados) ou inorgânicos (amplamente empregados tais como: cimento, cinza volante, cal e etc.), sendo o primeiro o aglutinante mais popular usado em estudos anteriores e prática de engenharia (SPENCE; SHI, 2005 ; DU et. al., 2014 ; ZHANG; LIN, 2020).

De acordo com Lucena (2012) em virtude das restritas normas, da disposição de resíduos em aterro, a técnica de solidificação/estabilização vem se tornando uma alternativa importante para o tratamento destes, de modo a prover o melhoramento das suas características físicas e toxicológicas. Caracterizando-se ainda como uma alternativa de baixo custo comparado à outras técnicas de tratamento, o que tem impulsionado o desenvolvimento desta tecnologia nos últimos anos.

Neste contexto, o presente estudo busca contribuir para melhor compreensão do comportamento da mistura solo-lodo e avaliar o desempenho desta mistura em diferentes proporções, tomando como base trabalhos de autores já citados anteriormente, visando potencializar o uso da técnica em obras de pavimentação, passando assim o lodo a possuir uma finalidade superior.



## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem o objetivo de avaliar a estabilização de um solo com lodo de ETE e ETA para utilização em camadas de pavimentos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- Caracterizar fisicamente dos lodos de ETA e ETE;
- Analisar a estabilização granulométrica da mistura solo-lodo;
- Avaliar qualitativamente o potencial de aditivos estabilizantes para a mistura solo-lodo por meio de uma revisão bibliográfica, utilizando como base as propriedades físicas e mecânicas da mistura solo-lodo-aditivo.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo encontram-se as revisões bibliográficas de autores que já desenvolveram estudos dentro do contexto estudado, trazendo conceitos e definições ao tema abordado. Inicialmente apresentando o conceito de lodo, bem como suas divisões quanto à lodo de estação de tratamento de água e lodo de estação de tratamento de esgoto e conceitos da técnica de estabilização/solidificação da mistura solo-resíduo.

### 2.1 Lodo de Estações de Tratamento

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) resíduos sólidos são caracterizados por serem resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços e de varrição. Nesta definição estão incluídos os lodos provenientes de sistemas de tratamento. Tanto o lodo proveniente do tratamento de água, quanto o de tratamento de esgotos, são materiais que geram grandes desafios às empresas de saneamento ambiental.

O Art. 20 da lei Nº 12.305 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos que responsabiliza os geradores à elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos. Ainda no Art. 27 desta lei, no inciso 1, diz que a contratação de serviços de coleta, armazenamento, transporte, transbordo, tratamento ou destinação final de resíduos sólidos, ou de disposição final de rejeitos, não isenta as pessoas físicas ou jurídicas referidas no art. 20 da responsabilidade por danos que vierem a ser provocados pelo gerenciamento inadequado dos respectivos resíduos ou rejeitos.

O gerenciamento destes resíduos é uma atividade de grande complexidade e desprende alto custo para isto. Caso seja mal executado, pode ocasionar em impactos ambientais e riscos sanitários. No caso da deposição destes resíduos em aterro sanitários, se feitos de maneira inapropriada, pode acarretar riscos de contaminações das áreas devido à presença de metais pesados em sua composição.

A produção de lodo pode e deverá aumentar com o passar dos anos, uma vez que, o Plano Nacional de Saneamento Básico tende a crescer no Brasil. As Figuras 1 e 2 mostram que as porcentagens por estado que possuem acesso à rede de água e principalmente de esgoto ainda é muito baixa.

Figura 1- Domicílios cuja principal fonte de água era a rede geral de abastecimento em 2018 em %



Fonte: Pnad IBGE (2018)

Figura 2 - Domicílios com coleta de esgoto pela rede geral em 2018 em %



Fonte: Pnad IBGE (2018)

O aumento do número de residências com acesso à rede de água e esgoto acarretará em maior demanda no tratamento destes, aumentando a proporção de lodo produzido nas estações. Deste modo, verifica-se a necessidade de implantação de novas metodologias, que propiciem a destinação correta para estes resíduos

atendendo à necessidade de sustentabilidade, sendo realizada de maneira segura e economicamente viável.

Portanto, é de responsabilidade dos geradores a destinação destes resíduos. Segundo Pereira (2012), no Brasil, cerca de 80% do lodo proveniente de ETE é descartado em aterros sanitários sem que haja um uso benéfico e uma parcela pequena de 5% é usada na agricultura, o autor afirma que em alguns países como Itália e Alemanha a maior parte do lodo tem como destino a agricultura, cerca de 55% e 63%, respectivamente, enquanto cerca de 30% tem como destino os aterros sanitários, e a porcentagem restante é destinada à incineração.

### 2.1.1 Lodo de ETA

As águas que provêm de mananciais, sejam superficiais ou subterrâneos, são essenciais para o abastecimento humano. No entanto, a água no seu estado bruto se torna inadequada para determinados usos e precisa passar por processos químicos, físicos e biológicos, para que se tornem adequadas para consumo, sendo estes realizados pelas Estações de Tratamento de Água - ETAs (COELHO et. al, 2015).

De acordo com Achon (2013) os principais resíduos gerados nas ETAs, que possuem tecnologia de ciclo completo, são o lodo de decantadores e a água de lavagem de filtros (ALAF). Neste tipo de sistema as principais perdas de água, ocorrem devido à necessidade de limpeza das unidades de tratamento para remoção de resíduos, que ocorrem por meio da lavagem de flocculadores, decantadores e filtros, além de vazamentos nas unidades e/ou tubulações.

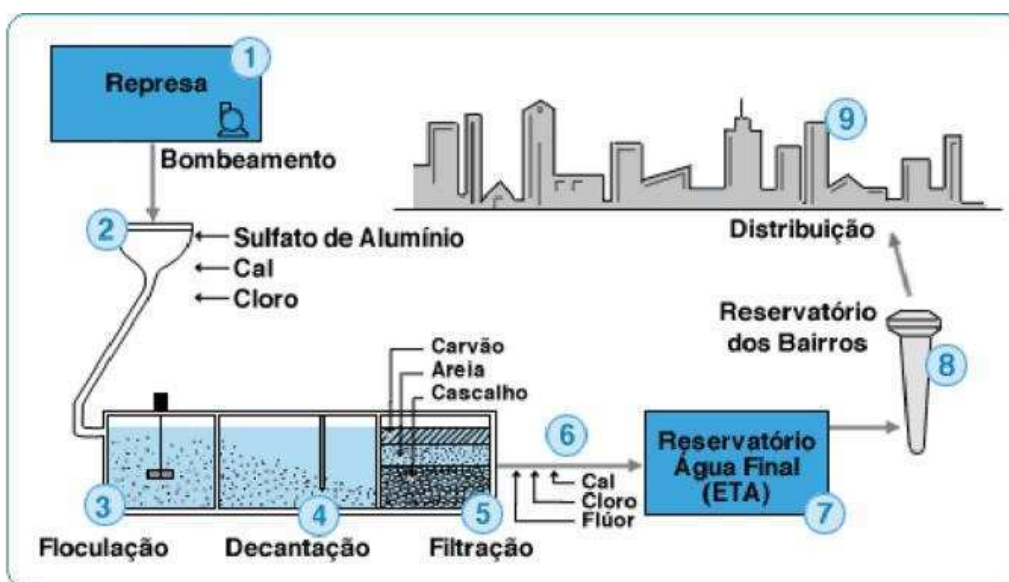
Segundo Achon (2008) no Brasil, a frequência de remoção de lodo nos decantadores da ETA convencional de ciclo completo pode ser realizada em intervalos de até seis meses. Conseqüentemente, têm-se o acúmulo de lodo com elevada concentração de contaminantes orgânicos e inorgânicos podendo dificultar a remoção e disposição final. Assim, em algumas ETAs, é necessária a utilização de água em alta pressão a fim de auxiliar a remoção do lodo e raspadores manuais (rodos de madeira), que implica no contato direto de funcionários com este resíduo.

O resíduo formado durante o processo de beneficiamento da água tem como destino os corpos d'água mais próximos, no entanto esta prática acarreta prejuízos na qualidade da água, e ainda o assoreamento de rios. Para Achon (2013) o lançamento

destes resíduos em corpos d'água, quando não aprovado por órgãos ambientais, pode ser considerado crime ambiental devido aos efeitos diretos causados ao ambiente aquático do corpo receptor, provocando danos à fauna aquática. Constitui-se crime ambiental, de acordo com o artigo 54 da Lei 9.605/98.

Os lodos provenientes destas estações são gerados ainda nas primeiras etapas do tratamento da água, em quantidades significantes, onde por meio da adição de produtos químicos utilizados para separação de impurezas, as partículas em suspensão no meio líquido vão se aglomerando e por fim se sedimentam devido a ação da gravidade e é obtido a partir da lavagem dos decantadores. A Figura 3 apresenta o esquema de tratamento mais comum utilizado no Brasil (SABESP, 2019), cujo método é também aplicado na estação de tratamento onde o lodo para esta pesquisa foi coletado.

Figura 3 - Etapas do tratamento de água



Fonte: (SABESP, 2019)

De acordo com Grandin *et al.* (1993) apud Hoppen *et al.* (2011) o lodo de ETA é constituído de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos provenientes das águas brutas, tais como: algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, colóides, areia, argilas, silte, calcário, magnésio, manganês, entre outros.

Sobrinho *et al.* (2016) estimou a produção de lodo proveniente de ETAs no estado de Pernambuco, dividido por região demográfica (Tabela 1). O autor utilizou cinco modelos diferentes para realizar a estimativa, fazendo observação ao modelo 1

que apresentou valores inferiores aos demais por admitir uma produção de lodo diretamente relacionada com a turbidez da água bruta e a sua vazão, sem considerar outros fatores, como dosagem de produtos químicos (coagulante e polímero) e cor da água bruta, subestimando a produção de lodo. Observa-se que o volume de lodo gerado é maior na região metropolitana, onde há elevada densidade populacional e onde estão os municípios com maior produto interno bruto (PIB), necessitando assim de uma boa gestão desses resíduos.

**Tabela 1 - Produção média de lodo por região demográfica do estado de Pernambuco (2015 – 2016)**

| Tipo de ETA  | Região demográfica      | N. de ETAs | Faixa de vazão (L/s) | Modelo 1               | Modelo 2 | Modelo 3 | Modelo 4 | Modelo 5 |
|--------------|-------------------------|------------|----------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|
|              |                         |            |                      | -----kg/(m3.dia) ----- |          |          |          |          |
| Convencional | Região Metropolitana    | 15         | 46-5130              | 7585,13                | 21800,07 | 16986,07 | 18832,27 | 20050,27 |
|              | Zona da Mata            | 13         | 21-199               | 296,24                 | 948,22   | 550,48   | 603,85   | 704,49   |
|              | Agreste                 | 25         | 20-880               | 658,92                 | 2054,12  | 1368,36  | 1488,32  | 1661,84  |
|              | Sertão                  | 12         | 17-183               | 234,50                 | 677,17   | 390,75   | 435,25   | 507,75   |
|              | Sertão do São Francisco | 4          | 54-687               | 2417,00                | 6031,25  | 5153,25  | 5749,00  | 5971,25  |
| Compacta     | Região Metropolitana    | 14         | 8-28                 | 60,34                  | 132,61   | 96,50    | 106,65   | 115,79   |
|              | Zona da Mata            | 25         | 6-67                 | 86,02                  | 37,18    | 92,78    | 53,70    | 54,14    |
|              | Agreste                 | 80         | 4-48                 | 78,03                  | 29,74    | 75,90    | 44,43    | 46,66    |
|              | Sertão                  | 48         | 4-59                 | 79,18                  | 31,40    | 85,48    | 46,74    | 50,31    |
|              | Sertão do São Francisco | 14         | 13-54                | 58,59                  | 39,36    | 86,71    | 52,66    | 56,74    |

Fonte: Sobrinho et. al (2016)

### 2.1.2 Lodo de ETE

A construção de Estações de Tratamento de Esgoto é algo recente na história mundial. Na antiguidade algumas civilizações chegaram a desenvolver métodos de coleta de esgoto, sendo que estes eram bastante precários, não havia etapas de tratamento e, portanto, não havia geração do lodo. Devido à estas condições na época, surgiu a peste negra, além de outras doenças infecciosas que resultou na morte de milhares de pessoas nos séculos passados.

Para Kelm (2014) uma das preocupações hoje em dia, diz respeito ao grau de tratamento e ao destino dos esgotos, as suas consequências sobre o meio ambiente, a qualidade das águas, e seus usos benéficos. Segundo dados do Plano Nacional de Saneamento Básico do Brasil (2008), apenas 55% dos municípios brasileiros possuíam rede coletora de esgoto até aquela data, dos quais apenas 29,5% do esgoto recebe tratamento, o que representa um número baixíssimo, e mostra o longo caminho a ser percorrido no quesito tratamento.

Segundo Pereira (2012) a maior parte dos esgotos sanitários são constituídos por despejos domésticos, uma parte de águas pluviais e outra de água de infiltração. O esgoto doméstico se origina principalmente das residências, edifícios comerciais, instituições que contenham banheiros, lavanderias, ou qualquer outro dispositivo que utilize a água para finalidade doméstica. Ele é composto essencialmente por urina, fezes, água de banho, papel, restos de comidas, detergentes e sabão.

As águas residuais provenientes das residências e indústrias necessitam de um destino e por isso, por meio de redes de esgoto são encaminhadas para as estações de tratamento deste tipo de resíduo. Durante visita técnica realizada ao sistema de tratamento utilizado pela CAGEPA na estação do bairro da Catingueira, verificou-se que ele se divide em primário, secundário, e em alguns casos o terciário. Primeiramente, após a chegada do esgoto, existe a fase de separação dos materiais do estado sólido e líquido, por meio de gradeamento, em seguida em reservatórios aerados ocorrem a sedimentação, seguindo o efluente posteriormente para lagoas de estabilização.

Na segunda fase ocorrem reações bioquímicas onde há a remoção da matéria orgânica, também chamado de processo biológico. Nesta fase há produção de lodo, que ao longo do tempo vai ganhando maiores volumes, necessitando de destinação adequada. A Figura 4 apresenta a sequência de lagoas de estabilização utilizadas para o tratamento do esgoto da CAGEPA.

Figura 4 - Esquema de funcionamento das lagoas da fase secundária



Fonte: Autoria Própria (2021)

Segundo Areias et. al (2017) o lodo de esgoto tem um alto potencial de riscos à saúde pública, ao ambiente e à proliferação de vetores e organismos nocivos. Este apresenta substâncias nocivas à saúde como: metais pesados (tais como: Zinco, Níquel, Cromo, Cobre, Ferro, Enxofre, entre outros), bactérias, vírus, protozoários e helmintos. Além disso, existe a presença de minerais e de matéria orgânica, podendo estes, estar em solução ou suspensão (PEREIRA ,2012).

Dados fornecidos pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (2009) apud Lucena (2012) apresentam o volume crescente na produção de lodo nas principais estações do Estado de São Paulo com estimativa nos anos de 2010 e 2013, que se encontram apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Volume de lodo de ETE produzido nas principais ETE da Região Metropolitana São Paulo**

| Localização           | Vazão média Esgoto (L/s) | Quantidade de Lodo (Ton/ dia) |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|
| ETE BARUERI           | 12.000                   | 400                           |
| ETE SUZANO            | 1.500                    | 60                            |
| ETE SÃO MIGUEL        | 1.500                    | 90                            |
| ETE PARQUE NOVO MUNDO | 2.500                    | 165                           |
| ETE ABC               | 3.000                    | 172                           |

Fonte: Adaptado de SABESP (2009)

Para Pereira (2012) o volume de lodo produzido por um sistema de tratamento depende em si da vazão e das características do lodo tratado, tendo o tipo de tratamento e operação do sistema grande influência nessa produção. A Tabela 3 apresenta a produção em volume de lodo de várias formas de tratamento.



**Tabela 3 - Volume de lodo produzido nos diversos tipos de tratamento**

| <b>Tipo de sistema</b>              | <b>Volume de lodo produzido (L/hab.dia)</b> |
|-------------------------------------|---|
| Lagoa anaeróbia – lagoa facultativa | 0,05 – 0,15                                 |
| Reator UASB                         | 0,2 – 0,6                                   |
| Lodos ativados convencionais        | 3,1 – 8,2                                   |
| Aeração prolongada                  | 3,3 – 5,6                                   |
| Lagoa anaeróbia                     | 0,1 – 0,3                                   |
| Filtro biológico de alta carga      | 1,4 – 5,2                                   |
| Lagoa aerada facultativa            | 0,08 – 0,22                                 |

Fonte: Metcalf e Eddy (2002).

A forma de descarte mais comum aplicada ao lodo das ETEs no Brasil são os aterros sanitários, Pereira (2012) atribui ao motivo desta escolha o fato da vasta extensão territorial que o país possui. Esta forma de disposição contribui para problemas ambientais, aliada a falta de boas práticas de reciclagem dos resíduos que ficam expostos no meio ambiente.

## 2.2 Uso apropriado do lodo

Algumas formas de destinação do lodo de estações de tratamento, como materiais de construção, são sugeridas na literatura, sendo caracterizadas por serem alternativas seguras, que utilizam técnicas que promovem encapsulamento dos metais pesados, redução de emissões atmosféricas poluentes, redução dos volumes requeridos em aterros sanitários e conseqüentemente redução de custos.

Um aspecto que é considerado para a tomada de decisões quanto à destinação do lodo é o seu custo. A Tabela 4 relaciona a alternativa de disposição com o custo, entretanto atualmente este valor já está mais elevado.

**Tabela 4 - Comparação dos custos da disposição final do lodo de esgoto**

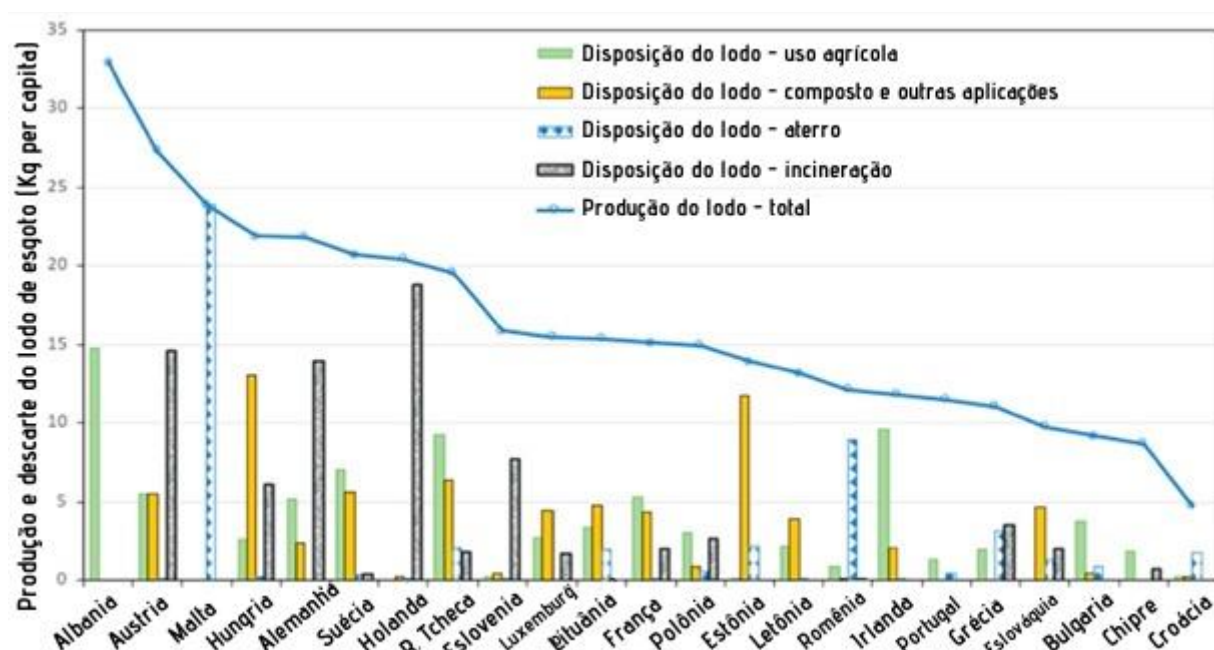
| <b>ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO FINAL</b> | <b>CUSTO (US\$/t)</b> |
|---|-----------------------|
| Oceano                                  | 12 a 50               |
| Aterros Sanitários                      | 20 a 60               |
| Incineração                             | 55 a 250              |
| Reciclagem Agrícola                     | 20 a 125              |

Fonte: ANDREOLI *et al.* (2006)

Visentin *et al.* (2020), determinou que o custo de transporte do lodo produzido pela ETE de Botucatu-SP é de R\$160,00 por m<sup>3</sup> e a disposição em aterro sanitário é de R\$122,00 por m<sup>3</sup>, totalizando R\$ 282,00 por m<sup>3</sup>, os valores foram pesquisados junto aos prestadores destes serviços e da própria SABESP. Comparando com a média de custo fornecida por Andreoli *et al.* (2006) o valor encontra-se dentro da margem, apesar da referência não ser atual.

A Figura 5 apresenta as principais formas de destinação do lodo das estações de tratamento em países da União Europeia, com destaque para a incineração (coluna de cor cinza escura) na Holanda. A coluna azul representa a destinação em aterros, cujo país que se destaca nesta forma de destinação é Malta.

**Figura 5 - Estratégias de produção e eliminação de lodo de esgoto (SS) para países da União Europeia (DUCOLI et. al, 2021)**



Fonte: Adaptado de (DUCOLI et. al, 2021)

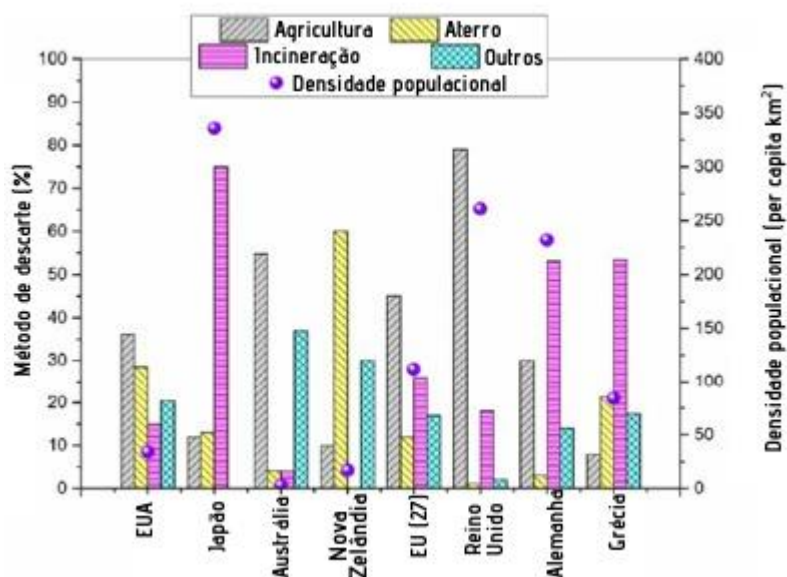
Ciešlik *et al.* (2015) indicou os seguintes usos principais para lodos de estações de tratamento de esgoto:

- recuperação agrícola e de solos, incluindo: estabilização no leito de secagem de lodo; estabilização com minhocas e estabilização anaeróbica com recuperação de biogás.
- processamento térmico, incluindo: incineração convencional; co-incineração com carvão ou outros combustíveis e pirólise.

- extração de matérias-primas, incluindo: recuperação de fósforo; remoção de metais comuns, como Al, Fe, Mg, Pb, Ca, Zn e recuperação de alimentos raros, como Ag, Te, Tl, Bi, Sb, In, Ga, Sn, Ge.
- uso na indústria de construção, incluindo cimentação de cinzas; vitrificação de alta temperatura com adição de sílica; telhas; tijolos; agregados leves; cimento; materiais de concreto e geopolímeros.

Na 11ª Conferência Americano-Japonesa sobre a Tecnologia de Tratamento de Esgotos Sanitários foram apresentadas alternativas de utilização do lodo empregadas nos EUA e no Japão. O evento tem um caráter impactante quanto ao incentivo do uso do lodo. A “ACE PLAN Japonês” Areawide Sewage Sludge Treatment and Disposal Project, aponta três áreas básicas de referência de pesquisa para sua aplicação: (A) agricultura, (C) construção e (E) energia (GEYER, 2001). A Figura 6 apresenta os principais meios de disposição do lodo de acordo com seus respectivos países.

**Figura 6 - Principais meios de disposição do lodo nos países**



Fonte: Adaptado de (CHRISTODOULOU, A.; STAMATELATOU, K., 2016)

Um estudo recente desenvolvido na Europa por Ducoli; Zacco; Bontempi, (2021), apresenta uma problemática atual, que diz respeito à contenção do vírus da COVID 19. Segundo os autores, tanto as pessoas assintomáticas quanto as sintomáticas podem transmitir a infecção também pela urina e excrementos, o que sugere que devem ser definidos procedimentos adequados para gerenciar águas residuais e produtos relacionados. Portanto, é necessário que estes resíduos não sejam

destinados de maneira inadequada, pois podem contribuir para maior contaminação da população.

Para Lynn et. al (2015) os tratamentos térmicos do lodo de esgotos são alternativas de descarte que ganharão importância no futuro devido à considerável redução de volume (até 90%) e massa (até 70%), e da esterilidade do produto final obtido, que muitas vezes pode ser considerado como um resíduo inerte.

Ducoli et. al. (2021) avaliaram que, dependendo das características físico-químicas do produto da incineração do lodo das estações de tratamento, este pode ser aplicado em: extração de fósforo (P) para correção orgânica de solos; produção de adsorventes; como aditivos em argamassas e concreto (como material pozolânico); na fabricação de agregados leves (como por exemplo na substituição de argila); na fabricação de materiais cerâmicos; na fabricação de clínquer de cimento Portland. Portanto, este produto também apresenta potencial para uso na pavimentação.

O Quadro 1 apresenta alternativas estudadas para a aplicação do resíduo das estações de tratamento de água e esgoto como materiais de engenharia a fim de reaproveitar o material, e minimizar os impactos ambientais que estes causam.

**Quadro 1 -Trabalhos acadêmicos referentes a aplicação dos lodos na engenharia**

| <b>Título</b>  | <b>(Autores / ANO)</b>        |
|--|-------------------------------|
| Comportamento de concreto asfáltico tendo Lodo da ETA da cidade de Manaus como fíler   | (SILVA, 2008)                 |
| Aproveitamento de lodo de Estação de Tratamento de Água em cerâmica vermelha   | (PAIXÃO, 2005)                |
| Uso de lodo de Estação de Tratamento de Água centrifugado em matriz de concreto de cimento Portland para reduzir o impacto ambiental | (HOPPEN <i>et al.</i> , 2006) |
| Estudo de dosagem de lodo de Estação de tratamento de Água (ETA) em argamassa  | (RIBEIRO, 2012)               |
| Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos  | (PEREIRA, 2012)               |
| Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e subbase de pavimentos   | (LUCENA, 2012)                |

|   |                   |
|---|-------------------|
| Desempenho mecânico do solo condicionado com lodo de Esgoto calcinado | (MADALOZZO, 2008) |
|---|-------------------|

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, R. N.; SILVEIRA, L. R (2017)

### 2.3 Estabilização de Solos

O solo é um dos principais materiais utilizados em obras de pavimentação, movimentando grandes volumes. Um dos aspectos positivos na utilização do solo se dá ao fato deste possuir grande disponibilidade na superfície terrestre e ser de baixo custo. Todavia, os solos da forma a qual são encontrados nem sempre atendem às exigências e especificações do projeto.

Segundo Brito (2017) as possíveis soluções para esta problemática são evitar ou contornar o terreno; remover o solo que não é apropriado e substituí-lo por outro de qualidade superior; projetar a obra para situação de terreno ruim; ou estabilizar o solo existente.

Dentre as soluções apresentadas, deve-se considerar aquela cuja praticidade e economia são as mais aceitáveis, haja vista que fatores como volume de corte e aterro, tipo de solo disponível no local, e distância de transporte das jazidas, caixas de empréstimos e bota-foras, também devem ser considerados e ponderados, uma vez que influenciam diretamente nos custos da obra (BRITO, 2017).

Em muitos casos a melhor alternativa é a estabilização do solo, a qual para Coelho et. al. (2015) é um método abundantemente utilizado, pois acarreta na alteração das propriedades e melhoria nas características quanto à aplicação na engenharia. A estabilização pode ser: mecânica; granulométrica e com aditivos.

Para Vizcarra (2010), estabilizar um solo pode ser entendido como alterar suas propriedades a fim de melhorar seu desempenho mecânico e de engenharia, utilizando para obter esta mudança um processo artificial que pode ser: químico, físico ou físico-químico, que resulta em um material estável onde mesmo exposto a cargas externas e situações de mudanças de clima é capaz de resistir.

Após o processo de estabilização algumas propriedades são almejadas, podendo ser citadas:

- aumento da resistência do solo e menor sensibilidade à umidade;

- diminuição da deformabilidade;
- diminuição da permeabilidade.

Para Macêdo (2004) a estabilização mecânica é análoga a que se observa no ensaio de compactação de solos em laboratório. Este método de estabilização está presente em todas as camadas de um pavimento inclusive no subleito que deve ter seus primeiros 20 centímetros escarificados e compactados novamente.

O processo de compactação consiste na densificação dos solos mediante a expulsão de ar dos vazios quando submetidos a determinado tipo de energia. A mudança da energia de compactação reflete-se em alterações como resistência ao cisalhamento, permeabilidade e compressibilidade dos solos. Villibor (1982) apud Gondim (2008) não considera a compactação, por si só, como um tipo de estabilização, mas sim como parte integrante de qualquer processo de estabilização, a qual é executada após ser misturada com o agente estabilizador.

A estabilização granulométrica se caracteriza por tornar o solo natural estável, por meio da modificação de sua composição, sendo realizada a partir da mistura de dois solos ou mais, associada a separação de uma das frações de solo, dessa forma, obtêm-se um solo bem graduado, satisfazendo os requisitos físicos necessários a uma base ou revestimento estabilizado. (MACÊDO,2004)

A estabilização química de solos caracteriza-se por ser um processo onde por meio de reações químicas, é possível obter melhoria nas suas características. Lucena (2012) cita que a estabilização química pode ser dividida em três classes, as quais os efeitos dos estabilizantes estão relacionados com:

- I. Interação com o solo e suas propriedades físicas não possuem ação relevante no processo. (e.g. cal – dependendo do teor)
- II. Interação com o solo e suas às propriedades. (e.g. cal e cimento)
- III. O efeito do estabilizante é devido essencialmente às propriedades do estabilizante; interação com o solo não é importante, e.g. emulsão.

#### 2.4 Estabilização/Solidificação da mistura solo-resíduo

De acordo com Kelm (2014) a estabilização/solidificação ou encapsulamento é um estágio de pré-tratamento pelo qual os constituintes perigosos de um resíduo ou solo contaminado são transformados e mantidos em suas formas menos solúveis ou

tóxicas confinados em cápsulas, partículas ou blocos. No qual, as reações químicas promovem a fixação dos elementos ou composto tóxicos, formando polímeros impermeáveis ou cristais estáveis, fazendo com que a mistura seja menos agressiva ao meio ambiente.

Wang et. al. (2018) diz que a técnica de Estabilização por Solidificação (E/S) permite reduzir a mobilidade de espécies nocivas ao meio ambiente e aos seres vivos, reduzindo a mobilidade e lixiviação dos contaminantes para o meio. Barth; Percin (1990) apud Melchert (2012) definem a técnica como o processo de tratamento empregado para atingir um ou mais dos seguintes objetivos:

- a. Melhorar o manuseio e a destinação final do resíduo;
- b. Reduzir a área superficial ao longo da massa de resíduo no caso de ocorrer perda ou transferência de contaminante;
- c. Limitar a solubilidade dos constituintes perigosos que possam estar presente no resíduo, empregando o equilíbrio do Ph ou através da adsorção;
- d. Promover a transformação do resíduo em um novo produto, não perigoso.

De acordo com Malliou et al. (2007) a estabilização / solidificação é um processo de tratamento amplamente aceito para a imobilização de substâncias perigosas, como metais pesados contidos em resíduos. Isso envolve a mistura desses materiais com ligantes e reagentes, a fim de reduzir a lixiviação de contaminantes.

Os metais pesados presentes nos resíduos não podem ser destruídos, como é o caso dos contaminantes orgânicos, de acordo com Malliou *et al.* (2007) existem duas opções principais para lidar com a contaminação por metais pesados:

(1) transformação química em um composto que reduz o risco potencial ao meio ambiente (estabilização);

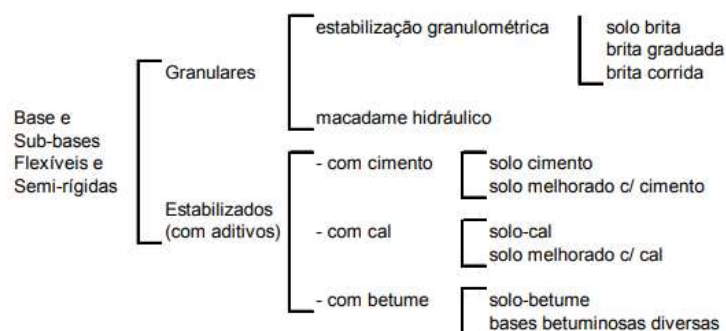
(2) redução da mobilidade do metal através do encapsulamento físico em um material de baixa permeabilidade no processo de solidificação.

Normalmente no processo de solidificação/estabilização é utilizado um aglomerante como agente solidificante. Os principais aglomerantes utilizados são: cimento Portland, cal, asfalto, polímero, etc. O cimento Portland é o mais utilizado, pois as reações químicas são ativadas apenas pela água (reações de hidratação), ocorrendo à temperatura ambiente e seu endurecimento (aderência), o que leva à formação de uma microestrutura sólida em algumas horas (BREHM *et al.*, 2013). Vale

salientar que o principal fator determinante para a escolha do estabilizante é o tipo de solo.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) classifica as bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas nas categorias apresentadas na Figura 7, onde os agentes estabilizadores, os aditivos, são: cimento, cal e betume.

**Figura 7 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas**



Fonte: Manual da pavimentação - DNIT (2006)

Lucena (2012) afirma que o cimento é um dos estabilizantes mais conhecidos e aplicados na estabilização química de solos. A ação cimentante nos grãos do solo ocorre por meio de reações de hidratação e hidrólise, que estabelecem ligações mecânicas e químicas entre o aditivo e a superfície rugosa dos grãos do solo, sendo mais ativa quanto maior for o número de contato entre o solo e as partículas de cimento. Lin *et al.* (2001) afirma que os metais pesados podem reagir quimicamente com o estabilizante e afetar o enrijecimento e desenvolvimento de resistência no estágio de hidratação do cimento.

A depender da química e mineralogia do solo, a adição da cal, pode trazer algumas mudanças ao sistema tais como: melhoria na trabalhabilidade (plasticidade), redução da expansibilidade e aumento do limite de contração, diminuição da absorção de água pela argila, aumento de resistência mecânica, entre outros (LUCENA, 2012). O uso da cal é especialmente recomendado para melhoria de solos argilosos ou muito siltosos, que apresentem em geral plasticidade e expansão elevadas, além de baixa capacidade de suporte (SANTOS, 2004).

Gondim (2008) destaca que a principal diferença entre as misturas solo-cimento e solo-cal está relacionada à velocidade de aumento de resistência observada nos dois processos, cujo as misturas de solo-cimento têm-se o ganho de resistência em



curto espaço de tempo, enquanto nas misturas solo-cal, os resultados são distribuídos ao longo de um tempo de cura maior. O autor também enfatiza que no processo de compactação, ocorrendo atrasos, são menos preocupantes para o processo de estabilização com cal que para os processos que utilizam o cimento como estabilizante, devido ao fato de as reações nas misturas solo-cal não se processam de forma tão imediata como nas misturas solo-cimento.

A emulsão asfáltica utilizada para estabilização de solos, é definida pela Associação Brasileira de Empresas Distribuidoras de Asfalto (2001) como sendo uma mistura heterogênea de dois ou mais líquidos, que normalmente não se dissolvem um no outro, mas são mantidos em suspensão por agitação, ou mais frequentemente, por pequenas quantidades de substâncias conhecidas por emulsificantes, formando uma mistura estável. Na emulsão os dois líquidos são a água e o Cimento Asfáltico de Pétroleo- CAP.

Para Gondim (2008) muitas variáveis que interferem na qualidade das misturas solo-emulsão. A qualidade e quantidade de cada elemento formador da mistura e processos empregados na execução exercem grande influência. Entre os fatores que influenciam têm-se: o tipo de solo, o tipo de emulsão, o teor ótimo da mistura, o tempo de aeração e o tempo de cura.

Para solos granulares, a utilização da emulsão como aditivo proporciona um aumento da coesão, enquanto para solos plásticos é visto um aumento da impermeabilização, devido ao efeito do asfalto na proteção das partículas de argila. Baixos teores de emulsão acarretam no aumento substancial da resistência do solo. De modo geral, há uma resistência máxima obtida a partir de um teor ótimo de emulsão, entretanto valores maiores tendem a prejudicá-la. Em solos arenosos, esse teor é baixo, já para solos coesivos, esse teor é maior, portanto, pode-se dizer que a estabilização de solos argilosos e silto-argilosos utilizando o estabilizante químico torna-se economicamente inviável (LUCENA *et al.*, 1982 apud LUCENA, 2012).

Oliveira *et al.* (2020) estudou o uso de lodo têxtil como material estabilizador de um solo A-2-4 para uso na pavimentação, nos teores de 10%, 15% e 20% do resíduo, para a estabilização química foram utilizados: cal, cimento e emulsão, nas porcentagens de 3%, 5% e 7%. Entre os valores estudados, os autores concluíram que os melhores resultados apresentados foram para o teor de 10% do lodo, o cimento como aditivo apresentou os melhores desempenhos, a adição de 7% obteve melhores

resultados nos testes de resistência à tração indireta (ITS) e resistência à compressão não confinada (UCS) e no teste de módulo de resiliência, o teor de 5% de cimento obteve maior valor.

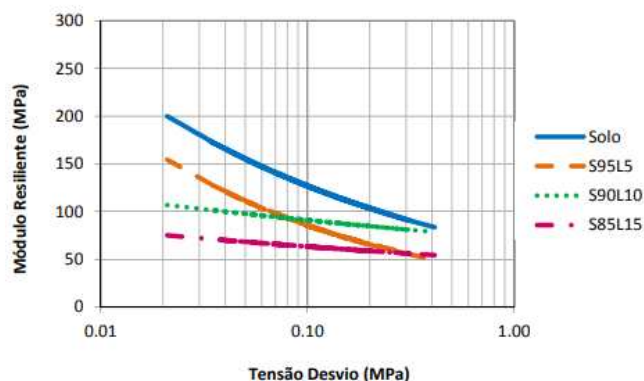
Coelho (2015) analisou o uso do lodo de ETA aplicado a dois solos, de diferentes granulometrias, um foi o solo argiloso e o outro o solo. As misturas utilizadas para as análises foram: a) para o solo argiloso um traço unitário em massa de 1:1 (solo-lodo) e de mesmo traço unitário com a adição de 6 e 10% de cimento; b) para o solo arenoso um traço unitário em massa de 1:0,25 (solo-lodo), sem a adição de cimento. As misturas dos dois solos com lodo foram aprovadas para uso na camada de subleito e as misturas com cimento apenas foi aprovada para emprego de base de pavimento aquela de solo arenoso com 10 % de cimento.

Pereira (2012) estudou a estabilização química de solo com cimento e uso da cinza de lodo como aditivo estabilizante, investigando o comportamento mecânico das misturas solo-cimento e solo-cimento-cinza para uso em base e sub-base de pavimentos rodoviários. Os corpos de prova para ensaio de compactação do solo-cimento foram moldados nas energias normal, intermediária e modificada, e os teores de cimentos adicionados ao solo foram de 3%, 6% e 9%. O traço utilizando 91% de solo e 9% de cimento na energia intermediária foi o escolhido para a adição de cinza, utilizando 5%, 10%, 20% e 30% para os percentuais da cinza. O autor verificou por meio dos resultados obtidos, que todos os traços contendo a cinza obtiveram incremento de resistência à compressão simples, que pode ser atribuído ao fato da cinza ter características pozolânicas.

Para Cordeiro (2007) os compostos encapsulados devem ser analisados química e fisicamente. O que compreende as análises químicas do extrato lixiviado e análises físicas com auxílios de ensaios de resistência à compressão confinada e não-confinada, durabilidade e permeabilidade. Ainda segundo o autor, esta técnica, de uma maneira geral, possui a vantagem de transformar o solo contaminado em um material com propriedades de resistência mecânica melhor. Quanto as suas limitações, podem-se citar: aumento do volume do material final e custo com os aditivos.

Kelm (2014) avaliou o módulo de resiliência para as misturas de solo e lodo de ETE, nas porcentagens de 5%, 10% e 15%, o gráfico que mostra o comportamento da mistura estudada pela autora está apresentado na Figura 8.

**Figura 8 - Linhas de tendência dos resultados dos ensaios de módulo de resiliência do solo e das misturas solo de ETE – lodo estudadas por KELM (2014)**

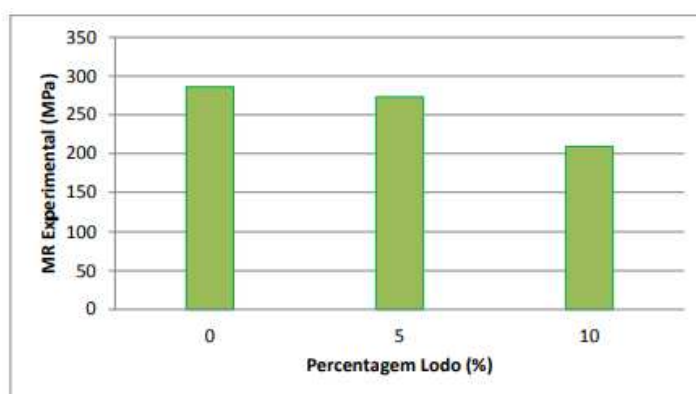


Fonte: KELM (2014)

Através da análise do gráfico da Figura 8, observa-se que quanto maior a adição de lodo na mistura com o solo, menores são os valores de módulo de resiliência obtidos, ou seja, a adição do lodo de esgoto não apresentou nesta situação nenhuma melhoria ao solo em termos de deformabilidade elástica.

Delgado (2016), estudou a adição de 5% e 10% de lodo de ETA à um solo arenoso e verificou que o valor do MR diminui à medida que a porcentagem de lodo aumento. A Figura 9 mostra o gráfico para os valores obtidos nos ensaios realizados pela autora.

**Figura 9 - Variação do módulo de resiliência com o teor de lodo de ETA para o material solo arenoso**

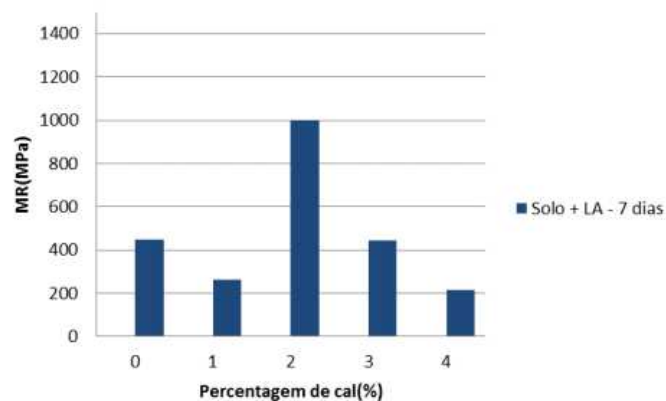


Fonte: DELGADO (2016)

Lucena (2012) realizou ensaios de Módulo de Resiliência, para a mistura de solo e resíduo nos teores de 10% de lodo de ETE e 20% de lodo de ETA, pois os demais teores estudados, para ambos os resíduos, não suportaram a fase de

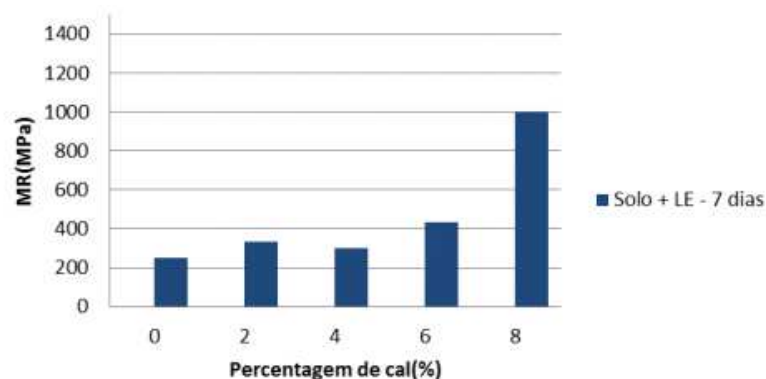
condicionamento (onde se eliminam as deformações plásticas). As amostras se deformaram de tal forma que os LVDT's não foram capazes de realizar as medições dos deslocamentos, não permitindo a continuidade da realização do ensaio, atribuindo o fato à baixa resistência da mistura solo+resíduo e do solo puro fazendo com que os corpos de prova desmoronassem antes mesmo do início do ensaio. Para ambos os resíduos os valores do Módulo de Resiliência obtidos tenderam a ser constantes. A autora também estudou a estabilização com a adição dos estabilizantes: cal, cimento e emulsão, as Figuras 10 a 15 mostram os resultados obtidos para o módulo resiliente das misturas.

**Figura 10 - Módulo de Resiliência para as misturas com lodo de ETA e cal obtidos por LUCENA (2012)**



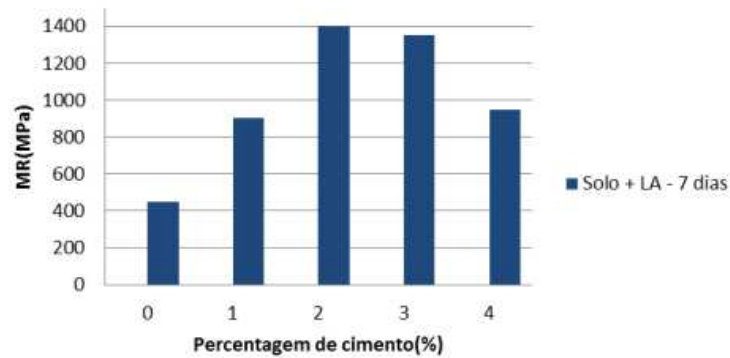
Fonte: Lucena (2012)

**Figura 11 - Módulo de Resiliência para as misturas com lodo de ETE e cal obtido por LUCENA (2012)**



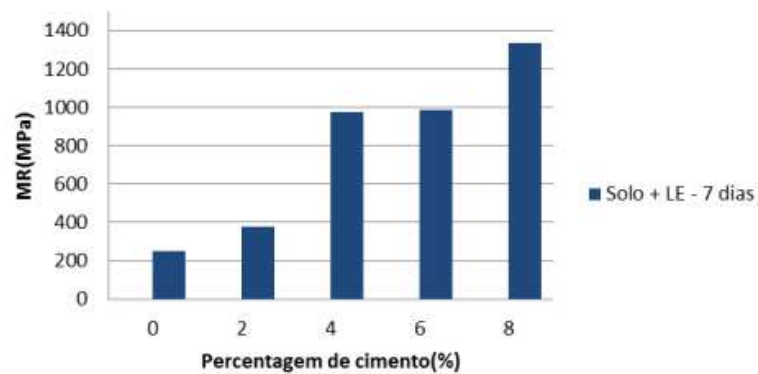
Fonte: Lucena (2012)

Figura 12 - Módulo de Resiliência para as misturas com lodo de ETA e cimento obtidos por LUCENA (2012)



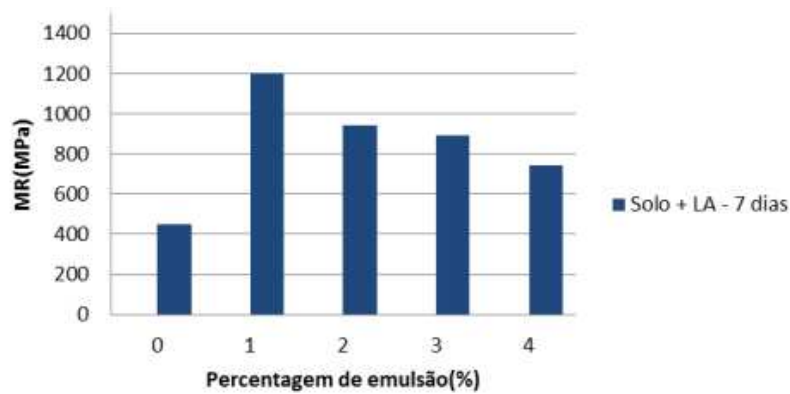
Fonte: Lucena (2012)

Figura 13 - Módulo de Resiliência para as misturas com lodo de ETE e cimento obtidos por LUCENA (2012)



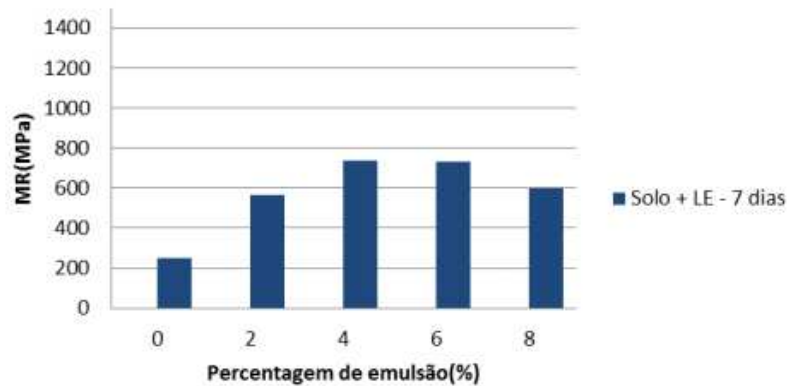
Fonte: Lucena (2012)

Figura 14 - Módulo de Resiliência para as misturas com lodo de ETA e emulsão obtidos por LUCENA (2012)



Fonte: Lucena (2012)

**Figura 15 - Módulo de Resiliência para as misturas com lodo de ETE e emulsão obtidos por LUCENA (2012)**



Fonte: Lucena (2012)

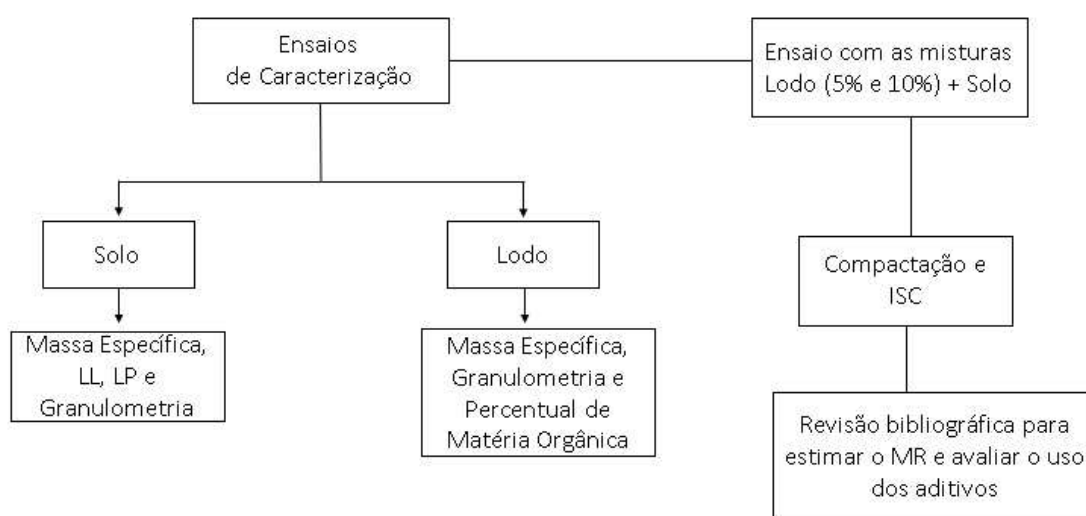
Em termos do módulo de resiliência para as misturas estabilizadas com aditivos, observa-se a partir da análise dos gráficos das figuras apresentadas, que o teor de 2% de cimento foi o que apresentou melhores resultados para lodo de ETA, seguido pela adição de 1% de emulsão. As misturas com lodo ETA, independente do estabilizante utilizado, apresentaram valores superiores aos das misturas com lodo de ETE.

No entanto, de modo geral, Lucena (2012) após todas as análises realizadas em seu trabalho para as misturas com os resíduos, concluiu que a adição de 8% de cimento como estabilizante à mistura de solo com lodo de ETE foi o que forneceu maiores incrementos de resistência, isto considerando ensaios de ISC, adensamento e demais ensaios mecânicos.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão apresentados os materiais e a metodologia adotadas para a pesquisa, apresentando as etapas de ensaios que foram desenvolvidas e as referências as quais foram recorridas para elaboração deste trabalho. Inicialmente, precedendo a fase do experimento piloto, foram executados ensaios para caracterização do solo e o lodo em estudo. A Figura 7 apresenta as etapas de execução dos ensaios de caracterização.

**Figura 16 - Etapas de Ensaios de Caracterização**



Na fase seguinte a etapa de caracterização foram realizados ensaios de compactação e ISC para as misturas de solo e lodo nos teores de 5% e 10%, a fim de analisar a resistência da mistura. Após a fase dos experimentos foi realizada uma análise qualitativa dos aditivos estabilizantes para a mistura solo-lodo, bem como uma estimativa para análise da resistência com base nos estudos realizados por CORDEIRO (2007), LUCENA (2012), LUCENA et. al. (2014), COELHO et. al. (2015), INGUNZA, PEREIRA e JUNIOR (2015), e DELGADO (2016), tendo como parâmetro o ensaio de ISC.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Resíduo de Lodo da ETE

O lodo utilizado para os ensaios foi retirado da Estação de Tratamento de Esgoto da CAGEPA, que está localizada no município de Campina Grande - PB no

bairro Catingueira. A estação tem a localização da fase preliminar e da fase secundária, o lodo foi coletado ainda na fase preliminar (Figura 17).

Figura 17 - Localização da Estação de Tratamento de Esgoto



Fonte: Google Earth (2021)

### 3.1.2 Resíduo de lodo da ETA

O lodo foi coletado da Estação de Tratamento de Água Nova Camará, localizada na cidade de Alagoa Nova - PB, de responsabilidade da CAGEPA, a estação recém inaugurada no ano de 2018 recebe água da barragem Camará que provém afluentes do Rio Mamanguape. A Figura 18 mostra a localização da estação.

Figura 18 - Localização da Estação de Tratamento de Água Nova Camará



Fonte: Google Earth (2021)



### 3.1.3 Solo

As amostras de solo utilizadas para a presente pesquisa foram coletadas na região de Campina Grande, no bairro Aluísio Campos, as margens da BR 104. O local onde foram coletadas estas amostras é um loteamento recém construído, e devido à movimentação de terra proveniente das obras de construção civil, o solo escavado da região foi utilizado para esta pesquisa.

O solo de aparência arenosa (Figura 19) foi coletado e transportado em sacos plásticos, e armazenados em tambor bombona plástica com capacidade para 200 litros. Foram feitos ensaios de caracterização do solo, para verificar o potencial de utilização do material para o devido fim, haja vista que a natureza orgânica dos resíduos, não seria compatível à utilização de um solo argiloso.

**Figura 19 - Solo seco ao ar e passado na peneira de nº40**



Fonte: Acervo pessoal

### 3.2 Métodos

A fim de obter os melhores resultados para esta pesquisa, foram realizados ensaios em laboratório, além da recorrência a estudos presentes na literatura. Para realização dos ensaios, foram seguidos os métodos recomendados pelas Normas Brasileiras (NBR) e DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. Para classificação do solo utilizou-se a classificação da HRB - Highway Research Board.

Dessa forma, foram realizados ensaios de caracterização física para os materiais e ensaios mecânicos para a mistura (solo/lodo). O Quadro 2 apresenta um

resumo das normas utilizadas como referência para a execução dos ensaios realizados.

**Quadro 2 - Normas Referentes aos ensaios**

| <b>ENSAIO</b>          | <b>NORMA</b>       |
|------------------------|--------------------|
| Limite de Liquidez     | DNIT-ME 122/94     |
| Limite de Plasticidade | DNIT -ME 082/94    |
| Compactação            | DNIT 164/2013 - ME |
| ISC                    | DNIT 172/2016 - ME |
| Análise Granulométrica | ABNT NBR 7181:2016 |
| Massa Específica       | ABNT NBR 6458:2016 |

Fonte: Autoria Própria (2021)

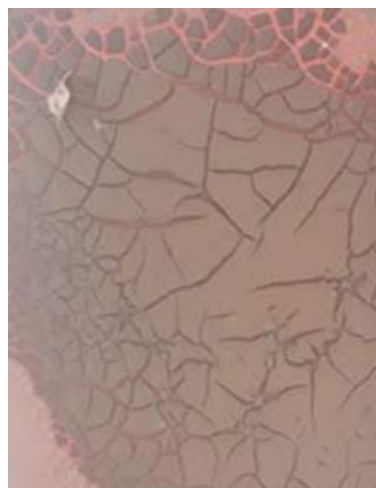
### 3.2.1 Preparo das amostras de lodo

As amostras foram coletadas em seu estado semissólido, sendo necessário realizar secagem do material. Portanto, estes foram dispostos em bandejas e submetidos à secagem ao ar. Após o período de no mínimo 15 dias submetidos à uma temperatura ambiente média de 25°C, o lodo perde umidade e reduz seu volume inicial em média 60-70%. A Figura 20 apresenta o aspecto das amostras de lodos após o período de secagem.

**Figura 20 - Lodo após o processo de secagem ao ar (a) Lodo da ETE; (b) Lodo da ETA**



(a)



(b)

Após esta etapa, foi realizada a desintegração do material com a utilização de almofariz e mão de gral. Para os ensaios de caracterização do lodo, utilizou-se as normas de solo como auxílio.

### 3.2.2 Caracterização dos materiais

De acordo com o Manual de pavimentação do DNIT de 2006, para que o solo seja utilizado para os devidos fins na pavimentação, este deve ser classificado, para que se possam formular métodos de projetos baseados em algumas propriedades de cada grupo. Para tal, foram realizados para caracterização do solo, os seguintes ensaios: massa específica, granulometria, limites de consistência, compactação e ISC. Para determinação da classificação do solo foi adotada a classificação adotada pela HRB.

Quanto as amostras de lodo de ETE e ETA, foram realizados os ensaios de massa específica e análise granulométrica, utilizando para tal o mesmo procedimento realizado para o solo.

#### 3.2.2.1 Massa Específica

O ensaio de massa específica foi feito para todos os materiais (solo, ETE e ETA) com base na NBR 6458:2016, sendo reproduzido duas réplicas para um melhor resultado. A importância da determinação da Massa Específica está associada a análise da estrutura do solo, revelando características importantes para que se possa obter informações como a sua resistência e estabilidade.

#### 3.2.2.2 Análise Granulometria

O ensaio de análise granulométrica realizado para os materiais, é o processo utilizado para a determinação da percentagem que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. Para determinação da granulometria foram empregados os procedimentos da ABNT NBR 7181:2016.

#### 3.2.2.3 Limites de consistência

Os limites de consistência foram determinados apenas para o solo, a fim de obter sua classificação.

- Limite de Liquidez

Para determinação do limite de liquidez foram utilizados os processos remondados pelo DNIT ME 122/94. O ensaio foi executado conforme prevê a norma, utilizando o aparelho de Casagrande e Cinzel, além das demais aparelhagens necessárias, de modo a obter o teor de umidade equivalente a 25 golpes. O ensaio foi realizado com mínimo de 4 repetições, e anotados a quantidade de golpes necessários ao fechamento da canelura, de acordo com o recomendado por norma. A cada repetição pequenas amostras do material ensaiado foi coletada para conferências das massas úmidas e secas (após o processo de secagem em estufa a 110°C).

- Limite de Plasticidade

O ensaio para determinação do limite de plasticidade é obtido mediante o cálculo da porcentagem de umidade para a qual o solo começa se fraturar quando moldado de forma similar a um cilindro de 3 mm de diâmetro e de 10 cm de comprimento. Conforme as amostras foram ensaiadas, o peso úmido foi anotado, para determinar a umidade após 24h da amostra seca em estufa. Para realização deste, foi utilizada a DNIT-ME 082/94 como referência.

- Índice de Plasticidade

O índice de plasticidade corresponde ao valor entre a diferença do limite de liquidez e o limite de plasticidade ( $IP = LL - LP$ ). De acordo com Caputo (1988), este índice fornece um critério para discernir sobre o caráter argiloso de um solo, haja vista que quanto maior o IP, mais plástico será o solo, sendo a tendência do valor máximo para as argilas e nulo para areias. Fornecendo assim características para a classificação do solo conforme solicitado na tabela 9.

#### 3.2.2.4 Determinação da matéria orgânica nas amostras de lodo

Para determinação da quantidade de matéria orgânica presente nos lodos as amostras dos lodos de ETA e ETE, foi realizada uma adaptação do Método da Calcinação "*Loss of Ignition*" proposto por Silva *et al.* (1999) para determinação da matéria orgânica em solos. Dessa forma, as amostras secas ao ar foram colocadas em Mufla durante 6 horas, com temperatura de 400°C. A matéria é quantificada a

partir da razão entre diferença de massa (inicial – final) e a massa inicial, o valor é multiplicado por 100 para obtenção do percentual

### 3.2.2.5 Compactação

Para realização do ensaio de compactação foi utilizada a norma DNIT 164/2013 - ME. Inicialmente o material foi peneirado e preparado conforme recomendado na norma, em seguida acrescentado água à amostra e executou-se o ensaio, a quantidade de água que foi sendo acrescentada, foi de 2% do volume total da amostra que era de 5,5kg. A energia de compactação aplicada foi a intermediária, aplicando 26 golpes para cada camada, e o total de camadas foi de 5. Foram executados os procedimentos no mínimo cinco vezes, até obter a caracterização da curva de compactação, quando a massa da amostra presente no cilindro apresenta redução, os pontos que eventualmente se apresentaram muito distante do comportamento da curva foram desconsiderados, para obter melhor conformidade na tendência do gráfico. A cada execução era retirado pequena parte da amostra para a obtenção das massas específicas e umidade correspondente, para então obter a curva de compactação e umidade ótima.

### 3.2.2.6 Índice de Suporte California

A norma ME 172/2016 fixa os procedimentos necessários para a determinação do Índice de Suporte California, para tal, foi utilizada a referida norma para a execução dos ensaios. A partir da determinação da curva de compactação, foi possível a determinação da umidade ótima para realização da moldagem do CP para o ISC (Figura 21). Foram moldados dois corpos de prova para cada teor, após o procedimento de moldagem, foram submetidos à fase de expansão onde o molde com a amostra permanece submerso em água por quatro dias (96 horas). Posterior a isto, o corpo de prova é submetido à resistência à penetração, onde será rompido através da penetração de um pistão cilíndrico, com uma velocidade de 1,27 mm/min. A partir da utilização de um anel dinamômetro na prensa, registra-se os valores necessários para o cálculo das pressões de cada penetração.

**Figura 21 - Detalhes da moldagem do CP para ensaio ISC (a) preparo da amostra; (b) molde utilizado**



(a)



(b)

Para determinação do valor do ISC em porcentagem, utiliza-se a seguinte expressão:

$$ISC(\%) = \frac{PRESSÃO\ LIDA\ OU\ PRESSÃO\ CORRIGIDA}{PRESSÃO\ PADRÃO} \times 100$$

Deve-se adotar para o índice ISC o maior dos valores obtidos nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas.

### 3.2.3 Ensaios para as misturas de solo e lodo

As misturas de solo e lodo foram submetidas aos ensaios de compactação e ISC, o procedimento seguiu idem aos itens 3.2.2.5 e 3.2.2.6, para a amostra de solo puro. Foram realizadas duas réplicas para as amostras, onde a média dos resultados obtidos foram expressas no presente estudo, para melhor representação dos resultados.

### 3.2.4 Análise qualitativa da resistência mecânica

Para avaliar as possíveis resistências da mistura solo-lodo, foi estabelecida uma correlação entre os valores de ISC e Módulo de Resiliência obtidos nos ensaios realizados por Lucena (2012) afim de estimar o possível valor do Módulo de Resiliência para os valores de ISC obtidos nesta pesquisa e assim compreender como a mistura se comportará.

Dessa forma, foram adotados os resultados obtidos para a mistura solo-lodo e a partir de uma regra de três simples, foi encontrada a relação entre o MR e o ISC, essa metodologia foi adotada por limitação de dados para caracterizar o comportamento de regressão linear dos valores para a mistura solo-lodo, os demais valores envolviam o

uso de estabilizantes, de tal forma que os valores para o módulo de resiliência estariam superestimados considerando os valores obtidos para a mistura estabilizada. Assim, a partir da relação encontrada para o lodo de ETE e ETA, foi possível determinar que:

$$(a) MR_{ETE} = 7,6.ISC \pm C$$

$$(b) MR_{ETA} = 5,9.ISC \pm C$$

Onde C é a constante que considera a variação do valor estimado para mais ou para menos; (a) representa o valor estimado do MR da mistura com solo e lodo de ETE e (b) para o a mistura de solo e lodo ETA. No valor para o MR estimado, o valor da constante foi considerado zero.

### 3.2.5 Análise qualitativa do desempenho dos estabilizantes à mistura solo lodo

O Quadro 3 apresenta referências que estudaram a utilização do resíduo das estações de tratamento, com uso de estabilizantes para aplicação na pavimentação, com base nesses trabalhos foi realizada uma revisão afim de avaliar qualitativamente os aditivos estabilizantes que os autores utilizaram em suas pesquisas.

**Quadro 3 – Referências que utilizaram algum tipo de estabilizante para a mistura solo-lodo**

| AUTOR(ES)  | TIPO        | TEMA   | ANO  |
|--|-------------|--|------|
| SILVA, A. M. S;<br>BARBOZA, E. N;<br>SILVA, M. F. C. | ARTIGO      | USO ALTERNATIVO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM PAVIMENTAÇÃO: UMA REVISÃO  | 2020 |
| ALVES, H.DA<br>CONSOLAÇÃO.                           | DISSERTAÇÃO | ANÁLISE LABORATORIAL DE LODOS DESIDRATADOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE – MG PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO | 2019 |
| KLEIN, Diego;<br>OLIVEIRA, D. M;<br>TEIXEIRA, T. L.  | ARTIGO      | RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO:UM ESTUDO DE VIABILIDADE PARA USO NA PAVIMENTAÇÃO NO MUNICÍPIO DE VILA VELHAS                     | 2019 |
| PIZONI, B. B;<br>MULLER, C. R;                       | ARTIGO      | ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COLÚVIO ALUVIONAR COM CIMENTO E LODO DE ESGOTO CALCINADO PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTO                             | 2019 |
| QUEIROZ, C. L. et.<br>al.                            | ARTIGO      | ESTABILIZAÇÃO DE MISTURAS DE SOLO ARGILOSO E RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL COM CIMENTO PORTLAND PARA USO EM PAVIMENTOS                                 | 2017 |
| PAIVA, P. Z.   | TCC         | ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO LODO DE ETA COMO MATERIAL ALTERNATIVO NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLO PARA PAVIMENTAÇÃO   | 2017 |
| DELGADO, J. V.<br>Colmares.                          | DISSERTAÇÃO | AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO LODO DA ETA GUANDU NA PAVIMENTAÇÃO COMO DISPOSIÇÃO FINAL AMBIENTALMENTE ADEQUADA   | 2016 |
| COELHO, R. V. et.<br>al.                             | ARTIGO      | USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA.   | 2015 |

|  |             |  |      |
|--|-------------|--|------|
| INGUNZA, M. P. D;<br>PEREIRA, K. L. A;<br>JUNIOR, O. F. S.     | ARTIGO      | USE OF SLUDGE ASH AS A STABILIZING ADDITIVE IN SOIL-CEMENT MIXTURES FOR USE IN ROAD PAVEMENTS  | 2014 |
| KELM, Tamile Antunes.  | DISSERTAÇÃO | AVALIAÇÃO DO USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA ESTABILIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO.   | 2014 |
| PEREIRA, K.L. de Araújo  | DISSERTAÇÃO | ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COM CIMENTO E CINZA DE LODO PARA USO EM PAVIMENTOS.   | 2012 |
| LUCENA, L. C. F. L.  | TESE        | ESTUDO DE APLICAÇÃO DE MISTURAS SOLO LODO EM BASE E SUBBASE DE PAVIMENTOS  | 2012 |
| FADANELLI, L. E. A.;<br>WIECHETECK, G. K.                      | ARTIGO      | ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM SOLO CIMENTO PARA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA   | 2010 |
| CHEN, Li; LIN, Deng-Fong.                                      | ARTIGO      | STABILIZATION TREATMENT OF SOFT SUBGRADE SOIL BY SEWAGE SLUDGE ASH AND CEMENT  | 2008 |
| MALLIOU, O.;<br>KATSIOTI, M.;<br>GEORGIADIS, A;<br>KATSIRI, A. | ARTIGO      | PROPERTIES OF STABILIZED/SOLIDIFIED ADMIXTURES OF CEMENT AND SEWAGE SLUDGE.  | 2007 |
| CORDEIRO, J. F. S.   | DISSERTAÇÃO | ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA E SOLIDIFICAÇÃO DO RESÍDUO OLEOSO GERADO NAS ATIVIDADES DE E & P DE PETRÓLEO COM SOLO PARA USO EM CAMADAS DE BASE E/OU SUB-BASE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. | 2007 |

Fonte: Autoria Própria (2021)



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

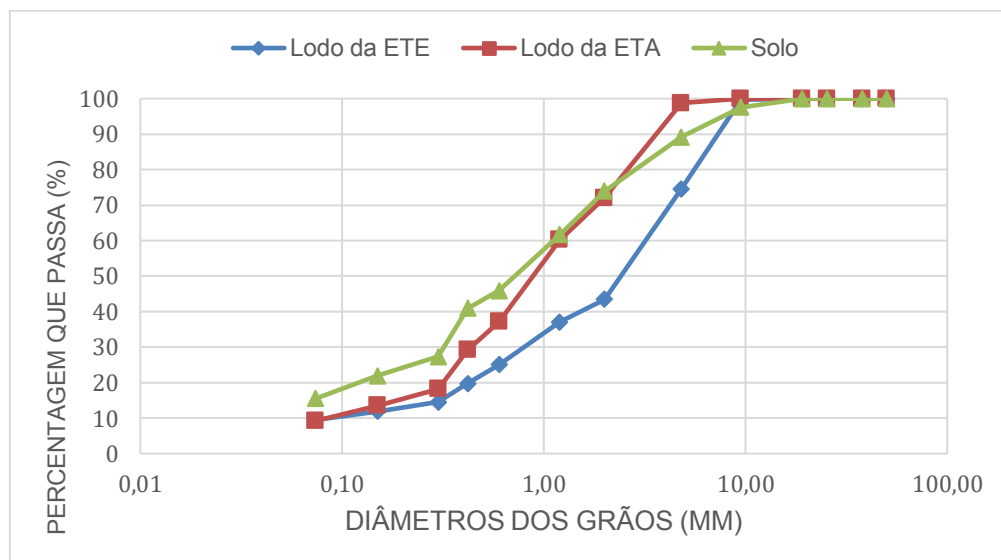
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos para caracterização do solo e dos resíduos, tais como massa específica, limites de consistência e granulometria. Posteriormente, os resultados dos ensaios de compactação e Índice de Suporte California tanto para o solo puro, quanto para as misturas de solo e lodo, nas porcentagens de 5% e 10% de lodo do volume total da amostra.

### 4.1 Caracterização física

#### 4.1.1 Análise granulométrica

A curva granulométrica para os lodos e solo puro foram determinadas de modo a compreender a distribuição dos grãos, e assim ter ciência da predominância de grãos finos ou grossos e então compreender o comportamento da mistura dos materiais em termos granulométricos. Dessa forma, as amostras foram ensaiadas em seus estados puros e a Figura 22 apresenta as curvas de distribuição dos tamanhos das partículas do solo e dos resíduos do lodo utilizados na pesquisa experimental.

**Figura 22 - Curva de granulometria dos lodos e do solo puro**



Fonte: Autoria Própria (2021)

Observa-se pela Figura 22 que as curvas do lodo de ETA e do solo são semelhantes, quanto ao lodo da ETE, apresentou diferente comportamento granulométrico dos seus grãos, apresentando diâmetros e percentuais inferiores ao

das demais curvas, dessa forma, a mistura do lodo da ETE com o solo, pode apresentar melhores resultados em termos de estabilização granulométrica, por proporcionar uma distribuição granulométrica melhor graduada, acarretando no preenchimento dos vazios.

#### 4.1.2 Determinação das propriedades físicas

No ensaio para determinação da quantidade de matéria orgânica dos resíduos, o lodo de ETA apresentou perda de 33% da massa inicial após a queima da matéria e o lodo de ETE, reduziu 49% da sua massa inicial.

Para as amostras de lodo também foram determinadas as Massas específicas aparente seca e umidade. A Tabela 5 apresenta os valores obtidos no experimento, a qual percebe-se que o lodo de ETA apresenta um percentual de umidade maior comparado ao lodo de ETE, o que está atrelado à natureza do resíduo, apresentando menor percentual de matéria orgânica em relação ao lodo de ETE, comparando com os valores obtidos por Lucena (2012), o lodo de ETE apresentou massa de 1,95g/cm<sup>3</sup> e o de ETA 2,05g/cm<sup>3</sup>. Portanto observa-se que os valores comparados apresentaram proximidade.

**Tabela 5 - Resultados de massa específica aparente seca dos lodos e respectiva umidade**

| <b>AMOSTRA</b> | <b>MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>UMIDADE (%)</b> |
|----------------|--|--------------------|
| Lodo da ETE    | 1,82   | 9,48               |
| Lodo da ETA    | 2,55   | 20,35              |

Fonte: Aatoria Própria (2021)

A Tabela 6 apresenta os resultados para os ensaios de Limites de consistência, massa específica aparente seca e umidade referente à amostra do solo, a partir dos quais, permitiram determinar o grupo da tabela HRB ao qual o material pertence.

**Tabela 6 - Índices físicos da amostra de solo**

| <b>Amostra do solo</b> |           |                    |  |
|------------------------|-----------|--------------------|--|
| <b>LL</b>              | <b>LP</b> | <b>Umidade (%)</b> | <b>Massa Específica dos grãos (g/cm<sup>3</sup>)</b> |
| 20,95%                 | 19,90%    | 1,65               | 2,73   |

Fonte: Aatoria Própria (2021)

Dessa forma, a partir dos resultados obtidos nos ensaios apresentados anteriormente, é possível determinar a classificação do solo em estudo, de acordo com a HRB, pertencendo assim ao subgrupo A-2-4.

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), o subgrupo A-2-4 abrange os materiais tais como pedregulho e areia grossa, no qual 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.

O solo que abrange a categoria A-2-4 se caracteriza por ser solos de granulação grossa, onde o seu comportamento geral pouco varia com a quantidade de água que envolve os grãos. Este tipo de solo é desprovido de coesão e sua resistência a deformação está diretamente ligada ao entrosamento e atrito entre os grãos e da pressão normal (à direção da força de deformação) a qual o solo está submetido.

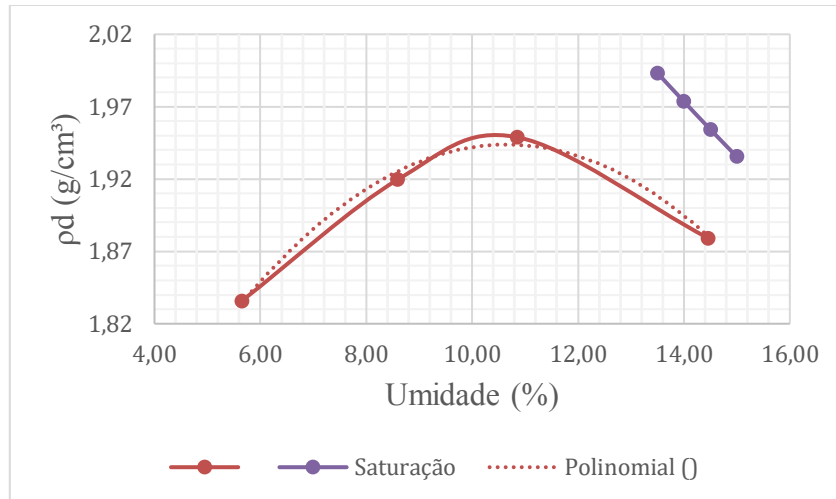
#### 4.2 Ensaio das misturas de solo e lodo

As misturas de solo e lodo de ETA e ETE foram submetidas aos ensaios de compactação e ISC nas porcentagens de 5% e 10% em massa seca de teores do lodo, a fim de avaliar quais destes percentuais apresentam melhor desempenho para a aplicação em base e sub-base de pavimento.

##### 4.2.1 Ensaio de compactação

A Figura 23 apresenta o gráfico de compactação do solo puro por meio do qual foi possível obter o valor da umidade ótima do solo e a massa específica aparente seca máxima. O processo da compactação consiste na redução dos vazios presentes no solo, cuja água ajuda na expulsão dos vazios, ocasionando o aumento do contato entre os grãos. Quando o solo é compactado na sua umidade ótima com a aplicação da energia de compactação necessária ao projeto, há o aumento de resistência à ruptura; redução de possíveis variações volumétricas; aumento do peso específico; impermeabilização e resistência ao cisalhamento. A partir da análise da curva de compactação, foi possível determinar a umidade ótima da amostra de solo, sendo de 10,6%.

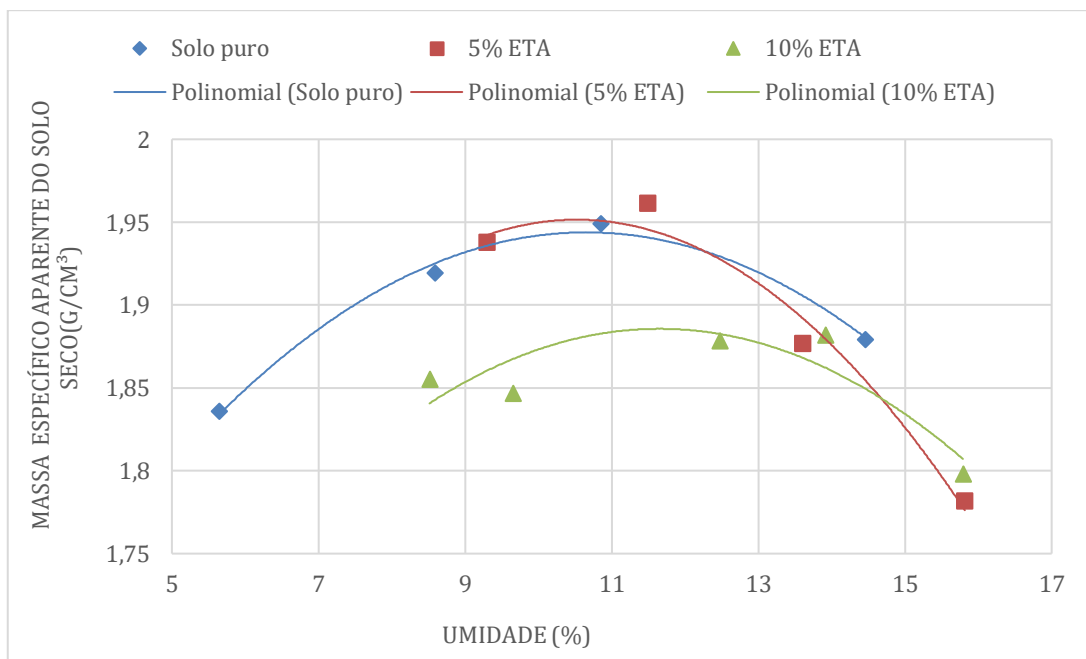
**Figura 23 - Curva de compactação do solo puro saturação de 100%**



Fonte: Autoria Própria (2021)

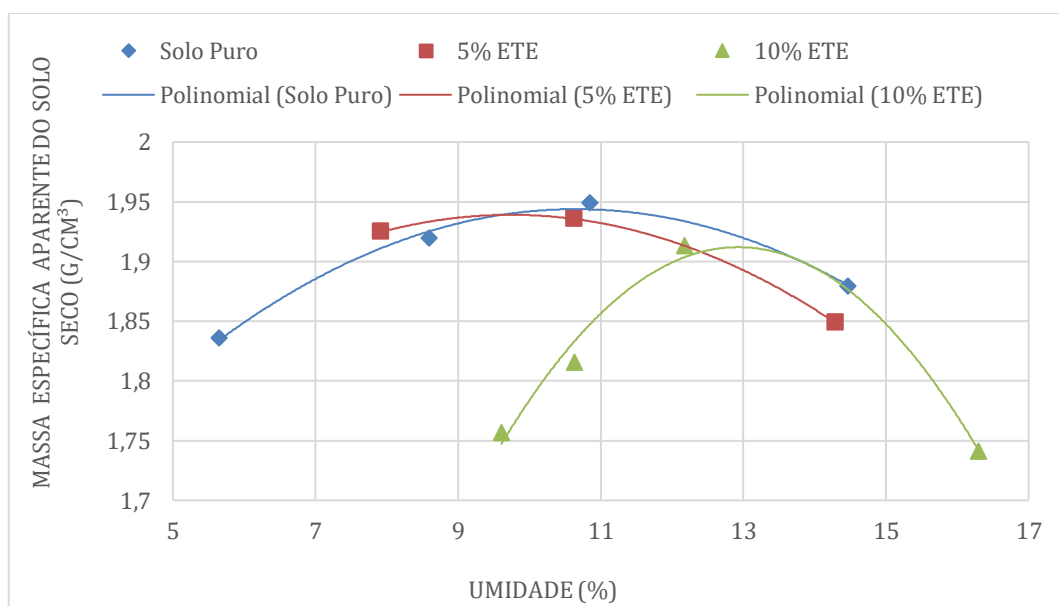
O ensaio de compactação foi realizado para os teores de 5% e 10% de lodo, tanto para ETE quanto para ETA. A partir do ensaio de compactação as umidades ótimas e as massas específicas aparentes secas das misturas foram obtidas. As Figuras 24 e 25 mostram as curvas de compactação para as porcentagens de lodo.

**Figura 24 - Curvas de compactação do solo puro e solo+ lodo ETA nas porcentagens de 5% e 10%**



Fonte: Autoria Própria (2021)

**Figura 25 – Curvas de compactação do solo puro e solo+ lodo ETE nas porcentagens de 5% e 10%**



Fonte: Aatoria Própria (2021)

Em ambos os casos, percebe-se que houve uma diminuição da massa específica aparente seca e o aumento da umidade para as misturas, quando comparadas ao solo puro, através da Tabela 7 é possível observar este comportamento. Embora o lodo da ETE apresente maior quantidade de matéria orgânica que o da ETA, as misturas com lodo ETE basicamente não tiveram redução de densidade, porque as densidades do lodo e do solo são próximas.

#### 4.2.2 Ensaio de ISC para as misturas

Para o ensaio de ISC com as misturas, foram adotados os teores de 5 e 10% dos lodos, e realizadas duas réplicas do CP. Com base nos ensaios de compactação e ISC, foi possível determinar os resultados que se encontram apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Resultados obtidos no ensaio de ISC – Proctor intermediário**

| AMOSTRA                | MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECO (g/cm³) | UMIDADE ÓTIMA (%) | ISC (%) | EXPANSÃO (%) |
|------------------------|--|-------------------|---------|--------------|
| Solo puro              | 1,94                                   | 10,6              | 10      | 0,41         |
| Solo + 5% de lodo ETE  | 1,93                                   | 9,6               | 17      | 1,23         |
| Solo + 10% de lodo ETE | 1,91                                   | 12,9              | 12      | 0,3          |
| Solo + 5% de lodo ETA  | 1,96                                   | 10,6              | 27      | 0,17         |

|                        |      |      |    |      |
|------------------------|------|------|----|------|
| Solo + 10% de lodo ETA | 1,89 | 11,7 | 83 | 0,31 |
|------------------------|------|------|----|------|

Fonte: Autoria Própria (2021)

Conforme observa-se na Tabela 7, a expansão obtida para o solo com 5% de lodo de ETE, apresentou um aumento na expansão, entretanto, por não representar um valor representativo, atribui-se à descalibragem do extensômetro. Para o valor obtido na mistura de solo e 10% de ETA, destaca-se que em virtude do acréscimo da resistência, é possível que a interação dos constituintes químicos presentes da amostra de lodo, tenham promovido o aumento deste valor.

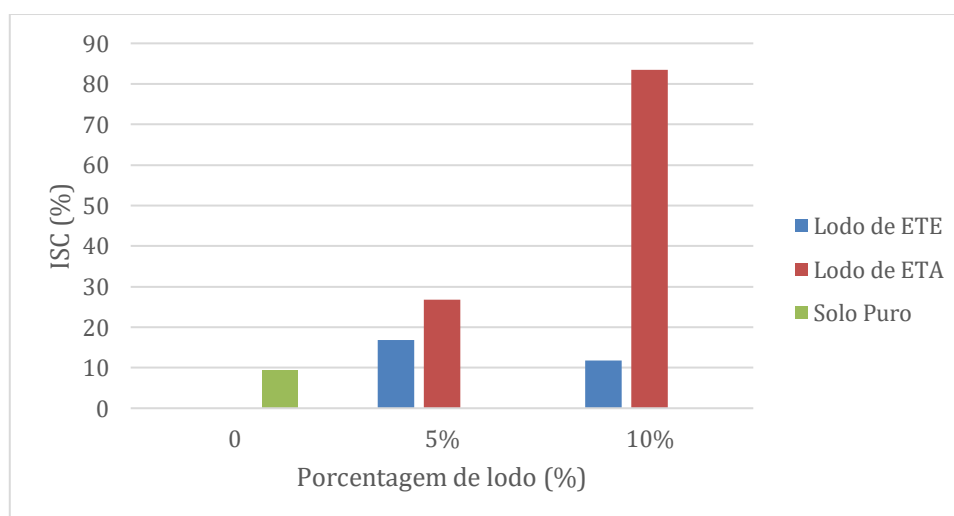
Os valores de referência apresentados na Tabela 8, dizem respeito ao ISC e à Expansão, ambos submetidos à energia Proctor intermediária, os quais são adotados pelo DNIT no caso de solos estabilizados granulometricamente. Têm-se que estes valores fazem referência às especificações de serviços para uso em estradas com tráfego pesado, onde  $N > 10^6$  (mais de 5 milhões de operações do eixo padrão de 8,2tf). No caso de tráfego intermediário,  $10^6 < N < 5 \times 10^6$ , o ISC deve ser superior a 60% para base.

**Tabela 8 - Valores de referência de ISC para solos estabilizados granulometricamente para base e sub-base**

| Camada do Pavimento           | ISC (%)     | Expansão (%)   |
|-------------------------------|-------------|----------------|
| Sub-base (DNIT 139/2010 - ES) | $\geq 20\%$ | Máxima de 1%   |
| Base (DNIT 141/2010 - ES)     | $\geq 80\%$ | Máxima de 0,5% |

Fonte: DNIT

**Figura 26 – Gráfico que apresenta o valor do ISC (%) em função do acréscimo de lodo ao solo**



Fonte: Autoria Própria (2021)

A partir da análise do gráfico da Figura 26 observa-se que o lodo de ETA apresentou os maiores valores de ISC, atingindo valores mínimos recomendados pelas normas do DNIT para uso em base e sub-base. O teor de 5% de ETA atingiu valores para uso em camada de sub-base e o de 10% para uso em base. Já o lodo de ETE não apresentou valores suficientes para a estabilização granulométrica.

#### 4.2.3 Análise qualitativa para a capacidade de resiliência das misturas

Com base nos ensaios de Módulo de Resiliência realizados por (LUCENA,2012; KELM, 2014; DELGADO; 2016) em seus estudos, foi verificado que a adição do lodo não apresentou significativas mudanças com relação ao melhoramento da capacidade resiliente do solo. Lucena (2012) apenas conseguiu obter resultados para os teores de 10% do lodo de ETE e 20% do lodo da ETA, os demais teores não foram possíveis analisar pois o ensaio foi inconclusivo, pois as amostras se deformaram completamente já nas primeiras tensões aplicadas.

Assim como ocorrido nos estudos citados anteriormente, acredita-se que o comportamento do MR para as misturas de solo-lodo neste estudo, apresentarão comportamentos parecidos. Para avaliar esta correlação, foi realizado uma análise comparativa com os resultados obtidos por Lucena (2012) apresentados na Tabela 9, baseado nos valores dos ensaios de ISC obtidos nesta pesquisa, para comprovar este comportamento. Esta relação foi considerada, uma vez que o solo estudado pela autora, pertence ao mesmo subgrupo A-2-4, do solo em estudo.

**Tabela 9 - Valores obtidos por Lucena (2012) para os ensaios de ISC e MR para os respectivos teores de lodo**

| <b>Valores de LUCENA (2012)</b> |                |                                |
|---------------------------------|----------------|--------------------------------|
|                                 | <b>ISC (%)</b> | <b>Valor médio do MR (MPa)</b> |
| <b>20% de ETA</b>               | 76             | 450                            |
| <b>10% de ETE</b>               | 33             | 250                            |

Fonte: LUCENA (2012)

Com base nos valores da Tabela 9, foi determinada as equações lineares que estão apresentadas no item 3.4.5, assim foram obtidos os valores apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores estimados para o MR com base no valor do ISC

|                   | ISC (%) | Estimativa do MR (Mpa) |
|-------------------|---------|------------------------|
| <b>5% de ETE</b>  | 17      | 130                    |
| <b>10% de ETE</b> | 12      | 90                     |
| <b>5% de ETA</b>  | 27      | 150                    |
| <b>10% de ETA</b> | 83      | 490                    |

Fonte: Autoria Própria (2021)

Portanto, mediante as estimativas realizadas os valores encontrados para os possíveis MR das misturas de solo e lodo estão condizentes com os resultados apresentados na literatura. Delgado (2016) na mistura de solo arenoso com o lodo obteve para os teores de 5% e 10% do lodo de ETA os respectivos valores do MR, 270 MPa e 210 MPa, já Kelm (2014) para o lodo de ETE, obteve o maior valor para o módulo de resiliência de 150 MPa para o teor de 5%. Dessa forma, os valores estimados podem apresentar uma margem de diferença comparados aos da literatura, entretanto essa discrepância não se apresenta elevada, observa-se que os valores estão condizentes, caracterizando que o lodo não forneceu melhoria ao solo em termos de deformação elástica, tendo em vista que ao aumentar o teor a resistência diminui.

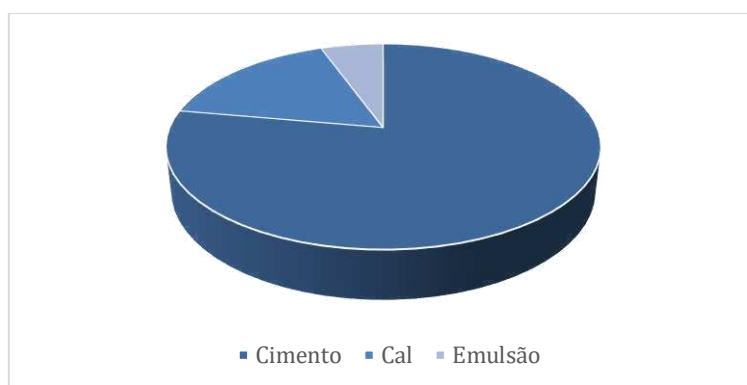
#### 4.2.4 Análise qualitativa do uso dos aditivos estabilizantes

A escolha do aditivo a ser adotado para a estabilização irá depender do tipo de solo, com base nas suas propriedades. Dessa forma, analisou-se as referências apresentadas no Quadro 2 para ter conhecimento do tipo de aditivo utilizado pelos autores, levando em consideração o tipo de solo utilizado por eles.

Entre as dezesseis referências analisadas, foi possível determinar o gráfico da Figura 27, onde mostra que a maior parte das pesquisas utilizaram o cimento como aditivo estabilizador da mistura solo-resíduo, seguido da cal e posteriormente a adição de emulsão.



**Figura 27 - Gráfico da distribuição de referências que utilização um ou mais dos aditivos (Cimento, Cal e Emulsão)**



Fonte: Autoria Própria (2021)

Com base nas referências estudadas, foi possível destacar as que possuíam o mesmo modo de emprego ao desta pesquisa e, portanto, determinar as melhores misturas obtidas. Dessa forma, o Quadro 4 foi criada para ilustrar este cenário.

**Quadro 4 Quadro de referências que estudam a aplicação do lodo na pavimentação**

| AUTOR(ES)                          | COMPOSIÇÃO   | TEORES DE LODO                            | MELHORES MISTURAS   | MODO DE EMPREGO                 |
|------------------------------------|--|---|---|---------------------------------|
| ALVES(2019)                        | Lodo de ETA puro + estabilizante (cal e cimento) 5, 9 e 13%  | Lodo puro                                 | lodo + adição de cimento  | Reforço de subleito e sub-base  |
| PIZONI, B. B; MULLER, C. R; (2019) | Lodo de ETE + Solo A-5 + Cimento (5 e 8%)  | 5% e 8%                                   | Solo + 5% de Lodo e 8% de cimento   | Subleito do pavimento           |
| DELGADO (2016)                     | (95, 90 e 85%) Material (Pó de pedra, solo arenoso e solo argiloso) + % LETA e 85% Pó de pedra + 15% LETA + 2% Cimento CPII E 32 | 5, 10 e 15%                               | Pó de pedra + 5% Lodo ETA e Pó de pedra + 15% Lodo ETA +2% Cimento            | Camada de Sub base do pavimento |
| COELHO et. al. (2015)              | Solo argiloso (A7) + LETA (1:1), Solo argiloso + LETA + cimento CPII Z 32 (1:1:10%) e Solo arenoso (A-2-6) + LETA (1:0,25)       | Solo argiloso (1:1) e Solo arenoso (1:25) | Solo argiloso (A7) + Lodo ETA (1:1), Solo arenoso (A-2-6) + Lodo ETA (1:0,25) | Subleito do pavimento           |
| KELM (2014)                        | Solo + Lodo de ETE + estabilizante (cal e cimento); Lodo + Pó de pedra   | 5%,10% e 15%                              | Pó de pedra + 5% Lodo de ETE + 4% de cimento                                  | Base, Sub-base                  |
| LUCENA (2012)                      | Solo (Areia Siltosa) + Lodo (ETE ou ETA) + estabilizante (cal, cimento e emulsão)  | 5%,10%,15% e 20%                          | Solo + 10% Lodo ETE + 8% cimento e Solo + 20% Lodo ETA + 1% emulsão           | Base, Sub-base                  |

Fonte: Autoria Própria (2021)

Portanto, observa-se que o cimento apresentou resultados satisfatórios quando misturados tanto ao lodo puro quanto a solos arenosos e pó de pedra (material granular). Em todos os casos os estabilizantes apresentaram incrementos de

resistências as misturas de ambos os resíduos, mesmo que uns tenham apresentado melhores resultados, como é o caso do cimento comparado à cal, no estudo realizado por Kelm (2014), assim como no estudo de Lucena (2012).

No que diz respeito ao uso dos estabilizantes químicos, ainda que o cimento seja o mais utilizado e apresente bons resultados entre as referências analisadas, este tipo de aditivo não corresponde ao melhor para qualquer tipo de solo, é necessário compreender as propriedades do material que precisa ser estabilizado, ainda assim alguns autores analisaram mais de um tipo de aditivo, para então compreender aquele que mais apresentou resultados positivos.

Dessa forma, se tratando da mistura solo-lodo é de extrema importância analisar diferentes tipos de aditivos, pois o comparativo entre os resultados irá determinar aquele que apresenta melhor custo benefício, apresentando bons resultados em termos de resistências exigidas pelo DNIT.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que, quanto a caracterização física dos resíduos, o lodo de ETA apresentou maior similaridade com o solo em termos da distribuição granulométrica, diferente do lodo de ETE, que apresentou maior quantidade de grãos finos.

Os ensaios de Índice de Suporte California para as misturas de solo e lodo mostraram que o resíduo de ETA apresentou os melhores resultados, no qual o teor de 5% e 10% corresponderam ao valor do ISC 27% e 83% respectivamente, estes valores estão dentro do limite estabelecido pelas normas do DNIT para solos estabilizados granulometricamente para uso em sub-base e base. Em virtude do solo e lodo de ETA terem apresentado granulometrias parecidas, o que não caracteriza um aspecto positivo para a estabilização granulométrica, é possível que esta estabilização fornecida pelo lodo da ETA, tenham envolvido os agentes químicos presentes na sua composição, favorecendo o aumento da sua resistência. Quando a mistura com lodo de ETE não apresentou resultados positivos para valores a estabilização granulométrica como esperado, sendo necessário que estudos com estabilizantes químicos sejam realizados para garantir a melhoria das suas propriedades mecânicas.

Após análises de referências bibliográfica quanto ao uso dos estabilizantes químicos, foi possível observar que todos os aditivos estudados pelos autores apresentaram incrementos nas propriedades mecânicas das misturas solo-lodo, neste sentido vale ressaltar que o tipo de solo que determina a escolha do estabilizante. Dessa forma, o cimento foi o mais empregado entres os estabilizantes e apresentou bons resultados na estabilização de misturas com os resíduos e solos arenosos. Quanto as misturas com o lodo de ETE, exigiram maiores teores de estabilizantes, comparados ao lodo de ETA.

Portanto tem-se que o lodo de Estação de Tratamento de Água possui potencial de estabilização quando misturados a um solo classificado como A-2-4 para uso em camadas de base e sub-base de pavimentos, já o lodo de ETE não forneceu incrementos significativos à resistência mecânica do solo.

Para pesquisas futuras recomenda-se: Estudar a estabilização da mistura com o uso de aditivos (cal, cimento e emulsão); aprofundar nos ensaios de resistência mecânica para as misturas com uso de estabilizantes; realizar análises da

infiltrabilidade e da impermeabilidade dos solos após estabilização; estudar as interações biológicas que irão ocorrer no solo quando adicionados os resíduos de ETA e ETE;

## REFERÊNCIAS

ABEDA- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual básico de emulsões asfálticas**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Determinação da massa específica de grãos de solos que passam na peneira de abertura 4,8mm. Rio De Janeiro, 2016.

ACHON, C.L. **Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água a luz dos conceitos da ISO 14. 001**. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 230 p. 2008

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro**. Eng Sanit Ambient. v.18 n.2, 2013, p115-122.

ADASKA A; TRESOUTNIEK, S.W; WEST, P.B. **Stabilization/Solidification of Wastes Using Portland Cement**. Portland Cement Association, PCA publication n. EB071, 1998.

ALVES, Hebert da Consolação. **Análise laboratorial de lodos desidratados de estações de tratamento de água da região metropolitana de Belo Horizonte – MG para uso em pavimentação**. 112 f. 2019. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

ANDREOLI, C.V.; PEDROZA, E.C.; MOREIRA, E.A.; CAVALCANTI, P.F.; SOBRINHO, P.A.; HAANDEL, A. **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: Abes, 2006. 417 p.

ARAÚJO, R. N.; SILVEIRA, L. R. **Reaproveitamento de Resíduos de ETA E ETE em Obras De Engenharia**. Revista técnica e tecnologia: Ciência, Tecnologia, Sociedade (2017)

AREIAS, I.O.R; VIEIRA, C.M.F; MANHÃES, R. S. T; INTORNE, A.C. **Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha.** Cerâmica. Vol.63 no.367. São Paulo. Julho de 2017;

AREIAS, I.O.R; VIEIRA , C.M.F; COLORADO ,H.A.; DELAQUA, G.C.G; MONTEIRO, S.N.; AZEVEDO A.RG **Could city sewage sludge be directly used into clay bricks for building construction? A comprehensive case study from Brazil.** Journal of Building Engineering. Vol. 31. Setembro de 2020;

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, 2006;

BESEN, Gina Rizpah; GÜNTHER, Wanda Maria Risso; RODRIGUES, Angela Cassia; BRASIL, Ana Lúcia. Resíduos sólidos: vulnerabilidades e perspectivas: a insustentabilidade da geração excessiva de resíduos sólidos. In: **Meio ambiente e saúde: o desafio das metrópoles** [S.l: s.n.], 2010.

BITTENCOURT, B. S., AISSE, M. M., SERRAT, B. M. **Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná.** Eng. Sanit. Ambient. Vol.22 no.6, Rio de Janeiro, nov./Dec. 2017;

Brasil. Departamento Nacional de infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação.** 3ª ed. – Rio de Janeiro, 2006

BRASIL, **Lei N° 12.305** de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). European Commission, 1996.

BRASIL, **Lei N° 9.605/98** de 12 de fevereiro de 1998 - Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências, 1998.

BREHM, F. A.; KULAKOWSKI, M.P.; EVALDT, D.C.; MORAES, C.A.M.; PAMPANELLI, A.B. Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização

em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 15-27, abr./jun. 2013.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, Setembro de 2017;

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 6. ed. 234 p.

CHEN, Li; LIN, Deng-Fong. STABILIZATION TREATMENT OF SOFT SUBGRADE SOIL BY SEWAGE SLUDGE ASH AND CEMENT. **Journal of Hazardous Materials**. Vol 162. Pag 321-327. 2009;

CIESLIK, B. M; NAMIESNIK, J; KONIECZKA, P. Review of Sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. **Journal of Cleaner Production**. 90, 2015;

COELHO, R. V. et. al. **Uso de lodo de Estação de Tratamento de Água na Pavimentação Rodoviária**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil. Vol 10. Nº 02. pp 11-22, Setembro de 2015;

CORDEIRO, J. F. S. **Estabilização química e Solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo com solo para uso em camadas de base e/ou sub-base de pavimentos rodoviários**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007;

CHRISTODOULOU, A.; STAMATELATOU, K. Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. **Water Science and Technology**, v. 73, n. 3, p. 453–462, 2016.

DELGADO, J. V. C. **Avaliação Da Aplicação Do Lodo Da Eta Guandu Na Pavimentação Como Disposição Final Ambientalmente Adequada**. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE,

Universidade Federal do Rio De Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ME- 082/94**. Solos - Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ME- 122/94**. Solos - Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 139/2010 - ES**. Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/2010 - ES**. Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 164/2013 - ME**. Solos - Compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 172/2016 - ME**. Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DOS TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

SAPESP. **Tratamento de água**. Disponível em <<<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=47>>> Acesso em 22/10/2019;

DU Y; JIANG N. J; LIU S; JIN. F; SINGH. D, N; PUPPALA. A. J. Engineering properties and microstructural characteristics of cement-stabilized zinc-contaminated kaolin. **Canadian Geotechnical Journal**. Dezembro de 2013.



DUCOLI, S., ZACCO, A., BONTEMPI, E. Incineration of sewage sludge and recovery of residue ash as building material: A valuable option as a consequence of the COVID-19 pandemic. **Journal of Environmental Management**. Vol. 282, 2021.

FADANELLI, L. E. A.; WIECHETECK, G. K. ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM SOLO CIMENTO PARA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. Vol. 2. Nº 2. Pag. 31-37. 2010;

FIESP, Departamento da Indústria da Construção. **Pavimento de vias no Brasil: infraestrutura de transportes terrestres rodoviários e cadeias produtivas da pavimentação**. FIESP. São Paulo. 70 p. 2017;

GEYER, A. L. **Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estação de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto**. Porto Alegre, 2001. Tese (doutoramento em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GONDIM, L. M., **Estudo experimental de misturas Solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo Jaguaribe/estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.

HOPPEN, C; PORTELLA, K. F; JOUKOSKI, A; TRINDADE, E. M; ANDREÓLI, C. V. Uso De Lodo De Estação De Tratamento De Água Centrifugado Em Matriz De Concreto De Cimento Portland Para Reduzir O Impacto Ambiental. **Quim. Nova**, Vol. 29, No. 1, 79-84, 2006

HUNCE, S. Y; AKGUL, D; DEMIR. G; MERTOGLU. B. Solidification/stabilization of landfill leachate concentrate using different aggregate materials. **Waste Management**. Vol 32. 2012

IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD - 2018**. Disponível em, <<encurtador.com.br/LUX08>> Acesso em, 16-03-2021

JACOBI, Pedro Roberto; BESEN, Gina Rizpah. **Gestão de Resíduos Sólidos em São Paulo: Os desafios da sustentabilidade**. Estud. av. vol.25 no.71 São Paulo jan./abr. 2011

KELM, Tamile Antunes. **Avaliação do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação**. Dissertação de Mestrado. UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro. 2014.

KLEIN, Diego; OLIVEIRA, D. M; Resíduos De Estação De Tratamento De Água E Esgoto: Um Estudo De Viabilidade Para Uso Na Pavimentação No Município De Vila Velha/Es. **Demandas Essenciais para o Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental 3**. Atena Editora. Cap. 16, pag. 163-173. 2019;

LUCENA, L. C. F. L. **Estudo de aplicação de misturas solo lodo em base e subbase de pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife –PE, 2012.

LUCENA, L. C. F, JUCA, J. F., SOARES, J. B., & PORTELA, M. G. Potential uses of sewage sludge in highway construction. **Journal of materials in civil engineering**, 26(9):1. 2014

LIN, X.D.; POON, C.S.; SUN, H.; LO, I.M.C; KIRK, D.W. Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials. **Journal of Hazardous Materials**. v. A82. p. 215- 230. 2001

LYNN, C.J; DHIR, R.K; GHATAOTA, G.S; WEST, R.P. **Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete**. Construction and Building Materials. Vol. 98, November 2015, Pag. 767-779.

MACÊDO, M.M. **Solos modificados com cimento – efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2004.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Sweden: Lulea° University of Technology, 2013.

MALLIOU, O.; KATSIOTI, M.; GEORGIADIS. A; KATSIRI, A. **Properties of stabilized/solidified admixtures of cement and sewage sludge**. Cement and Concrete Composites, Vol 29, 2007.

MARQUES, G. L. O. **PAVIMENTAÇÃO TRN 032**. Universidade Federal de Juiz de Fora Faculdade de Engenharia – Departamento de Transportes e Geotecnia. Juiz De Fora – MG, 2006;

MELCHERT, M. B. M. **Solidificação e estabilização de resíduos de catalisadores contendo níquel e alumínio em cimento portland**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP. 2012

METCALF, L; EDDY, H. P. Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse. **New York: Ed. McGraw-Hill**, 1334 p., 2002.

MALLIOU, O.; KATSIOTI, M.; GEORGIADIS. A; KATSIRI, A. Properties Of Stabilized/Solidified Admixtures Of Cement And Sewage Sludge. **Cement and Concrete Composites**. Vol 29. Pag 55-61. 2007

NASCIMENTO, A.L; SOUZA, A.J; OLIVEIRA, F.C.; COSCIONE, A.R, VIANA, D.G; REGITANO, J. B. Chemical Attributes Of Sewage Sludges: Relationships To Sources And Treatments, And Implications For Sludge Usage In Agriculture. **Journal Of Cleaner Production**. 258:1-12. 2020

OLIVEIRA, A. G.; BARROS, A. D.; LUCENA, L.C.F.; LUCENA, A. E. F.; PATRÍCIO, J. D. Evaluation of calcined textile sludge as a stabilizing material for highway soil. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**. Vol. 7, 2020;

ONYELOWE, K. C; VAN, B. D.; UBACHUKWU, O; EZUGWU, C; . Recycling and reuse of solid wastes; a hub for ecofriendly, ecoefficient and sustainable soil, concrete, wastewater and pavement reengineering. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, 14, p.440–451, 2019.

PAIVA, P. Z. **ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO LODO DE ETA COMO MATERIAL ALTERNATIVO NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLO PARA PAVIMENTAÇÃO**. Orientador: Fernando Moreno Suarte Junior. 2017. (TCC) Graduação. Curso de

Engenharia Civil Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA). Palmas – TO. 2017

PEREIRA, K.L. de Araújo. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 125. 2012;

PIZONI, B. B; MULLER, C. R; **Estabilização De Um Solo Colúvio Aluvionar Com Cimento E Lodo De Esgoto Calcinado Para Aplicação Em Camadas De Pavimento**. Universidade Do Extremo Sul Catarinense Curso De Engenharia Civil. p 17. Criciúma – SP. 2019;

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. **Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento**. Cerâmica. Vol.59 no.352. São Paulo. Outubro de 2013;

ROJAS, J. W. J. **Estabilização de Solos**. Coleção Ciências do Pampa, Universidade Federal do Pampa. Campus Caçapava do Sul. - n.1, Setembro de 2015;

ROLIM, Mario Monteiro. **Caracterização Físico-Mecânica de Misturas de Solo, Cal e Resíduo “Água de Cola”**. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, São Paulo, 1999.

SABESP. Diretoria Metropolitana - M Unidade de Negócio de Tratamento de Esgotos da Metropolitana - MT. **A Questão dos Lodos Produzidos nas ETEs na RMSP**. Disponível em:<< <https://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2007/10/sabesp.pdf>>>. Acesso em: 20-05-2021.

SANTOS, J. **Estabilização de uma argila laterítica do Distrito Federal para uso em rodovias de baixo volume de tráfego**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2004.

SHI, C.; SPENCE, R. Designing of cement-based formula for solidification/stabilization of hazardous, radioactive, and mixed wastes. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 34, n.4, jul./ago. 2004.

SILVA, A. C; TORRADO, P. V; JUNIOR, J. S. A. **Métodos De Quantificação Da Matéria Orgânica Do Solo**. R. Un. Alfenas, Alfenas, 5:21-26,1999

SIQUEIRA, I. S. et al. 9935 SMART PLANT: A TECNOLOGIA EM PROL DO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE ETES. **AESABESP - Associação dos Engenheiros da Sabesp**. São Paulo – SP, 2018.

SMOL, M; KULCZYCKA, J; HENCLIK, A; GORAZDA, K; WZOREK, Z. The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 95, Pag. 45-54. 2015

SOBRINHO, M. A. M. et. al. **Geração, tratamento e disposição final dos resíduos das estações de tratamento de água do estado de Pernambuco**. Eng. Sanit. Ambient. vol.24 no.4 Rio de Janeiro. Agosto, 2019.

SPENCE, R. D; SHI. C. **Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive and Mixed Wastes**. Boca Raton: CRC Press, 2005

U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **Treatability Studies For Solidification/Stabilization Of Contaminated Material**. Technical Letter N° 1110-1-158. Washington, 1995.

VISENTIN, Roseli; MATEUS, Caroline; ESPERANCINI, Maura; Roberto VILLAS BOAS, R. VIABILIDADE ECONÔMICA DA COMPOSTAGEM DO LODO DE ESGOTO PARA USO AGRÍCOLA. **Holos Environment**. 20(2) 152-167. 2020.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2010.

WILES, C.C. A Review of Solidification/Stabilization Technology. **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 14, pp.5-21, 1987.

WANG, Y.S.; DAI, J.G.; WANG, L.; DANIEL, C.W.T.; POON, C.S. **Influence of lead on stabilization/solidification by ordinary Portland cement and magnesium phosphate cement**. v. 190, p. 90-96, Jan. 2018.

ZHANG. W; LIN, M. **Influence of redox potential on leaching behavior of a solidified chromium contaminated soil.** Science of The Total Environment. Vol. 733. Setembro de 2020;