



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO
E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS



**AVALIAÇÃO DO USO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO
COMO ESTABILIZADOR EM CAMADAS DE PAVIMENTO**

GABRIEL ARAUJO SILVA MARQUES

2025

CAMPO GRANDE - MS



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO
E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS



AVALIAÇÃO DO USO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO COMO ESTABILIZADOR EM CAMADAS DE PAVIMENTO

GABRIEL ARAUJO SILVA MARQUES

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul como requisito à obtenção de título de mestre em Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Meira de Vasconcelos

GABRIEL ARAUJO SILVA MARQUES

**AVALIAÇÃO DO USO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO
COMO ESTABILIZADOR EM CAMADAS DE PAVIMENTO**

Prof. Dr^a. Patricia Colombo Mescolotti
Coordenadora de Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Meira de Vasconcelos (orientador)

Prof. Dr. Daniel Anijar de Matos (coorientador)

Profa. Dra. Aleska Kaufmann Almeida (membro interno)

Prof. Dr. José Otávio Serrão Eleuterio (membro externo)

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a minha esposa
Fernanda Bulcão

AGRADECIMENTOS

Agradeço, a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, pela fé e pela força que me sustentaram ao longo de toda esta jornada.

À minha esposa Fernanda, dedico um agradecimento especial. Seu apoio incondicional em minhas decisões, seu acolhimento nos momentos de maior dificuldade e sua imensa compreensão durante as longas horas de estudo e ausência foram a base sobre a qual este trabalho pôde ser construído. Sem você, esta conquista não seria possível.

Aos meus pais, Alcides e Katia, que são meus maiores exemplos de vida, pelo amor incondicional e por todo apoio, minha eterna gratidão por todos os ensinamentos e pelo incentivo constante. Aos meus irmãos, Henrique e Vinicius, que, mesmo à distância, sempre se fizeram presentes com palavras de força e apoio. À minha sogra, Francisca, e minha cunhada, Isabella, que me acolheram como uma segunda família, meu muito obrigado.

Agradeço aos meus amigos e familiares, por todos os momentos de descontração, pelo apoio que me ofereceram e todas as orações, tornando o caminho mais leve.

Ao corpo docente e aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais (PGRN) da UFMS, agradeço pelos valiosos conhecimentos e experiências compartilhados ao longo destes dois anos. Cada aula, debate e conversa contribuiu imensuravelmente para a minha formação.

Agradeço imensamente aos meus orientadores, Prof. Dr. Alexandre Meira e Prof. Dr. Daniel Anijar. Agradeço pela confiança, pela paciência, pela sabedoria na condução deste trabalho e, principalmente, por todos os ensinamentos que transcendem a academia.

E por fim, agradeço a mim, por não desistir, por buscar sempre novos conhecimentos e por tentar evoluir como pesquisador.

RESUMO

A gestão de lodo de estações de tratamento de água (ETA) e esgoto (ETE) representa um desafio ambiental e econômico significativo no Brasil, onde a disposição em aterros é onerosa e insustentável. Estudos anteriores exploraram o uso de lodo como material alternativo em pavimentação, mas a maioria focou em propriedades estáticas como resistência à compressão, deixando uma lacuna na avaliação do comportamento dinâmico e resiliente sob cargas cíclicas, essencial para aplicações em camadas de base de pavimentos. Além disso, há escassez de pesquisas que integrem análise técnica, ambiental e econômica para solos tropicais lateríticos. O objetivo deste estudo é avaliar a viabilidade técnica do uso de lodo de ETE como estabilizante em camadas de base de pavimentos, investigando o comportamento mecânico de misturas de solo laterítico (Argissolo Vermelho-Amarelo) com lodo em diferentes proporções (5%, 7,5% e 10%). Realizaram-se uma revisão sistemática da literatura e um estudo experimental com caracterização geotécnica do solo e do lodo, ensaios de compactação, Mini-CBR, expansão e módulo de resiliência, seguindo normas nacionais (DNIT e ABNT). O lodo foi coletado da ETE Los Angeles (Campo Grande-MS) e incorporado ao solo da Jazida J-10. A mistura com 7,5% de lodo apresentou o melhor desempenho, com aumento de 60% no CBR (de 13,8% para 21,8%) e densidade seca máxima de 1,979 g/cm³, atendendo aos critérios para sub-base de pavimentos flexíveis (CBR $\geq$ 20%). Não houve expansão em nenhuma mistura. Teores superiores a 10% reduziram significativamente a resistência e a densidade, indicando um limite de transição na estrutura do material. Como limitações, o estudo não incluiu ensaios de deformação permanente sob carregamento cíclico, essenciais para validar o desempenho em condições reais de tráfego. Além disso, a análise ambiental limitou-se a ensaios de lixiviação iniciais, sem monitoramento de longo prazo ou avaliação de micropoluentes orgânicos. Recomenda-se a realização de ensaios de deformação permanente, a construção de trechos experimentais para validação em campo, e a condução de uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) para quantificar ganhos ambientais e econômicos. Estudos com outros tipos de solos e lodos também são necessários para ampliar a aplicabilidade dos resultados.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Reaproveitamento, Estabilização, Infraestrutura viária, Resiliência estrutural, Mobilidade, Engenharia de transportes, Ciências Ambientais.

ABSTRACT

The management of sludge from water treatment plants (WTP) and sewage treatment plants (WWTP) represents a significant environmental and economic challenge in Brazil, where landfill disposal is costly and unsustainable. Previous studies have explored the use of sludge as an alternative material in paving. Still, most have focused on static properties such as compressive strength, leaving a gap in the evaluation of dynamic and resilient behavior under cyclic loads, essential for pavement base layer applications. In addition, there is a paucity of research that integrates technical, environmental, and economic analysis for tropical lateritic soils. The objective of this study is to evaluate the technical feasibility of using WWTP sludge as a stabilizer in pavement base layers, investigating the mechanical behavior of lateritic soil mixtures (Red-Yellow Ultisol) with sludge in different proportions (5%, 7.5% and 10%). A systematic review of the literature and an experimental study were carried out with geotechnical characterization of soil and sludge, compaction tests, Mini-CBR, expansion, and resilience modulus, following national standards (DNIT and ABNT). The sludge was collected from the Los Angeles WWTP (Campo Grande-MS) and incorporated into the soil of the J-10 deposit. The mixture with 7.5% sludge showed the best performance, with a 60% increase in CBR (from 13.8% to 21.8%) and maximum dry density of 1.979 g/cm³, meeting the criteria for sub-base of flexible pavements (CBR $\geq$ 20%). There was no expansion in any mixture. Contents higher than 10% significantly reduced strength and density, indicating a transition limit in the material structure. As limitations, the study did not include permanent deformation tests under cyclic loading, which are essential to validate performance in real traffic conditions. In addition, the environmental analysis was limited to initial leaching trials, with no long-term monitoring or evaluation of organic micropollutants. It is recommended to carry out permanent deformation tests, build experimental stretches for validation in the field, and conduct a Life Cycle Analysis (LCA) to quantify environmental and economic gains. Studies with other types of soils and silts are also needed to expand the applicability of the results.

Keywords: Sustainability, Reuse, Stabilization, Road Infrastructure, Structural Resilience, Mobility, Transportation Engineering, Environmental Sciences.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fluxograma de seleção de artigos do portfólio	6
Figura 2 Periódicos mais citados no Portfólio.....	7
Figura 3 Série histórica de publicações por ano	8
Figura 4 Mapeamento palavra chaves	10
Figura 5 Países dos artigos	14
Figura 6 Secador Mecânico ETE.....	31
Figura 7 Caçamba com lodo.....	32
Figura 8 Processo de secagem térmica do lodo.....	33
Figura 9 Lodo após destorroamento	33
Figura 10 Mapa de localização da Jazida J-10 contendo sua classificação conforme a EMBRAPA.....	34
Figura 11 Aspecto, em talude, do perfil de solo da jazida J-10.....	35
Figura 12 Destorroamento do solo	37
Figura 13 Quarteamento do solo	37
Figura 14 Mapa mental dos ensaios	40
Figura 15 Gráfico de plasticidade.....	49
Figura 16 Ábaco de classificação MCT	52
Figura 17 Classificação MCT.....	53
Figura 18 Soquete mecânico.....	58
Figura 19 Molde tripartido compactação.....	59
Figura 20 Cp de Mini-CBR imerso	64
Figura 21 Equipamento triaxial	68
Figura 22 Confinamento MR.....	69
Figura 23 Posicionamento LVD	70
Figura 24 Ensaio de limite de Liquidez.....	74
Figura 25 Reta de escoamento.....	74
Figura 26 Ensaio limite de plasticidade.....	75
Figura 27 Porções de solo retido por peneira no ensaio de granulometria.....	77
Figura 28 Curva granulométrica do solo da Jazida J-10.	78
Figura 29 Ensaio Massa Específica dos Sólidos	79
Figura 30 Classificação SUCS	82
Figura 31 Gráfico de plasticidade.....	83

Figura 32 Gráfico para classificação de solos pela metodologia MCT.....	87
Figura 33 Difratoograma de Raios X para o Solo J-10	90
Figura 34 Principais fases DRX	91
Figura 35 Difratoograma de Raios X para o Lodo	92
Figura 36 Principais fases análise de DRX do Lodo	92
Figura 37 Micrografias do lodo de ETE em diferentes ampliações	94
Figura 38 Variação da Umidade Ótima (%) com o teor de lodo	96
Figura 39 Variação da Densidade Seca Máxima com o teor de lodo.....	97
Figura 40 Gráficos de compactação	99
Figura 41 MR médio	104
Figura 42 MR vs. Tensão Confinante.....	105
Figura 43 MR vs. Tensão Desvio	106
Figura 44 Superfície de resposta solo puro	109
Figura 45 Superfície de resposta solo + 5% lodo	109
Figura 46 Superfície de resposta solo + 7,5% lodo	110
Figura 47 Superfície de resposta solo + 10% lodo	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Quantidade de citações por artigo selecionados	12
Tabela 2 Objetivos dos artigos selecionados	16
Tabela 3 Ensaio e normas	40
Tabela 4 Serie de peneiras	42
Tabela 5 Sistema unificado de classificação de solos	48
Tabela 6 Classificação de Solos HRB	50
Tabela 7 Sequência de tensões para fase de	70
Tabela 8 Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência	71
Tabela 9 Resultados dos Limites de Atterberg para o Solo J-10.....	75
Tabela 10 Resumo granulometria.....	77
Tabela 11 Resultado da Massa Específica dos Sólidos	80
Tabela 12 - Classificação de Solos HRB.....	85
Tabela 13 Resumo parâmetros	86
Tabela 14 Resumo Comparativo das Classificações	89
Tabela 15 Parâmetros de compactação.....	96
Tabela 16 Resumo dos resultados de Mini-CBR e Expansão	101
Tabela 17 Resumo dos resultados MR	103
Tabela 18 Parâmetros de regressão do modelo composto	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV – Análise de Ciclo de Vida
BSE – Elétrons Retroespalhados
CBR – California Bearing Ratio (Índice de Suporte Califórnia)
CH – Argila de Alta Plasticidade
CL – Argila de Baixa Plasticidade
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX – Difração de Raios X
EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia
ETA – Estação de Tratamento de Água
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
HRB – Highway Research Board
IG – Índice de Grupo
IP – Índice de Plasticidade
ISC – Índice de Suporte Califórnia
LA' – Solo Arenoso Laterítico
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de Plasticidade
MCT – Miniatura, Compactada, Tropical
MEAS – Massa Específica Aparente Seca
MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MR – Módulo de Resiliência
ONU – Organização das Nações Unidas
RCS – Resistência à Compressão Simples
SC – Areia Argilosa
SE – Elétrons Secundários
SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos
WoS – Web of Science

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1	Seleção de portfólio e estudo cienciométrico	5
2.2	Portfólio	6
2.3	Portfólio bibliográfico	11
2.4	Camadas do pavimento	20
2.5	Benefícios mecânicos para a camada do pavimento	22
2.6	Impacto ambiental do uso de lodo nas camadas de pavimentação	24
2.7	Limitações e pesquisas futuras	26
3	METODOLOGIA	28
3.1	Lodo de ETE	28
3.1.1	Geração e tratamento do lodo de ETE	29
3.1.2	Área de estudo e ETE escolhida	30
3.1.3	Coleta e preparo do lodo	31
3.2	Caracterização do solo	33
3.2.1	Coleta e preparo de solo	36
3.3	Dosagem lodo e solo	37
3.4	Ensaio laboratoriais	38
3.4.1	Granulometria	41
3.4.2	Limites de Atterberg	42
3.4.3	Limite de Liquidez (LL)	43
3.4.4	Limite de Plasticidade (LP)	44
3.4.5	Índice de Plasticidade (IP)	44
3.4.6	Massa Específica dos Sólidos	45
3.4.7	Classificação do Solo	46
3.4.8	Difração de Raios-X	53

3.4.9	MEV	55
3.4.10	Compactação	57
3.4.11	Mini - CBR e Expansão.....	61
3.4.12	Módulo Resiliência.....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1	Limites de Atterberg.....	73
4.2	Granulometria.....	77
4.3	Massa Específica dos Sólidos.....	79
4.4	Classificação do Solo	80
4.5	Difração de Raios-X (DRX)	90
4.5.1	Análise Mineralógica do Solo	90
4.5.2	Análise Mineralógica do Lodo	91
4.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	93
4.7	Compactação	95
4.8	MINI - CBR.....	101
4.9	Módulo Resiliência.....	103
5	CONCLUSÃO	113
	REFERÊNCIAS	115

1 INTRODUÇÃO

A água é considerada um dos principais desafios globais do século XXI pela Organização das Nações Unidas (ONU), pois mais de 2 bilhões de pessoas em todo o mundo não têm acesso à água potável e saneamento básico adequado (ONU, 2024). Ademais, a poluição da água é responsável por cerca de 1,8 milhão de mortes por ano (OMS, 2021).

Diante desse cenário, é essencial que sejam adotadas medidas para garantir a disponibilidade e qualidade da água para as gerações presentes e futuras. Políticas públicas, investimentos em infraestrutura, conscientização da população e mudanças de comportamento em relação ao uso da água são algumas das medidas que podem ser tomadas (Gleick, 2015). Como afirmou o ex-secretário-geral da ONU, Ban Ki-moon: "A água é um direito humano fundamental. Sem ela, não podemos liderar vidas saudáveis e produtivas. Hoje, 1 em cada 9 pessoas não tem acesso à água potável. A solução é simples: água limpa e saneamento para todos" (ONU, 2010).

Considerando que a gestão adequada da água é fundamental para a saúde e o bem-estar humano, além do desenvolvimento econômico e social (Gleick, 2015), O Brasil tem um longo caminho a percorrer em termos de universalização do saneamento, especialmente nas áreas de água e esgoto. Embora as políticas públicas estejam sendo fortalecidas, como o pacto pelo saneamento e a criação de leis ambientais, ainda há muitos desafios a serem superados.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023), a cobertura dos serviços de abastecimento de água tratada no Brasil atinge 84,92% da população, enquanto a coleta de esgoto alcança apenas 60,73%. Entre o esgoto coletado, 81,64 % passam por algum tipo de tratamento. São vários os fatores que contribuem para os desafios do saneamento no país, entre eles a intensificação da geração de esgoto nas cidades, o crescimento da população atendida por regiões de abastecimento de água, a pouca disponibilidade de terras para disposição de resíduos sólidos e o alto custo de um adequado tratamento de esgoto.

A consequência direta da expansão necessária do tratamento de esgoto é o aumento exponencial na geração de um subproduto complexo: o lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). A gestão deste lodo representa hoje um dos

maiores gargalos técnicos e financeiros para o setor, podendo corresponder a mais de 50% dos custos operacionais de uma ETE (Von Sperling, 2014).

Em decorrência desses desafios, a gestão de resíduos sólidos no Brasil é bastante complexa, tanto para o tratamento de efluentes quanto para o tratamento de água. Um dos principais desafios é que as estações de tratamento de água e esgoto sanitários geram grandes quantidades de lodo como subproduto de sua operação (ABNT, 2004a; 2004b). Embora o lodo seja classificado como não tóxico pela ABNT, o descarte inadequado pode causar impactos negativos no meio ambiente e na saúde humana (Potter et al., 2018). Portanto, é necessário desenvolver métodos adequados de gerenciamento de lodo para minimizar esses impactos (Gleick, 2015).

As Estações de Tratamento de Água (ETA) e as de Efluentes (ETE) geram grandes quantidades de lodo como subproduto da sua operação e este é o principal problema de pesquisa tratado nesta dissertação. De acordo com a ABNT NBR 10004/2004, o lodo de ETA e ETE é classificado como um resíduo sólido e é classificado pela ABNT NBR 10005/2004 e NBR 10006/2004 como não tóxico de "Classe II-A" (não inerte) (ABNT, 2004a; 2004b). No entanto, o descarte inadequado do lodo pode causar impactos negativos no meio ambiente e na saúde humana (Potter et al., 2018).

Neste ponto, o problema transcende a engenharia sanitária e se insere diretamente no campo das **Ciências Ambientais**. A disposição do lodo em aterros sanitários, prática mais comum no país, é uma solução cada vez mais insustentável, pois consome áreas nobres, gera um passivo ambiental de longo prazo e contribui para a emissão de gases de efeito estufa (Andreoli; Lara; Fernandes, 2007). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) é clara ao estabelecer uma hierarquia que prioriza a não geração, a redução e a reutilização, deixando a disposição final como última alternativa. Portanto, a busca por rotas de valorização para o lodo de ETE não é apenas uma otimização de processo, mas uma diretriz legal e uma necessidade ambiental.

É neste cenário que a presente dissertação se justifica, investigando o aproveitamento do lodo de ETE dentro dos princípios da **economia circular**, transformando um resíduo problemático em um insumo de valor para a engenharia de

pavimentos. A literatura técnica tem apontado para o potencial do lodo como material de construção. Estudos demonstram que, devido à sua composição rica em finos e matéria orgânica, o lodo pode atuar como um agente estabilizador, melhorando as propriedades de solos para aplicação em camadas de pavimentos (Kelm; Motta; Ubaldo, 2014; Lucena Et Al., 2014).

A utilização do lodo pode não apenas conferir melhorias em parâmetros como resistência e capacidade de suporte, mas também reduzir a necessidade de exploração de recursos naturais não renováveis, como agregados pétreos, e diminuir o consumo de aglomerantes de alto impacto ambiental, como o cimento Portland (Verma; Dhapekar, 2024).

Diante do exposto, o objetivo geral deste estudo é analisar a viabilidade técnica da utilização do lodo de ETE como estabilizador de um solo tropical para aplicação em camadas de base de pavimentos rodoviários. A pesquisa investiga o comportamento mecânico das misturas solo-lodo em diferentes proporções, buscando determinar um teor ótimo que maximize o desempenho geotécnico, oferecendo uma solução de engenharia que seja, simultaneamente, um avanço tecnológico para a infraestrutura rodoviária e uma resposta sustentável a um relevante desafio ambiental.

Os objetivos específicos são:

- a) **Avaliar os ensaios de caracterização utilizados para análise da amostra**, considerando parâmetros físicos e mecânicos, para determinar a adequação do lodo de ETE em misturas para camadas da pavimentação.
- b) **Analisar os diferentes teores de lodo utilizados nas misturas** de solo, a fim de identificar as proporções mais eficientes e seguras para aplicação em camadas de base de pavimentos rodoviários.;
- c) **Propor uma alternativa ambientalmente correta** para a destinação final do lodo de ETE, demonstrando o potencial de sua reutilização em pavimentação como uma solução sustentável para a gestão de resíduos.

Para atingir os propósitos estabelecidos nesta pesquisa em questão, o corpo do texto inicia com uma seção introdutória que aborda a contextualização e a problemática central do estudo, delineando os objetivos gerais e específicos, além de descrever a estrutura da pesquisa. No segundo capítulo, será abordada a fundamentação teórica referente a seleção do referencial que dá suporte ao

trabalho; os benefícios mecânicos para a camada do pavimento; o impacto ambiental do uso de lodo nas camadas de pavimentação e as limitações e pesquisas futuras. Na seção subsequente, serão detalhados os procedimentos metodológicos a serem empregados para coletar as informações necessárias à pesquisa, visando compreender e solucionar a problemática e alcançar os objetivos estabelecidos. O capítulo 4 apresentará resultados e o último capítulo trará a conclusão dessa dissertação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo cienciométrico apresentado deriva de uma pesquisa bibliográfica, fundamentada em referenciais teóricos previamente publicados, e tem como propósito avaliar o estado atual da produção científica multidisciplinar que aborda o uso de lodo de estações de tratamento com material constituinte de camadas do pavimento. Essa investigação científica se desenvolve como uma atividade essencial, que contribui para a atualização e enriquecimento do pesquisador. Ademais, estabelece uma conexão intrínseca entre pensamento e ação, visto que "nenhuma questão pode ser considerada um problema intelectual sem antes ter sido um problema da vida prática" (Minayo, 2001).

2.1 Seleção de portfólio e estudo cienciométrico

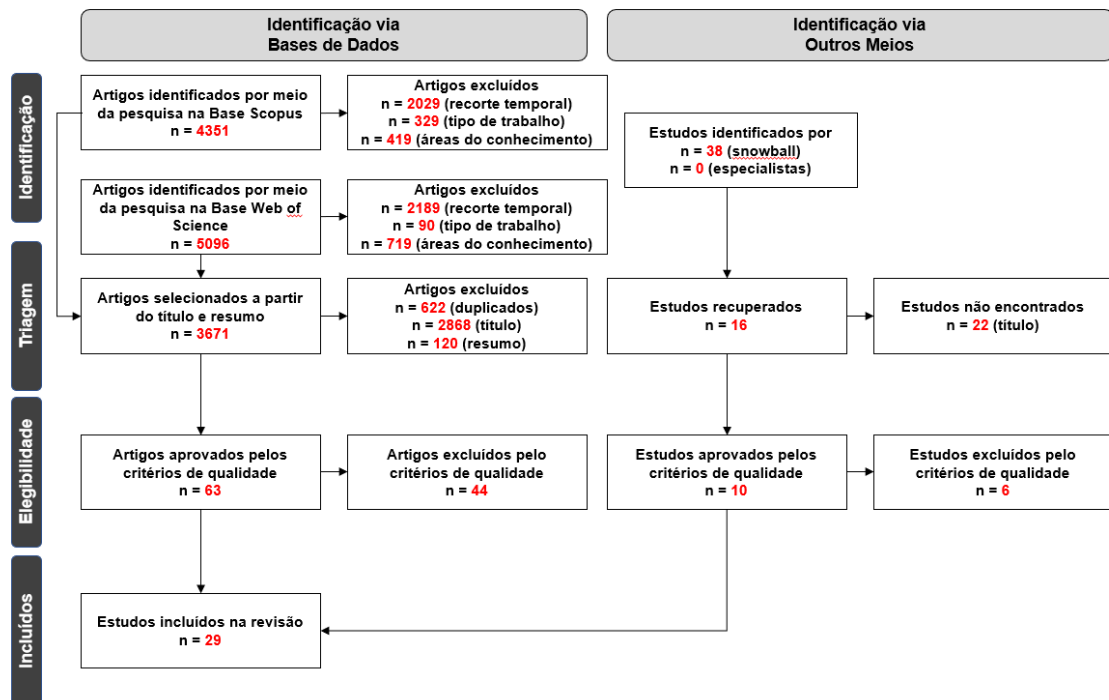
Foi realizada uma revisão sistemática da literatura com o auxílio do ambiente virtual Parsifal (2021), que segue uma estrutura composta por várias etapas: seleção de questões de pesquisa, seleção de fontes de artigos e bases de dados, definição de termos de busca, triagem com critérios práticos e metodológicos, revisão e síntese dos resultados.

As bases de dados utilizadas foram a *Scopus* e *Web of Science*, e a busca foi realizada no período de janeiro de 2013 a março de 2025, limitando-se a artigos acadêmicos publicados em inglês e português. Apenas artigos de periódicos foram considerados. A string de busca utilizada foi ("*asphalt*" OR "*grounds*" OR "*pave*" OR "*pavement*" OR "*paving*" OR "*soils*") AND ("*recycle*" OR "*reuse*" OR "*sludge*" OR "*stabilizer*") AND ("*cement*" OR "*lime*" OR "*no stabilizer*" OR "*stabilizing materials*" OR "*whitewash*") AND ("*durability*" OR "*environmental impact*" OR "*load capacity*" OR "*soil quality*" OR "*stability*")

A busca inicial resultou em 3671 artigos, que foram reduzidos a 19 após a aplicação dos critérios de elegibilidade e qualidade. A Figura 1 apresenta todas as etapas de avaliação dos artigos e as quantidades excluídas em cada uma. Além disso, o método snowball foi utilizado para revisar manualmente as referências dos artigos selecionados, com o objetivo de identificar outras publicações relevantes.

As referências nos artigos selecionados também foram revisadas manualmente para identificar outras publicações relevantes no processo conhecido como snowball acrescentando 10 trabalhos resultando em 29 artigos incluídos nesta análise cienciométrica.

Figura 1 Fluxograma de seleção de artigos do portfólio



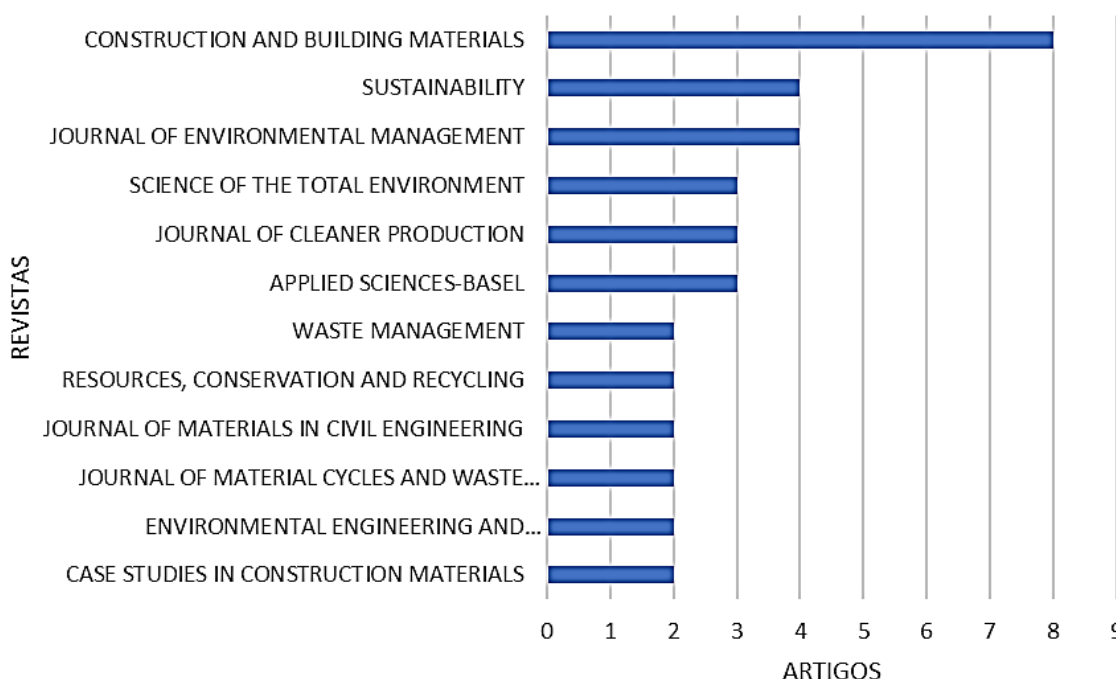
Fonte: Autor (2025)

2.2 Portfólio

Após realizar a seleção inicial com base no título, resumo e artigos duplicados, foram identificados 63 trabalhos que passaram para a próxima fase, que consiste na avaliação da qualidade. A fim de ilustrar as fontes desses artigos selecionados, foi criado um gráfico que exhibe as principais revistas responsáveis por sua publicação nesta análise., conforme a Figura 2 .

A maior quantidade de publicações foi na revista *Construction and Building Materials* com 8 publicações no período analisado, logo em seguida as revistas *Sustainability* e *Journal of Environmental Management*, cada um com 4 publicações.

Figura 2 Periódicos mais citados no Portfólio



Fonte: Autor (2025)

Ao examinarmos as revistas selecionadas e suas respectivas áreas de pesquisa, é evidente a presença de um equilíbrio entre aquelas direcionadas ao campo da engenharia civil e as voltadas para questões ambientais. Essa observação revela a existência de um panorama abrangente e diversificado de conhecimento científico abordado nas publicações, abrangendo tanto o desenvolvimento e avanço de tecnologias e práticas na engenharia civil quanto a análise e mitigação de impactos ambientais.

Essa distribuição entre revistas especializadas em engenharia civil e questões ambientais pode ser interpretada como um reflexo da interconexão entre esses dois campos. E demonstra a necessidade de uma abordagem holística na pesquisa e no desenvolvimento de projetos, que considera tanto os aspectos técnicos quanto as consequências ambientais desse assunto abordado.

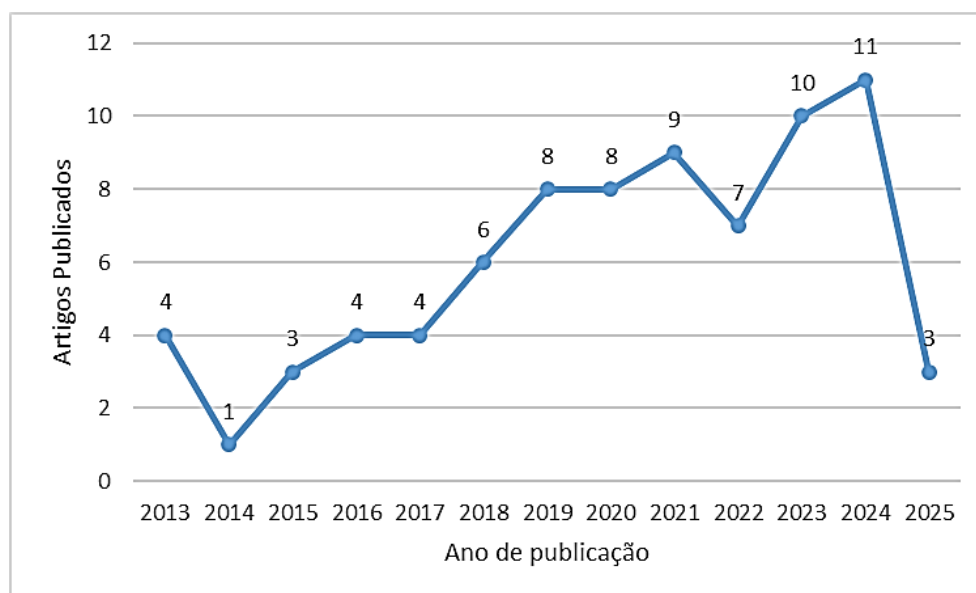
Um elemento adicional de grande relevância que investigamos foi a análise da evolução temporal das publicações. Ao examinar a cronologia das revistas selecionadas, pudemos identificar tendências e padrões que se desenvolveram ao longo do tempo, fornecendo insights valiosos sobre a progressão das pesquisas sobre o tema.

A análise da evolução temporal das publicações permite compreender como determinados temas, abordagens e áreas de pesquisa ganharam destaque ao longo

dos anos. Isso é fundamental para acompanhar o progresso científico, identificar áreas emergentes de interesse e investigar possíveis lacunas de conhecimento. Além disso, essa análise pode fornecer uma visão retrospectiva da evolução das práticas e políticas relacionadas, permitindo uma compreensão mais abrangente do contexto histórico e das influências que moldaram esse tema.

Com o objetivo de obter uma compreensão da progressão temporal das publicações selecionadas durante o processo de triagem, foi desenvolvido um gráfico que ilustra a acumulação dessas publicações ao longo dos últimos 12 anos, conforme representado na Figura 3.

Figura 3 Série histórica de publicações por ano



Fonte: Autor (2025)

A análise da distribuição temporal das publicações, conforme ilustrado no gráfico, revela uma trajetória de crescimento acentuado no interesse científico pelo tema ao longo da última década. É possível identificar distintas fases de desenvolvimento da pesquisa, que culminam no cenário atual de grande relevância acadêmica.

Num primeiro momento, entre 2013 e 2017, o volume de publicações pode ser caracterizado como uma fase de exploração inicial e consolidação. O período iniciou com 4 artigos em 2013, seguido por uma queda pontual para apenas 1 artigo em 2014, e posterior recuperação e estabilização em torno de 3 a 4 publicações anuais até 2017. Este comportamento sugere um interesse emergente, porém ainda não

consolidado, da comunidade acadêmica, típico de um campo de estudo que começa a estabelecer suas bases teóricas e metodológicas.

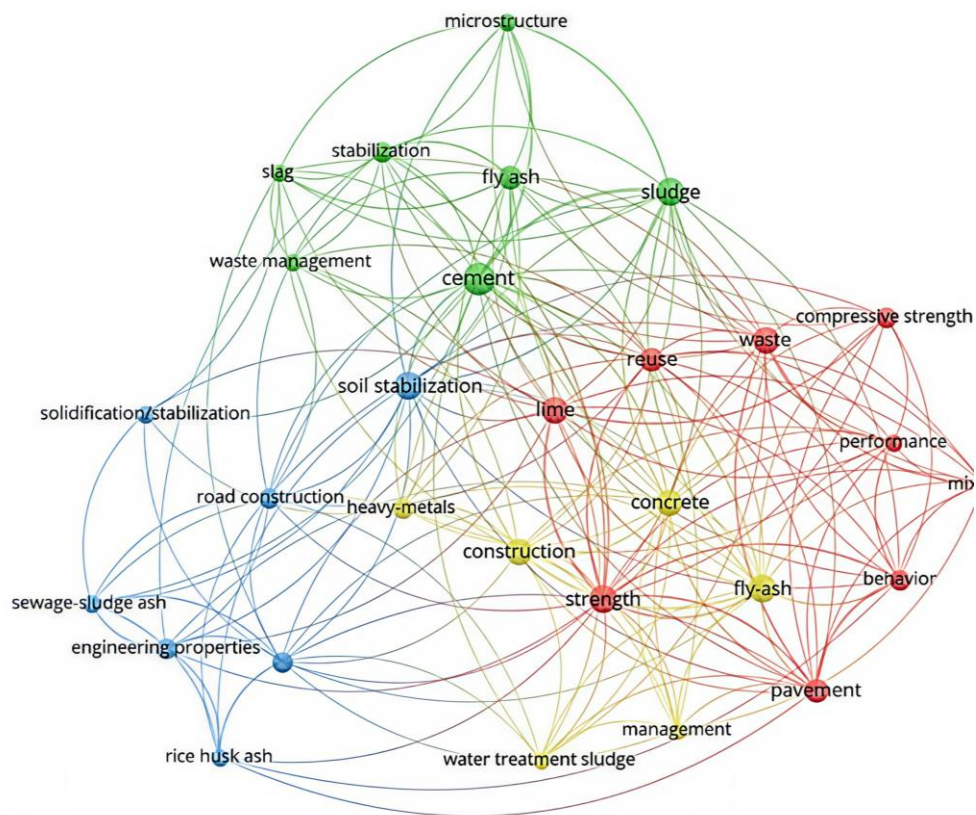
O ano de 2018 representa um claro ponto de inflexão, inaugurando um período de crescimento expressivo e sustentado na produção científica. A partir de 6 artigos naquele ano, o número de publicações escalou consistentemente, atingindo um patamar de 8 artigos em 2019 e 2020 e, após uma leve oscilação em 2022, culminou nos picos de 10 e 11 artigos em 2023 e 2024, respectivamente. Este aumento pode ser atribuído a uma confluência de fatores, como a intensificação das discussões globais sobre economia circular, a urgência por soluções sustentáveis para a gestão de resíduos e a consolidação de resultados positivos em pesquisas pioneiras, que estimularam novas e mais aprofundadas investigações.

A acentuada queda para 3 artigos em 2025 deve ser interpretada com cautela, pois, conforme mencionado, a análise para este ano considerou apenas as publicações até o mês de março. Este dado, longe de indicar uma retração, na verdade reforça a tendência de crescimento. Uma simples projeção linear sugere que, se essa taxa de publicação se mantiver, o ano de 2025 poderá fechar com aproximadamente 12 artigos, estabelecendo um novo recorde e demonstrando que o momentum da pesquisa continua a se acelerar.

Essa trajetória ascendente válida a contemporaneidade e a pertinência do tema desta tese. A pesquisa se insere em um campo de conhecimento dinâmico, que amadureceu ao longo da última década e que agora se encontra em plena expansão, demandando estudos cada vez mais específicos e aprofundados para preencher as lacunas que ainda persistem.

Para mapear as conexões entre os termos-chave da literatura levantada, foi empregada a ferramenta VOSviewer® para gerar a rede de coocorrência apresentada na imagem. A visualização gráfica (Figura 4) evidencia a formação de quatro agrupamentos principais, diferenciados por cores, que sinalizam as áreas de maior concentração de estudos no campo.

Figura 4 Mapeamento palavra chaves



Fonte: VOSviewer® (2025)

O grupo vermelho, posicionado à direita do mapa, reúne os descritores associados à avaliação de desempenho e à aplicação prática dos materiais. A proeminência de termos como “pavement” (pavimento), “compressive strength” (resistência à compressão), performance e “mixtures” (misturas) demonstra que uma parcela significativa da pesquisa se concentra na validação da viabilidade mecânica de misturas que incorporam “waste” (resíduo).

Na parte superior, o grupo verde aborda os materiais e o processo de estabilização em si. A palavra “sludge” (lodo) figura como um nó de grande importância, interligada a agentes estabilizadores consolidados, como “cement” (cimento) e “fly ash” (cinza volante), e ao processo de “stabilization” (estabilização). A inclusão do termo “microstructure” (microestrutura) indica que os estudos deste grupo também se aprofundam na compreensão das reações químicas e físicas que regem o comportamento do material.

À esquerda, o grupo azul delimita o campo de aplicação mais diretamente alinhado a esta tese. Ele estabelece uma conexão direta entre os conceitos de “soil

stabilization” (estabilização de solos) e “road construction” (construção de estradas) com o uso de “sewage sludge ash” (cinza de lodo de esgoto) e a investigação de suas “engineering properties” (propriedades de engenharia).

Por fim, o grupo amarelo atua como um conector temático, fazendo a ponte entre os demais agrupamentos por meio de termos como “lime” (cal), “construction” (construção) e “water treatment sludge” (lodo de tratamento de água). Adicionalmente, este grupo destaca uma preocupação transversal e fundamental: a presença de “heavy metals” (metais pesados).

A análise da centralidade dos nós na rede é particularmente reveladora. Termos como “cement” e “lime” emergem como os mais centrais, confirmando sua posição como os ligantes mais investigados para a estabilização de resíduos como o “sludge” e a “fly ash”. De modo análogo, “strength” (resistência) funciona como um conceito-ponte, evidenciando que a avaliação da capacidade mecânica é o principal critério de validação para essas novas misturas.

Contudo, o aspecto mais relevante para esta pesquisa reside no que a rede não evidencia com proeminência. Embora se observem termos periféricos ligados a propriedades e ensaios, o foco principal da literatura, demonstrado pela centralidade e pelo tamanho dos nós, recai sobre a resistência à compressão (“compressive strength”). Descritores associados a ensaios de desempenho mais avançados, que são cruciais para o dimensionamento mecânico de pavimentos, como “resilient modulus” (módulo de resiliência) e “permanent deformation” (deformação permanente), não figuram como nós de destaque.

Essa ausência sinaliza precisamente a lacuna na literatura que esta tese busca preencher. Fica claro que, enquanto a viabilidade do uso de lodo em termos de resistência estática é um campo bem explorado, o comportamento dinâmico e resiliente desses materiais sob cargas cíclicas, que reflete as condições reais de um pavimento em serviço, permanece como uma área com notável potencial para novas investigações.

2.3 Portfólio bibliográfico

Foi conduzida uma avaliação dos artigos previamente selecionados com o propósito de identificar aqueles capazes de fornecer informações pertinentes à pesquisa em questão. Cinco questões foram formuladas em relação à utilização de

lodo de estações de tratamento em camadas de pavimentação, a fim de avaliar a relevância de cada artigo, foram elas:

- O artigo apresentou as vantagens e desvantagens do uso de lodo?
- O artigo apresenta de forma clara os ensaios realizados para análise do solo?
- A metodologia está bem apresentada?
- Os resultados são claramente apresentados?
- O artigo tem referencial teórico robusto e atualizado?

Dentre os artigos avaliados, 29 obtiveram uma pontuação final superior ao valor de corte de 2 pontos e foram selecionados para fichamento e tabulação de informações. A Tabela 1 apresenta uma amostra dos artigos que ultrapassaram a pontuação de corte, juntamente com o número de citações nas bases de dados indexadas, além de uma descrição de como cada artigo contribui para a pesquisa e é capaz de fornecer conhecimentos relevantes.

Tabela 1 Quantidade de citações por artigo selecionados

Artigo	Citações		
	(Scopus)	(WoS)	(Google)
(Liu et al., 2020)	92	81	123
(Güllü; Fedakar, 2016)	69	55	83
(Alhasan; Muralikrishnan., 2020)	53	45	53
(Lynn et al., 2018)	40	52	58
(Güllü; Giriskan, 2013)	38	37	44
(Lucena et al., 2014)	32	23	28
(Shishehboran et al., 2021)	22	20	27
(Nguyen et al., 2023)	22	11	32
(Dulaimi et al., 2022)	21	15	23
(Al Nageim et al., 2023)	17	12	25
(Fiore et al., 2022)	14	9	21
(Hasan et al., 2022)	11	9	16
(Bosco et al., 2021)	0	3	32
(Coelho et al., 2015)	12	5	16
(Coban; Cetin, 2022)	8	7	10
(Cai; Liu, 2020)	10	8	2
(Medaoud et al., 2022)	4	6	9
(Takao et al., 2024)	6	2	8
(Kaur; Malik, 2018)	1	0	12
(Kelm et al., 2014)	4	2	6
(Campelo et al., 2020)	3	0	5
(Kahveci; Özen, 2024)	2	0	5
(Lucena et al., 2017)	0	0	5
(Alia et al., 2023)	0	0	5
(Almeida et al., 2023)	0	0	4
(Silva et al., 2020)	0	0	3
(Verma; Dhapekar, 2024)	0	0	3
(Mazzutti et al., 2024)	0	0	1
(Shaltout et al., 2025)	0	0	0

Fonte: autor (2025)

A discussão sobre as citações dos artigos selecionados revela a importância e o impacto dessas pesquisas no campo em questão. Alguns artigos receberam um número significativo de citações, o que indica seu amplo reconhecimento e influência na comunidade acadêmica, servindo como trabalhos relevantes para novas investigações.

O artigo de Liu et al. (2020) se destaca como o mais influente do portfólio, com um número alto de citações em todas as bases de dados: 92 no Scopus, 81 no Web of Science e 123 no Google Acadêmico. Esses números indicam a relevância e o impacto deste estudo, que investigou o uso de lodo de ETA em blocos de concreto, consolidando-o como uma referência obrigatória. Outros trabalhos também demonstram um impacto notável, como o de Güllü e Fedakar (2016), com 69 citações no Scopus, e o de Alhasan e Muralikrishnan (2020), com 53 citações na mesma base, ambos focados em diferentes aspectos da estabilização e reúso de resíduos.

Além disso, o artigo de Lynn et al. (2018), uma revisão sobre o uso de cinzas de lodo de esgoto, recebeu um número substancial de citações, com 40 no Scopus e 52 no Web of Science, indicando seu valor como um trabalho que consolida e direciona o conhecimento na área. O estudo pioneiro de Güllü e Giriskan (2013), com 38 citações no Scopus, também se firma como um pilar da pesquisa, sendo um dos primeiros a explorar o desempenho geotécnico de solos tratados com lodo industrial. Juntos, esses trabalhos formam o alicerce teórico sobre o qual grande parte da pesquisa subsequente foi construída.

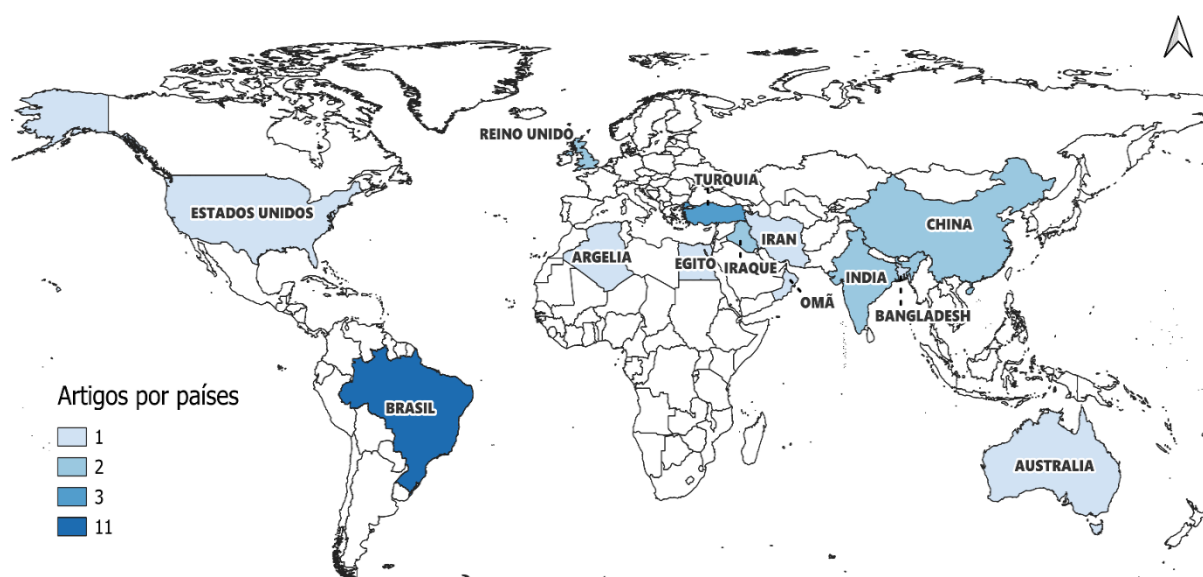
Por outro lado, um número considerável de artigos apresenta um número mais limitado de citações. Isso não diminui sua relevância, mas reflete, em grande parte, sua recente publicação. Artigos publicados em 2023 e 2024, como os de Nguyen et al. (2023), Takao et al. (2024), Verma e Dhapekar (2024) e Mazzutti e Klamt; Faro (2024), por exemplo, ainda estão no processo natural de disseminação e reconhecimento pela comunidade acadêmica. Essas pesquisas representam a vanguarda do conhecimento, explorando novas combinações de materiais e metodologias, e seu impacto tende a crescer nos próximos anos.

Em resumo, a análise das citações permite mapear o panorama intelectual do campo. Fica claro que um núcleo de estudos altamente influentes, como os de Liu

et al. (2020), Güllü e Fedakar (2016) e Lynn et al. (2018), estabeleceu as bases conceituais e metodológicas. Ao mesmo tempo, uma onda crescente de pesquisas mais recentes está ativamente expandindo essas fronteiras, garantindo a vitalidade e o avanço contínuo da área.

Um aspecto importante a ser analisado são os países onde as pesquisas foram desenvolvidas, pois a distribuição geográfica do conhecimento revela os principais polos de interesse científico e as motivações que impulsionam os estudos sobre o aproveitamento de lodo na engenharia. A Figura 5 ilustra a ocorrência de artigos por país, revelando a distribuição geográfica do interesse científico no aproveitamento de lodo em pavimentação. A análise dos dados demonstra uma notável concentração da produção acadêmica em um conjunto específico de nações, com o Brasil emergindo como o líder indiscutível, responsável por 11 das publicações analisadas.

Figura 5 Países dos artigos



Fonte: autor (2025)

Essa proeminência da pesquisa brasileira é de extrema relevância para o presente trabalho. O Brasil, com sua vasta extensão territorial e grandes centros urbanos, enfrenta um desafio monumental na gestão de resíduos de saneamento, o que impulsiona a busca por soluções inovadoras e de grande escala. Os estudos nacionais, como os de Kelm, Motta e Ubaldo (2014), Lucena et al. (2014), Coelho

et al. (2015), Fiore et al. (2022) e Mazzutti, Klamt e Faro (2024), formam um corpo de conhecimento robusto que dialoga diretamente com esta tese. Essa sinergia ocorre não apenas pela proximidade geográfica, mas principalmente pelas semelhanças nas características do lodo gerado nas estações de tratamento nacionais e, fundamentalmente, pela predominância de solos tropicais. Estes solos, com suas particularidades mineralógicas e comportamento geotécnico específico, demandam investigações locais, uma vez que os resultados obtidos com solos de climas temperados nem sempre são diretamente aplicáveis. Portanto, a literatura brasileira oferece um parâmetro de comparação direto e valioso para os resultados que serão aqui obtidos.

Além do Brasil, é notável que a grande maioria das pesquisas se origina em países com economias emergentes ou em desenvolvimento. Nações como Turquia (3 artigos), China, Índia, Iraque (com 2 artigos cada), além de Argélia, Bangladesh, Egito, Irã e Omã (com 1 artigo cada), compõem o restante do panorama. Essa tendência sugere que a busca por soluções de engenharia sustentáveis e de baixo custo é uma pauta prioritária para nações que enfrentam um duplo desafio: a necessidade de expandir rapidamente a infraestrutura de saneamento, o que aumenta a geração de lodo, e ao mesmo tempo ampliar suas malhas rodoviárias para sustentar o crescimento econômico. Em contextos em que o custo de estabilizantes tradicionais, como cimento e cal, e a escassez de aterros sanitários são fatores limitantes, o aproveitamento de um resíduo como material de construção torna-se uma solução de grande apelo econômico e estratégico, como demonstrado nos trabalhos de Medaoud et al. (2022) na Argélia e Shaltout et al. (2025) no Egito.

A presença de estudos em países desenvolvidos como Reino Unido (2 artigos), Austrália e Estados Unidos (1 artigo cada), embora em menor número, indica que o tema transcende as necessidades imediatas de desenvolvimento e se alinha a uma agenda global de sustentabilidade. Nesses países, a pesquisa é frequentemente motivada por regulamentações ambientais mais rigorosas, metas de "aterro zero" e a busca pela consolidação de uma economia circular, como pode ser visto nos estudos de Nguyen et al. (2023) na Austrália e Coban e Cetin (2021) nos EUA. Assim, a distribuição geográfica da pesquisa reflete um problema global abordado com motivações complementares, validando a relevância desta tese tanto no contexto nacional quanto no cenário científico internacional.

Na Tabela 2 são apresentados os objetivos dos artigos selecionados, seguidos por uma discussão detalhada sobre cada um deles. A discussão sobre os objetivos dos artigos selecionados revela uma variedade de estudos voltados para a utilização e o impacto ambiental do lodo de diferentes fontes na construção de pavimentos e materiais de engenharia. Alguns objetivos semelhantes podem ser identificados entre os estudos, proporcionando comparações valiosas.

Estudos têm como objetivo investigar o uso de lodo de tratamento de água potável e lodo de esgoto em blocos de concreto, avaliando seu desempenho mecânico, durabilidade e cura por carbonatação em idade inicial. Esta linha de pesquisa é bem representada pelo trabalho de Liu et al. (2020), um dos mais influentes da área com mais de 60 citações, que investigou especificamente o potencial do lodo de ETA como substituto de areia em blocos de concreto para pavimentação. De forma mais ampla, a revisão de Lynn et al. (2018), também um trabalho de grande impacto com mais de 30 citações, avaliou os resultados experimentais globais sobre o uso de cinzas de lodo de esgoto em diversas aplicações, incluindo blocos, argamassas e cerâmicas. Esses estudos visam fornecer alternativas sustentáveis e ambientalmente amigáveis para a produção de blocos de concreto, aproveitando o potencial desses resíduos para substituir materiais convencionais.

Tabela 2 Objetivos dos artigos selecionados

Artigo	Objetivo
(Güllü; Giriskan, 2013)	Investigar o desempenho geotécnico de um solo de grãos finos tratado com lodo de águas residuais industriais.
(Kelm et al., 2014)	Avaliar o uso de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), em suas formas in natura, seco e calcinado, para estabilizar materiais de pavimentação.
(Lucena et al., 2014)	Investigar a possibilidade de utilizar 10% de lodo de esgoto em peso em camadas de base de pavimentos, utilizando técnicas de estabilização com aditivos convencionais.
(Coelho et al., 2015)	Avaliar a viabilidade técnica da mistura de solo com lodo de ETA para uso em camadas de base, sub-base e subleito de pavimentos.
(Güllü; Fedakar, 2016)	Investigar as dosagens efetivamente utilizáveis de lodo de águas para a construção de sub-base do pavimento, usando abordagem experimental fatorial e estimativa de tamanho de efeito.
(Lucena et al., 2017)	Avaliar o impacto ambiental causado pelos resíduos de lodo de ETE e ETA nas camadas e subcamadas de pavimentos por meio da construção de um modelo em escala reduzida de misturas de solo+lodo+estabilizante, analisando parâmetros como umidade, pH, calcário e concentração de metais pesados.
(Lynn et al., 2018)	Avaliar os resultados experimentais disponíveis globalmente sobre a lixiviação de cinzas de lodo de esgoto (SSA) e seu uso na produção de clínquer de cimento, agregados leves, argamassa, concreto, blocos, pavimentos rodoviários, geotécnicos e cerâmicas.

Artigo	Objetivo
(Kaur; Malik, 2018)	Investigar o efeito do lodo de cal na densidade máxima seca, umidade ótima, CBR (índice de suporte Califórnia) saturado e não-saturado, quando misturado com cinza de casca de arroz (RHA) e fibra de polipropileno, visando aumentar a estabilidade dos solos.
(Cai; Liu, 2020)	Investigar as propriedades de materiais de base ou sub-base feitos de resíduos sólidos, como ganga de carvão e resíduos de construção, estabilizados por lodo de acetileno e cinzas volantes, visando sua potencial utilização nas camadas de pavimentos.
(Liu et al., 2020)	Investigar o potencial do uso de lodo de tratamento de água potável (ETA) como substituto de areia em blocos de pavimentação de concreto.
(Campelo et al., 2020)	Avaliar o uso de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) como filler em concreto asfáltico, em substituição ao cimento Portland.
(Alhasan; Muralikrishnan., 2020)	O estudo investiga o efeito da incorporação de polímeros e agregados reciclados nas propriedades físicas e mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente.
(Silva et al., 2020)	Apresentar, por meio de uma revisão de literatura, as aplicações alternativas do lodo de ETA em pavimentação rodoviária, com foco nos agregados de estabilização e no processo de lixiviação.
(Bosco et al., 2021)	Avaliar a viabilidade de utilizar lodo de tratamento de água misturado com solos, cal ou pó de rocha em aplicações geotécnicas.
(Shishchiboran et al., 2021)	Investigar a viabilidade de utilizar cinzas de lodo ácido incinerado como uma alternativa viável aos enchimentos minerais em misturas asfálticas a quente.
(Coban; Cetin, 2022)	O objetivo desta pesquisa foi avaliar a adequação do uso de lodo de cal sozinho ou em combinação com estabilizadores tradicionais (cinzas volantes e cimento Portland) para estabilizar solos subleito suscetíveis a geada.
(Medaoud et al., 2022)	Avaliar o efeito de ligantes combinados (Cimento/Cal e Cimento/Filler Calcário) na estabilização de lodo de esgoto bruto para reuso em pavimentação rodoviária.
(Hasan et al., 2022)	Avaliar o potencial de reciclagem do lodo de ETA como filler em misturas de concreto asfáltico, investigando as propriedades Marshall e a compatibilidade ambiental.
(Fiore et al., 2022)	Avaliar experimentalmente a incorporação de lodo de alumínio e férrico em diferentes solos brasileiros para uso em infraestrutura de pavimentos.
(Dulaimi et al., 2022)	Investigar o uso de cinzas de lodo de papel e pó de forno de cimento como filler em misturas de emulsão asfáltica a frio para melhorar sua baixa resistência inicial.
(Al Nageim et al., 2023)	Desenvolver uma mistura asfáltica a frio sustentável, incorporando cinzas de lodo de esgoto, para uso na construção.
(Almeida; Lautenschläger; Tonus, 2023)	Realizar uma revisão de literatura sobre as aplicações geotécnicas mais recorrentes do lodo de ETA no Brasil na última década (2013-2023).
(Alia et al., 2023)	Examinar, por meio de uma revisão de literatura, o uso de Lodo de Tratamento de Água (LTA) como um estabilizador de solo para melhorar suas propriedades geotécnicas.
(Nguyen et al., 2023)	Investigar a reutilização de lodo de tratamento de água à base de alumínio como um substituto sustentável do solo para construção de estradas.
(Takao et al., 2024)	Avaliar a viabilidade técnica do uso de lodo de ETA para substituir parcialmente solo areno-siltoso em misturas com estabilizantes (cal hidratada e cimento Portland).
(Mazzutti; Klamt; Faro, 2024)	Investigar o uso de lodo de ETA para estabilização de solos em diferentes proporções (0%, 15%, 30% e 50%) para aplicação em camadas de base e sub-base.
(Kahveci; Özen, 2024)	Investigar o uso de dois tipos de lodo de tratamento de água potável (à base de cloreto férrico e de sulfato de alumínio) como filler em Misturas Asfálticas a Quente (MAQ).
(Verma; Dhapekar, 2024)	Examinar, através de uma revisão abrangente, o uso de lodo tratado como agente estabilizador na construção de estradas, focando no desempenho geotécnico, impactos ambientais e tendências globais.
(Shaltout et al., 2025)	Investigar a reutilização de lodo de esgoto como filler em misturas de concreto asfáltico para promover o desenvolvimento sustentável.

Fonte: autor (2025)

Outro objetivo comum, e talvez o mais explorado, é avaliar a estabilização de solos utilizando lodo, como lodo de águas residuais industriais, lodo de acetileno e cinzas de lodo. Esses estudos buscam determinar as dosagens efetivas e a viabilidade do uso de lodo para melhorar as propriedades geotécnicas de solos macios e coesos, especialmente em relação à estabilidade e resistência. O trabalho seminal de Güllü e Girişken (2013), com mais de 40 citações, é uma referência fundamental ao investigar o desempenho geotécnico de solos finos tratados com lodo industrial, enquanto Güllü e Fedakar (2016) focaram na determinação de dosagens ótimas para sub-base. Outros estudos investigam a combinação do lodo com diversos aditivos, como lodo de cal com cinza de casca de arroz e fibras (Kaur; Malik, 2018), e lodo de cal com cinzas volantes e cimento para solos suscetíveis à geada (Coban; Çetin, 2022).

O trabalho de Cai e Liu (2020) também se insere nesta categoria, ao investigar a estabilização de outros resíduos sólidos (ganga de carvão e resíduos de construção) com lodo de acetileno e cinzas volantes para uso em camadas de base. Focando especificamente no lodo de ETE, trabalhos como o de Kelm, Motta e Ubaldo (2014) avaliaram o resíduo em diferentes estados (in natura, seco e calcinado), enquanto Lucena et al. (2014) investigaram a adição de 10% de lodo em misturas de solo com aditivos convencionais. Mais recentemente, Medaoud et al. (2022) avaliaram o efeito de ligantes combinados na estabilização do lodo de esgoto bruto para reuso em pavimentação.

Em investigações experimentais nacionais com lodo de estação de tratamento de água (ETA), a substituição parcial do solo por lodo (25–50%) em solos arenosos e areia argilosa atendeu critérios mecânicos para aterros, enquanto o lodo alumínico em solo arenoso apresentou aptidão para sub-base; a análise de variância apontou o tipo de solo como fator preponderante na resposta (Índice de Suporte Califórnia - CBR e expansão), com interação do tipo de lodo significativa apenas nesses parâmetros (Fiore et al., 2022). Este objetivo de avaliar a viabilidade técnica de misturas solo-lodo é compartilhado por diversos pesquisadores brasileiros, como Montalvan (2016), que investigou o comportamento de misturas de solo arenoso com lodo de ETA, e Coelho et al. (2015), que também validou o uso de misturas solo-lodo para camadas de pavimentos. Na mesma linha, Gil et al. (2019) analisaram a viabilidade do lodo de ETA em subcamadas, e Mazzutti, Klamt e Faro

(2024) testaram diferentes proporções de lodo na estabilização de solos. Todos esses trabalhos reforçam o enquadramento das propriedades típicas de misturas solo–lodo compatíveis com materiais usuais de obras de terra, desde que a dosagem e o condicionamento sejam tecnicamente adequados (Bosco et al., 2021).

Além disso, há estudos que investigam a viabilidade do uso de lodo misturado com outros materiais, como solos, cal, cinzas volantes e pó de rocha, em aplicações geotécnicas e na produção de misturas asfálticas a quente. Esses estudos buscam explorar o potencial de diferentes combinações de materiais para melhorar as propriedades dos pavimentos e solos, proporcionando uma abordagem mais sustentável e econômica. O trabalho de Shishehboran et al. (2021), por exemplo, focou na viabilidade de usar cinzas de lodo ácido incinerado como fíler em misturas asfálticas. Outros, como Jassim et al. (2020), focaram no desenvolvimento de estradas sustentáveis utilizando outros tipos de resíduos, como agregados reciclados e polímeros, compartilhando o mesmo objetivo de sustentabilidade. A reutilização do lodo de ETA como substituto de solo também foi investigada por Nguyen et al. (2023), enquanto Takao et al. (2024) avaliaram seu uso parcial em solos com adição de estabilizantes como cal e cimento.

No caso do material de enchimento (*filler*) com lodo de ETA em misturas asfálticas a quente, variações de 0–10% mantiveram as propriedades volumétricas dentro dos requisitos Marshall, com valor ótimo de *filler* próximo de 4,5%, aumento moderado do teor ótimo de ligante e maior suscetibilidade à umidade quando comparado a *fillers* convencionais; as concentrações de metais em lixiviados permaneceram marginais em relação a limites de referência (Hasan et al., 2022).

O objetivo de avaliar o lodo como *filler* é recorrente, como visto em Campelo, Silva e Andrade (2020), que o utilizaram em substituição ao cimento Portland, e em Dias (2023), que avaliou sua aplicabilidade comparando-o a uma mistura de referência. Ensaio de trilha de roda (*Hamburg Wheel Tracking - HWT*) e de resistência à tração corroboram a viabilidade do lodo como *filler* e sugerem maior resistência à deformação permanente para lodo alumínico, em comparação ao férrico, com ressalvas práticas de custo (Kahveci; Özen, 2024).

A aplicação em misturas a frio também é uma vertente importante, como demonstrado no influente trabalho de Al Nageim et al. (2023), que buscou desenvolver uma mistura sustentável com cinzas de lodo de esgoto, e no de Dulaimi et al. (2022), que exploraram a sinergia entre cinzas de lodo de papel e pó de forno de cimento. Shaltout et al. (2025) também se dedicaram a investigar a reutilização de lodo de esgoto como fíler, focando no desenvolvimento de misturas asfálticas ambientalmente amigáveis.

Em conjunto, esses estudos têm o objetivo comum de contribuir para o desenvolvimento de soluções ambientalmente amigáveis e sustentáveis na construção, aproveitando os resíduos de tratamento de água e esgoto para substituir materiais convencionais. A consolidação do conhecimento é o foco de diversos trabalhos de revisão, como o de Ferreira (2021), que buscou definir o estado da arte do uso de lodo de ETE e ETA em pavimentação, e o de Almeida, Lautenschläger e Tonus (2023), que mapeou as aplicações geotécnicas de lodo de ETA no Brasil. Outras revisões, como as de Siqueira (2019) e Silva, Barboza e Silva (2020), também se dedicaram a analisar a literatura sobre o tema.

Do ponto de vista ambiental, as revisões de Verma e Dhapekar (2024) e Ali, Mahmood e Mustafa (2023) consolidam as tendências globais e os impactos associados. Na prática, evidencia-se a necessidade de ensaios de lixiviação em conformidade com a NBR 10005/10006, como focado no trabalho de Ciarián et al. (2018), e de monitoramento sistemático (pH, umidade, recalque) em modelos reduzidos expostos a intempéries, com campanhas bimestrais. Embora muitos parâmetros se mantenham baixos, os próprios autores recomendam avaliações de longo prazo e verificação de migração em meios saturados e não saturados antes de adoções em larga escala (Lucena et al., 2017).

2.4 Camadas do pavimento

Nos 25 estudos levantados, o emprego de lodos de ETA/ETE distribui-se em três frentes: (i) camadas granulares estabilizadas (sub-base e base), por meio de misturas solo-lodo com ou sem adição estabilizadores convencionais; (ii) revestimento asfáltico (misturas a quente e a frio), com o lodo, ou sua cinza, atuando sobretudo como filler mineral; e (iii) subleito/aterro e obras de terra (uso mais

pontual).

Sub-base e base (misturas solo–lodo). A literatura brasileira e internacional converge para o uso do lodo, incorporado a solos finos, muitas vezes com cimento, visando elevar CBR/ISC, Resistência à Compressão e MR a níveis exigidos por normas rodoviárias. Ensaio e programas de monitoramento indicam a viabilidade mecânica e ambiental dessas camadas quando o traço é bem dosado e há estabilização complementar (em geral com ~8% de cimento), com controle de pH, umidade e lixiviação abaixo de limites normativos (Lucena *et al.*, 2014).

Revisões e relatórios técnico-científicos recentes consolidam que o emprego mais recorrente do lodo de ETA em geotecnia, no Brasil, está precisamente nessas camadas estruturais (base/sub-base), com ganhos de desempenho quando comparado ao solo puro e resultados compatíveis com requisitos do DNIT (ISC, expansão e Resistência a Compressão), desde que respeitados limites de dosagem e granulometria.

Há um conjunto expressivo de estudos com asfalto usinado a quente e misturas a frio em que o lodo, substitui parcial ou totalmente o fíller convencional. Resultados típicos apontam: melhoria de resistência à trilha de roda, aumento de Resistência a tração e maior energia de fratura, sem aumento da deformação permanente quando a dosagem é adequada. Em asfalto usinado a quente, lodos de tratamento de água com coagulantes férricos ou alumínicos mostraram desempenho utilizável como fíller, com sensibilidade à umidade e ao afundamento comparáveis ou superiores ao controle (Kahveci; Özen, 2024).

Em perspectiva mais ampla, estudos experimentais como fíller em asfalto usinado a quente, descrevem o papel do fíller na formação do mástique e demonstram viabilidade técnica e ambiental com base em ensaios Marshall e lixiviação (Hasan *et al.*, 2022). Para misturas a frio, investigações com cinzas relatam ganhos de resistência a tração, quando se associa o lodo a ativadores cimentícios, aproximando o desempenho ao de asfalto usinado a quente em curto prazo de cura (Al Nageim *et al.*, 2022)

Subleito e aterros/obras de terra. Alguns trabalhos de revisão e de aplicação geotécnica reportam o uso do lodo em subleito e em aterros, sobretudo como componente de misturas solo–lodo com função de melhoria

(melhoramento/estabilização) ou em barreiras e camadas de cobertura, mas com menor frequência frente às camadas estruturais e ao revestimento.

2.5 Benefícios mecânicos para a camada do pavimento

Sob a ótica do desempenho estrutural, os benefícios são lidos em termos de compactação, capacidade de suporte, resistência e rigidez, sempre condicionados a porcentagem da mistura solo–lodo. O uso de resíduos industriais em engenharia rodoviária pode ser uma solução viável para a reciclagem desses materiais (Cai; Liu, 2020).

Na prática, quando o resíduo atua como fração fina (fíller), Constata-se a redução do índice de vazios e mudança do teor ótimo de umidade, refletindo melhora do processo de compactação, o que repercute em maior densidade seca e em ganhos de desempenho. A adição de lodo aumenta a densidade seca do solo, o que indica uma melhoria na compactação do solo. Além disso, resultados de CBR mostraram que a adição de lodo em proporções específicas aumentou a resistência do solo, o que pode ajudar a melhorar a estabilidade da camada do pavimento (Kaur; Malik, 2018). Esse efeito é dependente da dosagem de lodo, razão pela qual os ganhos devem ser localizados em janelas ótimas de teor de lodo (Fiore et al., 2022).

O uso de lodo pode ajudar mecanicamente o solo, melhorando sua resistência e estabilidade (Coban; Cetin, 2022). Testes realizados mostraram que o uso de lodo sozinho ou em combinação com outros estabilizadores tradicionais pode melhorar significativamente a resistência do solo, medida pela força de compressão. Quando associado a cal/cimento, o lodo também participa de reações pozolânicas (C–S–H/C–A–H), consolidando a matriz e sustentando ganhos adicionais de Resistência à Compressão Simples (RCS) (Coban; Cetin, 2022). Em termos de projeto, esses incrementos de RCS/CBR tendem a refletir em maiores valores de módulo resiliência (MR) e, portanto, em melhor eficiência estrutural da camada (Boskov et al., 2021).

O solo de granulação fina tratado, exibe propriedades geotécnicas aprimoradas de compactação, resistência ao cisalhamento, CBR e RCS. O

benefício potencial do tratamento é encontrado para depender da taxa de dosagem de lodo (Güllü; Girisken, 2013). Para além do CBR/RCS, a literatura descreve melhor rearranjo do esqueleto granular e aumento de resistência ao cisalhamento (ϕ' e c'), sobretudo quando o lodo é adequadamente secado/condicionado antes da mistura (Bosco et al., 2021).

A capacidade de suporte final do solo não tratado (918 kPa) de testes CBR aumenta até 1.508 kPa devido à dosagem de lodo de 20%. Até a dosagem de 50%, o desempenho do solo pode melhorar de “regular” para “bom”, e pode ser potencialmente usado para Camadas de Base nas estabilizações, podendo ser usado até em camadas de sub-base (Güllü; Girisken, 2013). Em cenários brasileiros, variações de 25–50% de lodo de ETA em solos arenosos/areia argilosa alcançaram critérios para aterros e indicaram aptidão a sub-base (com lodo alumínico), reforçando que o *tipo de solo* governa a resposta mecânica (Fiore et al., 2022).

A Resistência à tração indireta e fratura do asfalto usinado a quente aumenta com o uso de lodo como agregado. Também o módulo de resiliência cresceu com a adição do lodo. O crescimento pode ser de até 14% no módulo de resiliência (Shishehboran et al., 2021). Esses ganhos são coerentes com a melhora da adesão ligante–fíller e com a manutenção de parâmetros volumétricos dentro dos limites Marshall quando o teor de fíller de lodo permanece na faixa ótima (≈ 4 –5%), ainda que com aumento moderado do teor ótimo de ligante e maior suscetibilidade à umidade (Hasan et al., 2022).

A incorporação de lodo no asfalto usinado a quente leva a um aumento da energia de fratura devido à melhor adesão entre o asfalto e o lodo do que outros fillers. O maior aumento na energia de fratura foi observado em amostras contendo 50% de lodo. Ensaios de deformação permanente demonstraram que o uso de lodo como filler melhora a resistência do asfalto; 50% de lodo substituindo o filler leva ao aumento do número de fluxo em cerca de duas vezes (Shishehboran et al., 2021).

Resultados com lodos de ETA de diferentes naturezas químicas sugerem ainda melhor resistência à deformação permanente quando se utiliza lodo alumínico (em relação ao férrico), com a ressalva operacional e necessidade de secagem/combustão do resíduo (Kahveci; Özen, 2024). Em misturas a frio, a cinza

de lodo como aditivo elevou o módulo ITSM e acelerou o ganho de rigidez, sinalizando alternativa de baixo consumo energético (Al Nageim et al., 2023).

O lodo ETA e ETE pode ser usado como um material geotécnico viável, mas é importante caracterizar o lodo e avaliar seus impactos ambientais com base em suas características e aplicações pretendidas (Boskov et al., 2021). Portanto, é possível que o uso de Lodo em misturas com solos possa ajudar mecanicamente a camada do pavimento, mas isso dependerá das características específicas do Lodo e da aplicação pretendida (Boskov et al., 2021).

Recomenda-se, portanto, que o protocolo de dimensionamento inclua, além de curvas de compactação e CBR/RCS, medições de MR e Resistência a Tração, e ensaios de deformação permanente; paralelamente, executar lixiviação conforme NBR 10005/10006 e monitorar pH/umidade/recalque em modelos reduzidos, assegurando que o ganho mecânico venha acompanhado de conformidade ambiental.

2.6 Impacto ambiental do uso de lodo nas camadas de pavimentação

O reuso pretendido do lodo não requer queima, incineração ou qualquer outra atividade que gere liberações tóxicas para o meio ambiente, o que se coaduna com a lógica de economia circular ao reduzir envio a aterros e a extração de agregados naturais (Boskov et al., 2021). No entanto, o transporte por caminhões pode ser impraticável e representar preocupações ambientais devido ao potencial de contaminação e emissões de gases de efeito estufa, sobretudo quando o lodo apresenta baixo teor de sólidos ou quando as distâncias de transporte são elevadas; nessas situações, os próprios autores recomendam adensamento/condicionamento prévio e planejamento logístico dedicado (Boskov et al., 2021).

Além da rota, a logística do resíduo pesa no inventário ambiental. A secagem do lodo na origem (ETA/ETE) reduzem massa transportada, risco de gotejamento e emissões logísticas, melhorando a pegada de carbono e o controle operacional. Em solos e camadas granulares, quando o lodo é utilizado como componente fino, a otimização do teor de umidade não apenas melhora o desempenho mecânico, mas também reduz passivos de transporte (Fiore et al., 2022; Boskov et al., 2021). Já em massa asfáltica, o controle da granulometria/finos e da umidade residual do fíler

de lodo é essencial para evitar espessamento excessivo do betume ou vaporização indesejada na usinagem (Dias, 2023; Campelo et al., 2020).

A sustentabilidade econômica da reutilização de resíduos depende de políticas públicas e incentivos fiscais para o uso de subprodutos, o que pode tornar a reutilização do lodo atraente e aumentar sua aceitação por agências ambientais, projetistas, construtores e a população em geral como um subproduto (Bosco et al., 2021). Do ponto de vista de licenciamento, esses mesmos autores assinalam que a viabilidade prática deve ser vinculada a caracterização do resíduo (química, microbiologia) e à demonstração de conformidade por ensaios de solubilização/lixiviação conforme a NBR 10005/10006, reduzindo incertezas regulatórias (Bosco et al., 2021).

O Asfalto Usinado a Quente pode estabilizar e neutralizar as propriedades perigosas do lodo de ETA e ETE. Na matriz betuminosa, o lodo utilizado como filler/agregado fino permanece fisicamente imobilizado e, quando precedido de tratamento e verificação ambiental, não há indicação de aumento de risco à saúde humana ou ao meio ambiente nas condições avaliadas (Shishehboran et al., 2021). O Asfalto modificado pelo lodo não causa danos à saúde humana ou ao meio ambiente e, portanto, pode ser usado para modificar as propriedades do asfalto (Shishehboran et al., 2021).

Em paralelo, aplicações em camadas estabilizadas com solo-lodo monitoradas em modelo reduzido/trechos de teste no país têm reportado pH, umidade, recalque e metais dentro de faixas de referência ao longo das campanhas, reforçando a necessidade de acompanhamento inicial e de projeto de drenagem que limite percolação (Lucena et al., 2017). Por cautela, a literatura enfatiza ainda duas frentes pouco exploradas e que devem constar do protocolo de projeto: (i) avaliação de médio prazo sob ciclos “úmido-seca”/“gelo-degelo” e (ii) triagem de micropoluentes orgânicos quando o histórico de tratamento do lodo assim o exigir (Bosco et al., 2021).

Não obstante os avanços relatados em desempenho mecânico, poucos dos artigos da revisão abordaram o impacto ambiental de forma sistemática e de longo prazo. Em geral, as avaliações restringem-se a ensaios de solubilização e lixiviação, e a declarações de imobilização na matriz asfáltica, sem séries temporais sob ciclos,

sem colunas de percolação prolongadas ou análise de micropoluentes orgânicos e indicadores microbiológicos. Exceções são estudos com monitoramento em campo/modelos reduzidos (Lucena et al., 2017) e sínteses técnico-regulatórias que enfatizam a necessidade de caracterização prévia do resíduo e conformidade às NBR 10005/10006 (Boskov et al., 2021). Mesmo em misturas asfálticas, em que há indícios de baixa lixiviabilidade nas condições testadas, os trabalhos tendem a privilegiar métricas mecânicas (RT, estabilidade/volumetria) e carecem de acompanhamento ambiental prolongado, o que recomenda a inclusão de protocolos de verificação e monitoramento nas aplicações reais (Shishehboran et al., 2021).

2.7 Limitações e pesquisas futuras

Apesar dos avanços no estudo do uso de lodo de estações de tratamento em camadas de pavimento, é importante reconhecer algumas limitações que ainda existem nessa área de pesquisa. Essas limitações afetam a compreensão completa dos impactos ambientais e a otimização do uso de lodo em pavimentos.

A maioria dos estudos não se aprofundou na caracterização detalhada do lodo. A composição química, a presença de contaminantes e a potencial toxicidade do lodo não foram amplamente investigadas. Essas informações são essenciais para entender os possíveis impactos ambientais e para garantir a segurança na utilização do lodo em camadas de pavimento. Portanto, é fundamental que estudos futuros incluam uma caracterização completa do lodo, considerando parâmetros como teor de metais pesados, conteúdo orgânico, pH e presença de compostos tóxicos.

Muitos estudos se concentraram apenas na análise das propriedades geotécnicas e mecânicas dos pavimentos modificados com lodo, deixando de considerar os potenciais danos ambientais associados ao uso desses materiais. É necessário investigar mais a fundo os efeitos da lixiviação de contaminantes do lodo para o solo e águas subterrâneas, bem como o risco de contaminação do ar durante a aplicação e manutenção dos pavimentos. Essa avaliação abrangente dos impactos ambientais ajudará a tomar decisões mais informadas sobre a viabilidade e segurança do uso de lodo em camadas de pavimento.

A maioria dos estudos disponíveis tem uma duração limitada, geralmente

realizada em curtos períodos de tempo. É essencial conduzir pesquisas de longo prazo para avaliar o desempenho e a durabilidade dos pavimentos modificados com lodo ao longo do tempo. Isso permitirá entender melhor a degradação dos pavimentos, a estabilidade das propriedades do lodo e a eficácia das medidas de controle ambiental adotadas.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentada o lodo utilizado, e a origem e coleta das amostras escolhidas para o estudo. Em seguida, serão descritas as características do solo selecionado para a pesquisa, justificando sua escolha com base em critérios específicos. Após isso, será discutida a dosagem de lodo aplicada ao solo, explicando os parâmetros adotados para definir as proporções mais adequadas. Por fim, serão expostos os ensaios laboratoriais que serão realizados para avaliar o comportamento das misturas de solo e lodo, com o objetivo de verificar a viabilidade de uso desse material em aplicações práticas.

Do ponto de vista metodológico, a caracterização adotada neste capítulo visa compreender, com base em parâmetros físico-químicos e de origem, as condicionantes do comportamento geotécnico das misturas solo-lodo, estabelecendo vínculos claros com sua aplicação potencial em camadas de pavimento. Esse enquadramento permitirá relacionar propriedades medidas em laboratório a requisitos de desempenho e conformidade ambiental em escala de obra.

3.1 Lodo de ETE

O Brasil enfrenta desafios no que se refere à universalização do saneamento básico, particularmente nos serviços de abastecimento de água e tratamento de esgoto. Embora políticas públicas recentes tenham buscado fortalecer esse setor, como o Pacto pelo Saneamento e a implementação de legislações ambientais pertinentes, o progresso ainda é insuficiente para atender às necessidades da população de maneira plena.

De acordo com os dados mais recentes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023), a cobertura dos serviços de abastecimento de água tratada no Brasil atinge 84,92% da população, enquanto a coleta de esgoto alcança apenas 60,73%. Entre o esgoto coletado, 81,64 % passam por algum tipo de tratamento. Esses números revelam um cenário preocupante, especialmente em um contexto em que o crescimento populacional e a urbanização acelerada ampliam a demanda por serviços de saneamento eficientes.

A gestão de resíduos sólidos, particularmente aqueles gerados nos processos de tratamento de água e esgoto, se torna cada vez mais complexa. Fatores como o aumento no volume de esgoto nas áreas urbanas, a expansão das regiões atendidas

pelos sistemas de abastecimento de água, as limitações de áreas disponíveis para disposição final de resíduos e os altos custos operacionais associados, agravam ainda mais os desafios enfrentados pelas cidades brasileiras.

No processo de tratamento de esgoto, especialmente nas ETE, ocorre a produção de um resíduo semissólido conhecido como lodo. De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, esse resíduo deve ser destinado de forma ambientalmente adequada, priorizando alternativas como reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético. Somente os rejeitos, para os quais todas as possibilidades de tratamento e recuperação foram esgotadas, devem ser encaminhados para aterros sanitários.

Conforme a ABNT NBR 10004/2004, o lodo proveniente de ETA e ETE é classificado como resíduo sólido, sendo considerado pela ABNT NBR 10005/2004 e NBR 10006/2004 como "Classe II-A", ou seja, um resíduo não inerte e não tóxico. Esse estudo parte das oportunidades promissoras na utilização do lodo de ETE em pavimentação, alinhando-se às diretrizes legais de destinação ambientalmente adequada.

3.1.1 Geração e tratamento do lodo de ETE

Os processos de tratamento de esgoto, assim como o tratamento de água, geram resíduos que precisam ser adequadamente gerenciados. O tratamento de esgoto se distingue do tratamento de água pela predominância de processos biológicos, que visam à degradação e estabilização da matéria orgânica presente nos efluentes. Conforme descrito por Von Sperling (2005), os sistemas de tratamento de esgoto podem ser classificados em aeróbicos, como lodos ativados, reatores aeróbicos com biofilmes e lagoas de estabilização aeróbicas, e anaeróbicos, como filtros anaeróbios, reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) e lagoas de estabilização anaeróbicas.

O termo "lodo" é comumente utilizado para descrever os subprodutos sólidos resultantes do tratamento de esgotos. O lodo gerado nas ETE é o principal resíduo produzido ao longo desse processo, e suas características variam significativamente em comparação à sua composição inicial. Essas características também são influenciadas pelo método de tratamento adotado, seja ele aeróbico, anaeróbico ou uma combinação de ambos.

A matéria orgânica presente no lodo de esgoto é um componente de grande relevância, pois pode apresentar altas concentrações de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), além de fósforo, nitrogênio e metais pesados como zinco (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), chumbo (Pb), mercúrio (Hg) e cromo (Cr) (Tao et al., 2012). Além disso, lodos provenientes de esgotos industriais podem conter diversos poluentes tóxicos específicos, dependendo do tipo de indústria e dos processos utilizados. Um exemplo relevante é o lodo gerado por indústrias farmacêuticas, que frequentemente apresenta altas concentrações de disruptores endócrinos e antibióticos (Galan et al., 2012).

Em termos de quantidade e complexidade, o lodo de esgoto se destaca como o principal resíduo gerado em uma ETE. Esse resíduo é composto principalmente por cerca de 2% de matéria orgânica, incluindo células microbianas, óleos e graxas, e aproximadamente 98% de água (Silva, 2019). Em geral, essa biomassa contém em torno de 30% de proteínas, 40% de carboidratos, e os 30% restantes são lipídios particulados (Sahinkaya et al., 2015).

3.1.2 Área de estudo e ETE escolhida

O município de Campo Grande, situado na porção central do estado de Mato Grosso do Sul, foi selecionado como área de estudo desta pesquisa. Com área territorial de 8.092,95 km², correspondente a 2,26% do território estadual, o município ocupa posição estratégica no contexto regional e no desenvolvimento socioeconômico do estado (IBGE, 2023). De acordo com o Censo 2022, a população de Campo Grande é de 898.100 habitantes, indicando tendência de crescimento e pressionando a infraestrutura de saneamento, em especial o abastecimento de água e o tratamento de esgoto (IBGE, 2023).

No sistema de abastecimento, o município conta com duas ETAs: Lajeado (em operação desde 1969) e Guariroba (desde 1985). Ambas adotam tecnologia convencional de ciclo completo, com uso de coagulantes, cloro, flúor e cal hidratada. Segundo a concessionária Águas Guariroba, a ETA Lajeado gera cerca de 400 t/ano de lodo e a ETA Guariroba, aproximadamente 700 t/ano, subproduto que demanda destinação adequada e aderente às normas ambientais (Águas Guariroba, 2024).

Quanto ao esgotamento sanitário, Campo Grande dispõe de duas ETEs: Los Angeles (tratamento anaeróbio) e Imbirussu (tratamento aeróbio). Em conjunto, essas

instalações geraram, em 2024, cerca de 1.600 t/ano de lodo (Águas Guariroba, 2024). Este resíduo representa simultaneamente um desafio ambiental e uma oportunidade de valorização por meio de rotas de reuso em obras geotécnicas e de pavimentação.

Perspectiva financeira da disposição atual. Em 2024, o custo direto de disposição em aterro do lodo de ETE Los Angeles totalizou R\$ 265.600,00 ($166 \text{ R\$/t} \times 1.600 \text{ t}$, $\approx \text{R\$ } 265 \text{ mil}$). Adicionalmente, o aluguel de caçambas somou R\$ 211.200,00 ($\text{R\$ } 330,00 \text{ por caçamba} \times 640 \text{ unidades}$). O custo total (disposição + caçambas) atingiu R\$ 476.800,00, equivalente a R\$ 298,00/t de lodo disposto no ano (Águas Guariroba, 2024). Esses valores reforçam a relevância técnica e econômica de investigar rotas de reaproveitamento que reduzam volumes destinados a aterro e mitiguem despesas logísticas associadas.

3.1.3 Coleta e preparo do lodo

A ETE Los Angeles constituiu a fonte do lodo analisado neste estudo, em razão de sua elevada representatividade operacional e da pertinência de avaliação técnico-ambiental em contexto urbano de porte médio. A instalação responde por cerca de 60% do esgoto coletado e tratado pela concessionária do município (Águas Guariroba, 2024). A unidade dispõe de sistema de desaguamento mecânico Figura 6, no qual o lodo proveniente do tratamento é misturado com polímero catiônico para promover a floculação e, em seguida, ocorre uma pré secagem, convertendo o efluente líquido em uma pasta semissólida.

Figura 6 Secador Mecânico ETE



Fonte: autor (2024)

Após o processo, o lodo, já em estado semissólido, é disposto em caçambas metálicas Figura 7, destinadas ao transporte até os aterros sanitários. As amostras foram coletadas diretamente nas caçambas imediatamente após a descarga, adotando-se coleta composta, múltiplas subamostras distribuídas em diferentes profundidades e pontos do volume, para garantir representatividade. O material foi acondicionado em frascos com tampa rosqueável, previamente higienizados e secos; cada frasco foi preenchido até ~90% do volume útil, vedado e identificado. Para controle de contaminação, utilizaram-se luvas descartáveis, óculos e máscaras de proteção.

Figura 7 Caçamba com lodo



Fonte: autor (2024)

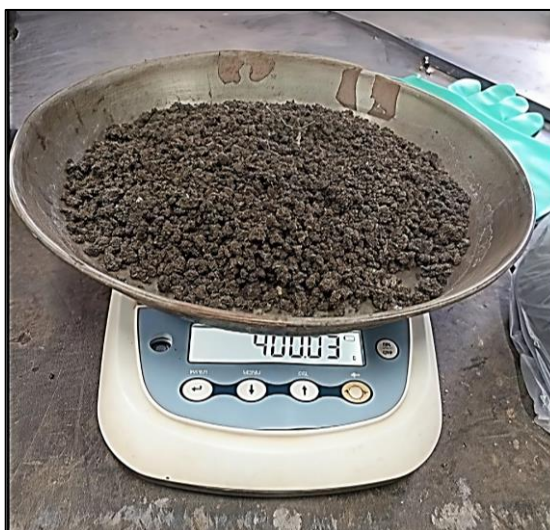
Posteriormente, já no preparo da amostra, o lodo destinado aos ensaios foi submetido a secagem térmica em estufa a 100° C, até massa constante, adotando-se temperatura reduzida para evitar degradação térmica e oxidação do material com teor orgânico Figura 8. Concluída a secagem, as amostras foram resfriadas até atingir temperatura ambiente e, na sequência, destorroadas em almofariz com pistilo, evitando esmagamento excessivo dos grãos Figura 9.

Figura 8 Processo de secagem térmica do lodo



Fonte: autor (2024)

Figura 9 Lodo após destorroamento



Fonte: autor (2024)

Procedeu-se à homogeneização, obtendo-se partes representativas. Conforme o ensaio, realizou-se peneiramento preparatório, preservando-se a fração especificada pelas normas. As porções preparadas foram então acondicionadas em recipientes.

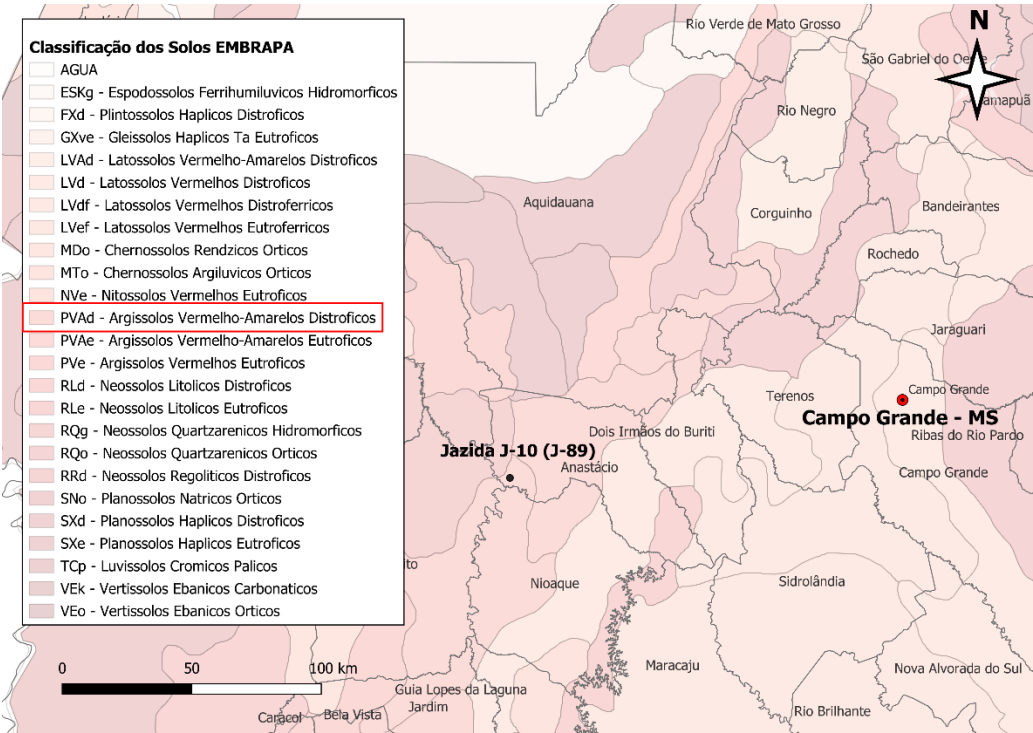
3.2 Caracterização do solo

O solo escolhido para este estudo foi proveniente da Jazida J-10, localizada no município de Anastácio, no estado de Mato Grosso do Sul, distante cerca de 145 km da capital Campo Grande. A seleção deste solo foi baseada em sua utilização atual na camada de base de uma rodovia de grande importância para o estado, o que evidencia sua relevância prática e adequação para aplicações em infraestrutura

rodoviária. Essa escolha permite que os resultados obtidos no estudo tenham uma aplicabilidade direta em projetos de pavimentação, especialmente em regiões com características geotécnicas semelhantes. Essa decisão também favorece a transferibilidade dos resultados, pois coloca a investigação em alinhamento direto com os critérios clássicos de desempenho de camadas estruturais de pavimentos (capacidade de suporte, resistência e rigidez) (Bernucci et al., 2008).

A Jazida J-10, situada em uma região com características edafológicas específicas, apresenta um solo classificado, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), como Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos, identificado pelo símbolo PVAd22 como mostrado na Figura 10. Ressalte-se, contudo, que a classificação pedológica auxilia a compreensão do ambiente de formação e da mineralogia dominante, mas será complementada por classificação geotécnica (USCS - Unified Soil Classification System) e, dada a natureza tropical do material, pela MCT, de modo a relacionar estrutura, plasticidade e comportamento de compactação.

Figura 10 Mapa de localização da Jazida J-10 contendo sua classificação conforme a EMBRAPA



Fonte: Autor (2024)

Este tipo de solo é caracterizado por um Horizonte B bem definido e homogêneo, indicando uma estrutura clara e consistente, como é possível ver na Figura 11. A análise tátil-visual do solo revela um material de granulometria fina e coloração vermelha, típicas de solos argilosos com evolução moderada do processo de ferralitização. No entanto, tal análise tem caráter preliminar; a confirmação das propriedades relevantes ao projeto será conduzida por ensaios normativos (granulometria, limites de Atterberg, massa específica dos grãos, compactação), permitindo enquadramento objetivo e comparação com requisitos de base.

Figura 11 Aspecto, em talude, do perfil de solo da jazida J-10.



Fonte: Autor (2024)

Os argissolos são conhecidos por sua conexão com a paragênese caulinitico-oxídica ou vermiculita com hidróxi-alumínio, conforme descrito pela Embrapa no SiBCS de 2018. Esses solos estão em um estágio intermediário de laterização, um processo de intemperismo que leva à formação de solos ricos em minerais oxídicos, particularmente óxidos de ferro e alumínio. A presença dessas características minerais indica que o solo da Jazida J-10 possui boa resistência e estabilidade, propriedades desejáveis para materiais utilizados na construção de camadas de base de pavimentos flexíveis.

Além disso, a escolha desse solo foi influenciada pela sua disponibilidade e pela qualidade homogênea do material extraído, o que garante consistência nos resultados experimentais e confiabilidade na aplicação prática dos achados. Para assegurar representatividade, o plano de amostragem indicará pontos e profundidades de coleta, umidade natural na extração, tipo de amostra (deformada/indeformada) e

procedimentos de preparo e cura, assegurando rastreabilidade metrológica e reprodutibilidade dos ensaios. O solo argissolo vermelho-amarelo distrófico da Jazida J-10, com suas características pedológicas e mineralógicas, é indicativo de um material adequado para a composição de camadas de pavimentos, especialmente em projetos que demandam durabilidade e resistência em condições tropicais, onde a laterização desempenha um papel crucial na estabilidade do solo. Essa análise inicial estabelece uma base sólida para os ensaios subsequentes, onde o comportamento desse solo, combinado com o lodo gerado nas ETEs, será testado e avaliado. Assim, a escolha do solo não só se justifica pela sua aplicação prática, mas também pelo seu potencial de proporcionar dados valiosos sobre a viabilidade de novos materiais sustentáveis em obras de pavimentação.

3.2.1 Coleta e preparo de solo

As coletas foram realizadas em duas viagens de campo, com o objetivo de assegurar representatividade do material. Em cada viagem, amostras foram obtidas em diferentes pontos do setor a montante da área de empréstimo (J-10), distribuídas ao longo da superfície exposta e, quando aplicável, em profundidades distintas, para capturar possíveis gradientes de granulometria, umidade natural e estrutura associados ao escoamento superficial e à dinâmica de exploração da jazida.

Em cada ponto foram coletadas amostras deformadas destinadas à caracterização geotécnica e aos ensaios dessa pesquisa, seguindo boas práticas de amostragem geotécnica. As amostras foram acondicionadas em sacos impermeáveis, vedados e transportadas ao laboratório em condições que evitassem perdas de umidade e contaminação cruzada.

Após a chegada ao laboratório, as amostras foram submetidas à secagem controlada e, em seguida, destorroadas cuidadosamente para preservar a integridade dos grãos (Figura 12). Procedeu-se à homogeneização e ao quarteamento até a obtenção de amostra representativas, em conformidade com a ABNT NBR 6457:2016 (Figura 13). Para cada ensaio, aplicou-se o peneiramento preparatório definido na norma correspondente. As porções preparadas foram identificadas, acondicionadas e mantidas sob condições adequadas até a execução dos ensaios.

Figura 12 Destorroamento do solo



Fonte: Autor (2025)

Figura 13 Quarteamento do solo



Fonte: Autor (2025)

3.3 Dosagem lodo e solo

A escolha das proporções de lodo incorporadas ao solo foi fundamentada na revisão bibliográfica que destacou as práticas mais comuns e as recomendações de estudos anteriores sobre o uso de lodo de ETE em aplicações geotécnicas e de pavimentação.

Os ensaios experimentais foram realizados com três diferentes percentuais de lodo em relação à massa total da mistura: 5%, 7,5% e 10%. O restante da mistura será composto pelo solo da Jazida J-10. Esses percentuais foram selecionados com base em pesquisas como de Kaur e Malik (2018) que utilizaram concentrações de lodo na faixa de 2% a 8% e concluíram que a densidade específica do solo aumenta com a adição do lodo, e que reduz a plasticidade do solo argiloso. Outros autores como Lucena et al (2014 -a) e Lucena et al (2014-b), mostram que misturas com 10% de lodo para 90% de solo apresentaram os melhores resultados mecânicos nas pesquisas.

A decisão de utilizar essas dosagens foi também influenciada por considerações práticas, como a disponibilidade de lodo e as limitações impostas pelas características intrínsecas do solo utilizado. A incorporação de lodo em percentuais dentro desta faixa 5% a 10% tem o potencial de conferir ao solo propriedades físicas e mecânicas mais favoráveis para sua aplicação em camadas de base de pavimentos flexíveis. Babatunde e Zhao (2007) sugerem que essas proporções são eficazes na melhoria da resistência e da durabilidade do solo, além de contribuir para uma destinação ambientalmente adequada do lodo, alinhando-se às diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

3.4 Ensaios laboratoriais

Com o objetivo de assegurar a conformidade técnica com os requisitos normativos nacionais aplicáveis à infraestrutura de pavimentação, especialmente os estabelecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), foi desenvolvido um plano de caracterização geotécnica e química dos materiais envolvidos, incluindo o solo natural e as misturas formadas com adição de lodo. A elaboração deste programa experimental visa não apenas atender às exigências legais e técnicas, mas também fornecer subsídios confiáveis para a avaliação do desempenho mecânico e ambiental desses materiais quando aplicados como camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários (DNIT, 2016).

As primeiras etapas do plano envolvem ensaios físicos fundamentais como a análise granulométrica, os limites de consistência (Limite de Liquidez - LL e Limite de Plasticidade - LP) e a massa específica dos sólidos. Esses parâmetros são cruciais para determinar a natureza do solo, sua plasticidade e a forma como reagem a diferentes níveis de umidade, fatores determinantes para seu comportamento em campo. Estudos clássicos apontam que a relação entre a fração fina e os limites de Atterberg está diretamente associada à capacidade de deformação e suscetibilidade à retração ou expansão do solo (Casagrande, 1932; Terzaghi; Peck, 1967).

Para a classificação geotécnica, foram utilizados os sistemas SUCS, HRB e MCT (Método de Compactação Tropical). O sistema MCT, proposto especificamente para solos tropicais lateríticos, permite uma caracterização mais precisa desses solos típicos do Brasil, considerando sua estrutura, presença de agregados e

comportamento mecânico atípico em relação aos solos de clima temperado. Isso é particularmente relevante em projetos de engenharia rodoviária em regiões tropicais, onde o desempenho do pavimento está intimamente ligado às características estruturais do solo de suporte (Nogami; Villibor, 1983).

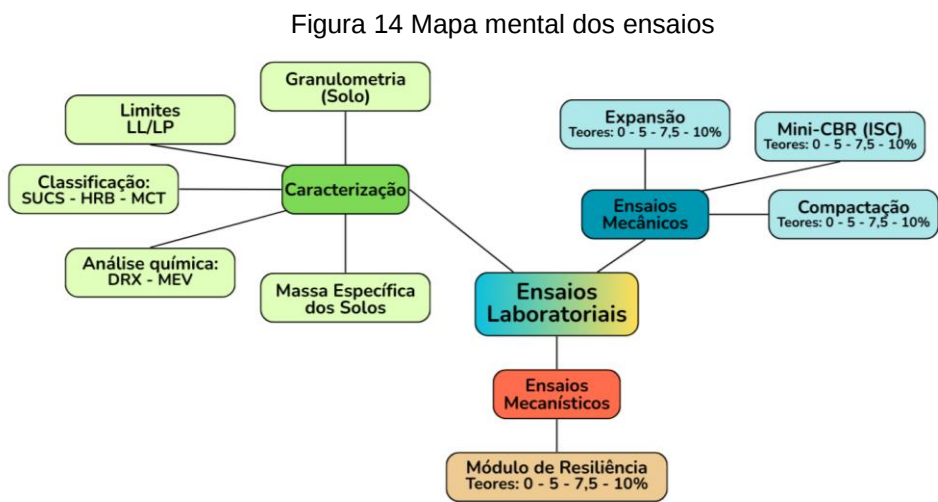
No âmbito da análise química e mineralógica, foram empregados métodos de difração de raios X (DRX) e o teste de azul de metileno, essenciais para a identificação de argilas expansivas e a detecção de minerais como esmectitas, caulinita e illita. Essas informações são vitais para a avaliação da estabilidade volumétrica do solo, já que a presença de certos argilominerais pode induzir variações significativas de volume sob mudanças de umidade, comprometendo a integridade das camadas de pavimento ao longo do tempo (Mitchell; Soga, 2005).

Além disso, foram realizados ensaios de comportamento mecânico com misturas solo-lodo contendo diferentes teores de resíduo (0%, 5%, 7,5% e 10%). Os ensaios incluíram compactação usando a energia referente ao Proctor Modificado, Mini-CBR, expansão volumétrica e determinação do módulo de resiliência. A escolha desses ensaios baseia-se na sua capacidade de reproduzir, em laboratório, condições de carregamento e compactação similares às encontradas em campo. O Índice de Suporte Califórnia (ISC), por exemplo, permite estimar a capacidade de suporte do material frente ao tráfego veicular, sendo uma das ferramentas mais utilizadas no dimensionamento estrutural de pavimentos flexíveis (Pinto, 2000).

O módulo de resiliência, por sua vez, é utilizado em metodologias modernas de dimensionamento mecanístico-empírico por representar a resposta elástica do material frente a cargas repetitivas, permitindo prever a performance do pavimento sob condições reais de serviço. A adoção desse parâmetro, que substitui abordagens puramente empíricas, tem sido fortemente recomendada em manuais de projeto internacionais, refletindo um avanço na engenharia de pavimentos ao incorporar variáveis mais realistas e específicas do comportamento dos materiais.

Para organizar e sistematizar as atividades de laboratório, foi desenvolvido um mapa mental com todos os ensaios realizados (Figura 14). Essa ferramenta gráfica não apenas facilita a compreensão da sequência lógica dos procedimentos, mas também assegura o cumprimento rigoroso de todas as etapas, promovendo a rastreabilidade dos dados e contribuindo para o controle de qualidade do processo experimental. Em ambientes laboratoriais de alta complexidade, o uso de ferramentas

de gestão visual é uma prática recomendada para garantir eficiência, consistência e conformidade técnica. Portanto, o conjunto de ensaios adotado não apenas atende às exigências normativas brasileiras, mas também reflete uma abordagem técnica fundamentada nos princípios clássicos e modernos da engenharia geotécnica e da mecânica dos pavimentos, com ênfase na análise integrada do comportamento físico-químico e mecânico dos materiais.



Fonte: Autor (2025)

A Tabela 3 Ensaios e normasTabela 3 apresenta os ensaios que serão realizados neste estudo, juntamente com as respectivas normas técnicas que guiarão a execução de cada um deles. Esta organização permite uma visão clara das metodologias que serão aplicadas, garantindo que todos os procedimentos sigam padrões reconhecidos, o que é essencial para a validade e confiabilidade dos resultados obtidos.

Tabela 3 Ensaios e normas

Ensaio	Norma
Granulometria do Solo	DNER-ME 080/94
Limite de Liquidez	DNER-ME 122/94
Limite de Plasticidade	DNER-ME 082/94
Massa Específica dos Sólidos	ABNT NBR 6508
MEV	-
DRX	ASTM D 934
Classificação SUCS	ASTM D 2487
Classificação HRB	ASTM D 3282
Classificação MCT	DNIT 259/2023 – CLA
Compactação	DNIT 443/2023 - ME
Mini - CBR e Expansão	DNIT 254/2023 – ME
Módulo de Resiliência	DNIT 134/2018-ME

Fonte: Autor (2025)

3.4.1 Granulometria

A análise da distribuição granulométrica é o ponto de partida e o alicerce de qualquer investigação geotécnica. É amplamente reconhecido na literatura técnica que a curva granulométrica representa uma das propriedades físicas mais importantes e influentes no que tange ao comportamento mecânico dos solos, especialmente aqueles destinados a obras de infraestrutura como a pavimentação (Pinto, 2006). Autores clássicos da mecânica dos solos, como Pinto (2006) e Caputo (1988), estabelecem que a forma como as partículas de diferentes tamanhos se arranja e se encaixam (empacotamento) governa diretamente propriedades de engenharia essenciais, como a resistência ao cisalhamento, a compressibilidade, a permeabilidade e a densidade máxima que o material pode atingir.

A granulometria, ou análise granulométrica, foi realizada com o objetivo de determinar a distribuição das partículas do solo por tamanho, a fim de classificar o material de acordo com os sistemas de classificação de solos adotados no Brasil. Este ensaio permitiu a identificação da proporção de partículas finas, médias e grossas presentes no solo, o que é crucial para entender como este material se comportará quando utilizado em camadas de pavimentação, especialmente em combinação com o lodo.

O procedimento experimental para a determinação da distribuição granulométrica das misturas solo-lodo foi executado em estrita conformidade com a norma DNER-ME 080/94 – Solos - análise granulométrica por peneiramento (DNIT, 1994). A metodologia detalhada compreendeu as seguintes etapas:

1. **Preparação da Amostra:** A amostra foi levada à estufa e mantida a uma temperatura controlada de 100 ± 5 °C até a constância de massa. Após a secagem, a amostra foi cuidadosamente desagregada com um almofariz com pilão de borracha para desfazer os torrões sem quebrar as partículas individuais. Uma amostra representativa foi coletada através do método de quarteamento
2. **Peneiramento:** Uma massa conhecida da amostra preparada foi colocada no topo de um conjunto de peneiras de malhas padronizadas, montadas em ordem decrescente de abertura sobre um agitador mecânico. A série de peneiras a

ser utilizada, conforme especificado pela norma, está detalhada na Tabela 4. O conjunto foi submetido à agitação por um período de 10 minutos ou até que o peneiramento fosse considerado completo.

3. **Cálculos e Apresentação dos Resultados:** Após o peneiramento, o material retido em cada peneira, incluindo o fundo, foi pesado em uma balança com resolução de 0,01 g. A porcentagem retida em cada peneira foi calculada em relação à massa total inicial da amostra. Subsequentemente, foram calculadas as porcentagens retidas acumuladas e, finalmente, as porcentagens acumuladas que passam em cada peneira. Os resultados foram consolidados e apresentados na forma de uma curva de distribuição granulométrica, em um gráfico semilogarítmico, com os diâmetros das partículas na abscissa (escala logarítmica) e a porcentagem passante na ordenada (escala aritmética). Esta representação gráfica permitiu uma análise visual imediata da graduação do material.

Tabela 4 Serie de peneiras

Designação da Peneira	Abertura da Malha (mm)
2"	50,8
1"	25,4
3/8"	9,5
Nº 4	4,8
Nº 10	2
Nº 40	0,42
Nº 200	0,074
Fundo	-

Fonte: DNIT (1994)

3.4.2 Limites de Atterberg

Os Limites de Atterberg são parâmetros fundamentais que definem os teores de umidade críticos em solos finos, delimitando os estados de consistência sólido, semi-sólido, plástico e líquido. Esses limites permitiram avaliar a plasticidade do solo, propriedade dos solos argilosos relacionada à capacidade de serem moldados sem variação de volume dentro de certas faixas de umidade.

Os principais limites de consistência foram o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP) – cujos valores diferenciam solos siltosos de argilosos – além do Limite de Contração (LC), menos usual em classificações de rotina. No Brasil, a determinação de LL e LP foi padronizada pelas normas DNER-ME 122/94 (Limite de Liquidez) e DNER-ME 082/94 (Limite de Plasticidade), equivalentes às ABNT NBR 6459 e 7180, assegurando a reprodutibilidade dos ensaios em laboratório. A correta obtenção desses limites foi essencial para caracterizar o comportamento do solo,

fornecendo informações críticas sobre sua consistência e aptidão para uso em obras geotécnicas.

3.4.3 Limite de Liquidez (LL)

O Limite de Liquidez (LL) foi definido como o teor de umidade no qual o solo passou do estado plástico para o estado líquido, isto é, acima desse teor o material comportou-se como um fluido viscoso. Nesse ponto, o solo apresenta resistência ao cisalhamento residual muito baixa, próxima de 2,5 kPa, conforme a calibração clássica do aparelho de Casagrande.

O ensaio de LL foi realizado no aparato de Casagrande, no qual uma amostra de solo úmida (fração passante na peneira #40, 0,42 mm) foi colocada na concha de latão e se abriu uma ranhura padronizada em seu centro. Em seguida, a concha foi submetida a quedas repetidas de 1 cm de altura sobre base rígida, à razão aproximada de dois golpes por segundo. Registrou-se o número de golpes necessário para que a ranhura se fechasse em 1 cm; teores de umidade maiores tenderam a exigir menos golpes. Obtiveram-se vários pontos na faixa de 15–35 golpes e determinou-se, por interpolação no gráfico umidade $\times$ log(nº de golpes), o teor de umidade correspondente a 25 golpes, definido como LL.

Para cada ponto, calculou-se o teor de umidade w (umidade gravimétrica) pela relação:

$$h = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100\% \quad (1)$$

Em que:

h - Teor de umidade, em porcentagem;

Pu – Massa solo úmido;

Ps – Massa do solo seco até constância de massa.

Em procedimento expedito admitido em norma, quando os pontos ficaram próximos de 25 golpes, o LL pôde ser estimado por:

$$LL = h \left(\frac{N}{25} \right)^{0,156} \quad (2)$$

Em que:

LL – Limite de Liquidez (%);

h - Teor de umidade, em porcentagem;

N – Número de golpes.

3.4.4 Limite de Plasticidade (LP)

O Limite de Plasticidade (LP) foi o teor de umidade no qual o solo passou do estado semissólido para o estado plástico, marcando a umidade mínima a partir da qual o solo adquiriu plasticidade e coesão apreciáveis. A determinação do LP foi feita pelo ensaio do rolamento de fios: uma porção de solo, previamente homogeneizada com água, foi rolada manualmente sobre placa de vidro fosco até formar cilindros com 3 mm de diâmetro. O teor de umidade quando os filamentos começaram a fissurar e se quebrar definiu o LP, o teor é calculado pela fórmula (1).

Repetiram-se as determinações (mínimo de três), adotando-se como resultado a média dos teores de umidade, atendidos os critérios de repetibilidade. Valor do Limite de Plasticidade, média das determinações válidas no instante de fissuração dos fios com 3 mm:

$$LP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (3)$$

Em que:

LP – Limite de Plasticidade (%);

h - Teor de umidade, em porcentagem;

n – Número de determinações válidas (adota-se, em geral, $n \geq 3$).

3.4.5 Índice de Plasticidade (IP)

O Índice de Plasticidade (IP) foi calculado pela expressão:

$$IP = LL - LP \quad (4)$$

O IP quantificou a amplitude da faixa de umidade em que o solo permaneceu plástico. Solos argilosos tendem a apresentar IP elevado, enquanto solos siltosos ou arenosos possuem IP baixo ou nulo. Em termos práticos, quanto maior o IP, mais plástica e coesiva foi a resposta do solo, porém maior também a suscetibilidade a variações volumétricas com mudanças de umidade, aspecto crítico para camadas de pavimentos em serviço.

Esses ensaios, portanto, forneceram uma base sólida para a classificação do solo quanto à sua plasticidade e consistência, aspectos fundamentais para prever seu comportamento sob diferentes condições de serviço. A correta determinação dos Limites de Atterberg permitirá prever como o solo-lodo reagirá em condições de campo, orientando o projeto das camadas de pavimento para garantir a durabilidade e eficiência da estrutura viária.

3.4.6 Massa Específica dos Sólidos

O ensaio de massa específica dos sólidos foi executado conforme a ABNT NBR 6508, método do picnômetro com água. A grandeza expressou a razão entre a massa dos grãos e o volume efetivamente por eles ocupado, excluídos os vazios, refletindo a composição mineralógica do material. A massa específica dos sólidos, ou massa específica dos grãos (ρ_s), constitui um dos índices físicos mais fundamentais na Mecânica dos Solos. Este parâmetro representa uma propriedade intrínseca do material, refletindo diretamente sua constituição mineralógica e servindo como alicerce para a determinação de diversas outras características geotécnicas.

A determinação da massa específica dos sólidos é um procedimento indispensável na caracterização de qualquer solo, pois estabelece a base para a compreensão de seu estado e comportamento. Define-se ρ_s como a razão entre a massa das partículas sólidas do solo e o volume que estas partículas ocupam, desconsiderando, portanto, o volume de vazios. É crucial distinguir este parâmetro da massa específica aparente seca e da massa específica natural, que relacionam a massa de sólidos e a massa total, respectivamente, ao volume total da amostra, que inclui os vazios preenchidos por ar e/ou água.

Utilizou-se picnômetro de vidro calibrado, balança analítica (0,01 g), termômetro (resolução 0,1 °C), água destilada, estufa, dessecador e banho-maria. Determinou-se a massa do picnômetro vazio, a massa do picnômetro com água à temperatura de

ensaio e a massa do picnômetro com solo seco + água até o traço. A massa seca da porção de solo foi obtida por diferença. Após agitação, as leituras foram normalizadas para a temperatura de referência, utilizando-se a massa específica da água.

O volume dos sólidos (equivalente ao volume de água deslocada pelos grãos) foi dado por:

$$\rho_s = \frac{(P_2 - P_1) \times \frac{100}{100 + W_{hig}}}{(P_2 - P_1) \times \frac{100}{100 + W_{hig}} + P_4 - P_3} \times \rho_w \quad (5)$$

Onde:

ρ_s – Massa específicas dos grãos;

P_1 – Peso do picnômetro;

P_2 – Peso do picnômetro + solo;

P_3 – Peso do picnômetro + solo + água destilada;

P_4 – Peso do picnômetro + água destilada;

W_{hig} – Umidade Hidroscópica;

$\rho_w(T)$ – Massa específica da água na temperatura T do ensaio;

Foram realizadas pelo menos duas determinações, aceitando-se resultados quando a diferença entre o maior e o menor ρ_s não excedeu 0,02 g/cm³. O resultado foi apresentado com três algarismos significativos e acompanhado da temperatura utilizada para $\rho_w(T)$.

3.4.7 Classificação do Solo

A classificação geotécnica de solos é uma etapa essencial para compreender as propriedades e o comportamento dos materiais terrosos em obras de engenharia. Por meio da classificação, solos com características similares são agrupados, o que fornece uma linguagem comum para descrever de forma concisa suas características gerais sem necessidade de longas descrições (Das, 2007). Diversos sistemas de classificação foram desenvolvidos buscando um princípio universal que permitisse organizar a grande variedade de solos existentes, facilitando os estudos de

caracterização e antecipando seu comportamento mecânico sob as solicitações das obras de terras (Bueno e Vilar, 1980).

No Brasil, os métodos tradicionais mais utilizados de classificação são o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e o sistema do Highway Research Board (HRB) adotado pela AASHTO, ambos originalmente desenvolvidos em países de clima temperado. Entretanto, devido às discrepâncias observadas quando esses métodos foram aplicados a solos tropicais, pesquisadores brasileiros propuseram um sistema específico para essas condições: a classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), (Nogami e Villibor, 1995).

A seguir são descritos cada um desses sistemas – HRB/AASHTO, SUCS e MCT – incluindo seus critérios, fundamentos e procedimentos, com apoio da literatura técnico-científica.

3.4.7.1 Classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos)

O Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), conhecido internacionalmente como Unified Soil Classification System (USCS), baseia-se na identificação dos solos segundo sua granulometria e plasticidade, relacionando esses aspectos ao comportamento esperado em diferentes obras geotécnicas (DNIT, 2006). O SUCS utiliza resultados de granulometria e dos limites de Atterberg (LL e LP) como critérios principais de classificação (Santos, 2006).

A primeira divisão ocorre quanto à granulometria: os solos de granulação grossa são aqueles em que mais de 50% da amostra fica retida na peneira #200 (ou seja, possuem menos que 50% de finos), ao passo que os solos de granulação fina são aqueles com 50% ou mais passante na #200. Em outras palavras, solos granulares (areias e pedregulhos) e solos finos (siltes e argilas) são separados conforme o teor de partículas abaixo de 0,075 mm.

Para os solos grossos (pedregulhos e areias), ainda se distingue entre pedregulho (gravel) e areia (sand) de acordo com a peneira #4 (4,8 mm): se mais da metade da fração granular fica retida na #4, o solo é classificado como pedregulho; se passa na #4, classifica-se como areia. Além disso, avalia-se a curva granulométrica para definir se o solo é bem graduado ou mal graduado (uniforme), bem como a fração fina presente para identificar característica silte ou argilosa. Para os solos finos (siltes e argilas), a distinção principal considera o Limite de Liquidez: solos com $LL \leq 50\%$ são

de baixa compressibilidade/plasticidade, enquanto solos com $LL > 50\%$ são de alta compressibilidade. Também se diferencia materiais orgânicos (identificados pela letra “O”) dos inorgânicos (siltes “M” ou argilas “C”).

O SUCS designa cada solo por uma sigla de duas letras, eventualmente complementada por uma segunda sigla nos casos intermediários. A primeira letra indica a natureza dominante do solo, e a segunda letra indica a característica de graduação ou plasticidade, conforme a Tabela 5 seguir:

Tabela 5 Sistema unificado de classificação de solos

Categoria	Descrição	Subcategoria	Sigla	Detalhes
SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA mais de 50% retidos na peneira n 200	Mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mal graduados ou misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos, ou misturas de pedregulho e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou misturas de pedregulho e argila.
	Mais de 50% retido na peneira nº 200	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mal graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA 50% ou mais passando pela peneira n 200	SOLOS e ARGLAS com $LL \leq 50$	ML	Siltos inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.	
		CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas orgânicas siltosas e areias siltosas.	
		OL	Siltos orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.	
	SOLOS e ARGLAS com $LL > 50$	MH	Siltos - Areias finas ou siltes micáceos - Siltos elásticos.	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.	
	Solos Altamente Orgânicos		PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.

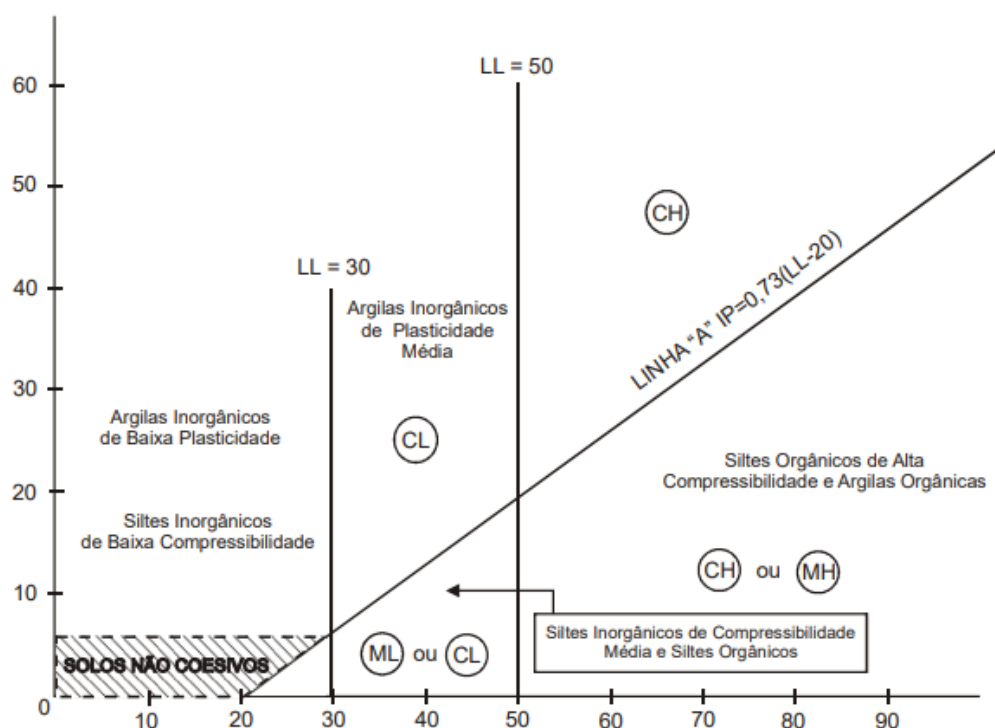
Fonte: DNIT (2006)

Essas designações permitem inferir o comportamento do solo. Por exemplo, um solo classificado como CL (argila inorgânica de baixa plasticidade) tende a ter comportamento mais estável e menor compressão em relação a um CH (argila de alta

plasticidade), enquanto um solo SM (areia siltosa) terá maior susceptibilidade à redução de resistência quando saturado do que um SW (areia bem graduada limpa).

A Figura 15 ilustra o tradicional gráfico de plasticidade de Casagrande, utilizado como referência para delimitar as classificações de solos finos conforme LL e IP. Nele, a Linha A separa predominantemente siltes (abaixo da linha) de argilas (acima da linha). Cada região do gráfico corresponde a uma das classes de solos finos, evidenciando que solos com mesmo LL podem ter diferentes IP e, portanto, cair em classes distintas.

Figura 15 Gráfico de plasticidade



Fonte: DNIT (2006)

Em resumo, o SUCS fornece um sistema de nomenclatura padronizado internacionalmente, amplamente adotado em geotecnia, que descreve de forma sintética a textura e a plasticidade do solo.

3.4.7.2 Classificação HRB (Highway Research Board)

O sistema de classificação rodoviária proposto pelo Highway Research Board (HRB) e adotado pela AASHTO classifica os solos com foco na sua adequação como subleito de rodovias. Essa classificação, de origem norte-americana na década de 1940, foi desenvolvida para uso de engenheiros rodoviários na construção de estradas

e pistas de pouso. Ela divide os solos primeiramente em materiais granulares e materiais siltoso-argilosos, de acordo com o teor de finos (passante na peneira #200, de abertura 0,075 mm). Os materiais granulares são aqueles com 35% ou menos passando na peneira #200, enquanto materiais siltosos/argilosos têm mais de 35% de fração fina passante.

A identificação é feita com base em resultados de ensaios de granulometria e consistência: são consideradas as porcentagens passantes nas peneiras #10 (2,0 mm), #40 (0,425 mm) e #200 (0,075 mm), além do Limite de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP) obtidos na fração fina (passante na #40). Cada grupo possui faixas-limite para esses parâmetros. Por exemplo, os solos do grupo A-1 requerem baixa fração fina ($\leq 15\%$ passante #200) e baixa plasticidade (LL e IP baixos). A Tabela 6 resume os critérios de classificação segundo a AASHTO, incluindo os limites típicos para alguns grupos.

Tabela 6 Classificação de Solos HRB

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 / A-7-6
Grupo											
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Grupo	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

Fonte: Adaptado DNIT (2006)

Em resumo, o sistema HRB/AASHTO fornece uma avaliação dupla: primeiro enquadra o solo em um grupo baseado na granulometria e plasticidade, e depois atribui um índice numérico (IG) para indicar quão “bom ou ruim” aquele solo é dentro do seu grupo. Esse método tem sido amplamente utilizado em pavimentação para julgar a necessidade de melhorias ou substituição de solos de subleito.

3.4.7.3 Classificação MCT (Método de Classificação dos Solos Tropicais)

Devido às características peculiares dos solos tropicais, como a presença de agregados lateríticos, altos teores de óxidos de ferro e alumínio, estrutura porosa e

comportamento diferenciado dos finos, diversos autores identificaram limitações nos sistemas tradicionais (SUCS e AASHTO) ao classificar esses solos de forma adequadas. Com o objetivo de melhorar a identificação e a caracterização de solos tropicais, Nogami e Villibor (1980) desenvolveram, no Brasil, a metodologia de classificação MCT – Miniatura, Compactado, Tropical. Apresentada oficialmente em 1980, essa metodologia inovadora busca determinar se um solo tropical apresenta comportamento laterítico ou não laterítico, informação fundamental para prever seu desempenho em pavimentação. Em essência, o sistema MCT adapta os ensaios de caracterização para considerar a microestrutura e a química dos solos tropicais, em vez de se basear unicamente nos índices tradicionais de LL e IP.

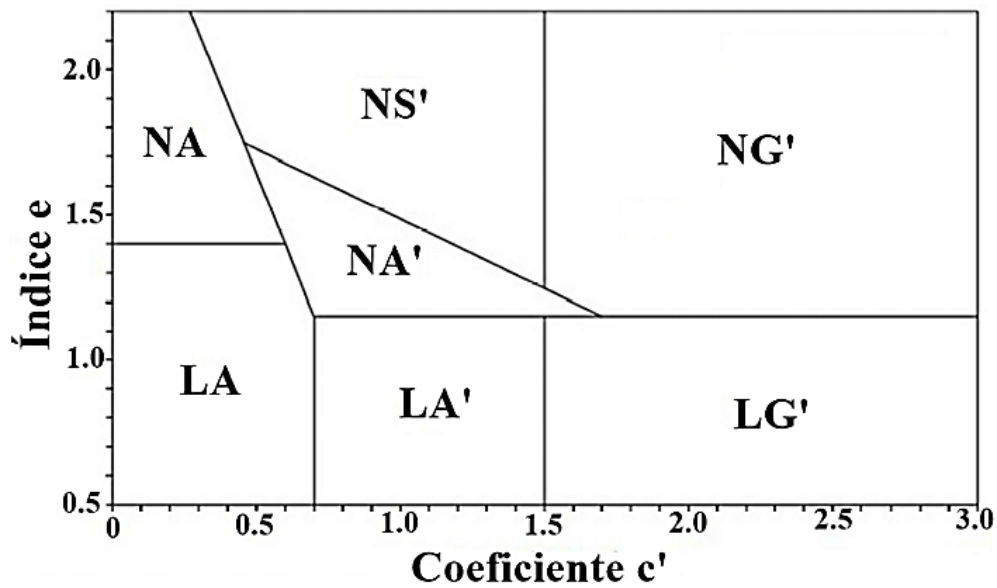
No método MCT, são moldados e ensaiados corpos de prova de dimensões reduzidas, cilindros de 50 mm de diâmetro por 50 mm de altura, compactados em diferentes condições de umidade e energia. Dois ensaios laboratoriais básicos compõem o procedimento:

(1) o Ensaio de compactação Mini-MCV, que consiste em compactar amostras com energias progressivamente maiores até atingir a exsudação de água ou um valor limite de golpes, obtendo-se assim a curva de compactação “miniatura” e um parâmetro de compressibilidade relacionado à energia de compactação aplicada;

(2) o Ensaio de Perda de Massa por Imersão, em que o corpo de prova compactado é parcialmente imerso em água por 24 horas para medir a quantidade de solo que se desagrega e se desprende, obtendo-se o parâmetro d' que indica a resistência do solo na água. A partir desses ensaios, calculam-se coeficientes característicos e, posteriormente, um coeficiente resultante e' , os quais permitem posicionar o solo em um ábaco de classificação MCT.

No ábaco, as regiões delimitadas correspondem às distintas classes de solo MCT, conforme valores obtidos. A Figura 16 apresenta o ábaco original proposto por Nogami e Villibor, no qual cada região indica um tipo de solo tropical.

Figura 16 Ábaco de classificação MCT



Fonte: Nogami e Villibor, (1995)

Um aspecto importante é que o sistema MCT quantifica propriedades fundamentais dos solos tropicais além dos índices convencionais, incluindo sua susceptibilidade à contração linear, expansão, permeabilidade e capacidade de suporte, de forma expedita (Santos e Parreira, 2015). Ele diferencia explicitamente solos com comportamento laterítico daqueles de comportamento não laterítico, pois essa distinção tem implicações diretas no desempenho em pavimentos.

A classificação final via MCT resulta, portanto, em siglas como LA, LG', NA' etc., que fornecem uma indicação direta tanto da granulometria predominante com areia, argila etc. Quanto do tipo de comportamento se laterítico ou não. A Figura 17 mostra a classificação MCT.

Figura 17 Classificação MCT

Classes				N - Solos de comportamento "não laterítico"				L - Solos de comportamento laterítico			
Grupos				NA Areias	NA' Arenosos	NS' Siltosos	NG' Argilosos	LA Areias	LA' Arenosos	LG' Argilosos	
Granulometrias Típicas (Minerais) (1)				Areias Areias Siltosas Siltos (q)	Areias Siltosas Areias Argilosas	Siltos (k,m) Siltos Arenosos e Argilosas	Argilas, Argilas Arenosas, Argi- las Siltosas	Areias com pouca argila	Areias Argilosas Argilas Arenosas	Argilas, Argilas Arenosas	
Capacidade de Suporte	Mini-CBR sem Embebição	Muito Alto > 30		Alta a Média	Alta	Alta a Média	Alta	Alta	Alta a Muito Alta	Alta	
		Alto 12 - 30									
		Médio 4 - 12									
		Baixo < 4									
	Perda de Suporte por Embebição	Alta > 70		Baixa a Média	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	
		Média 40 - 70									
		Baixa < 40									
Expansão (%) (2)		Alta > 3		Baixa	Baixa	Alta	Alta a Média	Baixa	Baixa	Baixa	
		Média 0,5 - 3									
Contração (%) (2)		Baixa <0,5		Baixa a Média	Baixa a Média	Média	Alta a Média	Baixa	Baixa a Média	Baixa a Alta	
Permeabilidade log k (cm/s)		Alta > (-3)		Alta a Média	Baixa	Média a Alta	Baixa a Média	Baixa a Média	Baixa	Baixa	
		Média (-3) a (-6)									
		Baixa < (-6)									
Plasticidade	IP (%)		LL (%)	Baixa a NP	Média a NP	Média a Alta	Alta	NP a Baixa	Baixa a Média	Média a Alta	
	Alta	> 30	> 70								
	Média	7 - 30	30 - 70								
	Baixa	< 7	< 30								

(1) q - quartzo, m - micas, k - caulinita (2) Corpos-de-prova compactados na umidade ótima, energia normal, com sobrecarga padrão quando pertinente

Fonte: DNIT, (2006)

Assim, o método MCT tradicional permanece como referência para classificação de solos tropicais no meio técnico brasileiro, sendo normatizado pelo DNIT e utilizado especialmente em pesquisas de pavimentação e mapeamento de solos lateríticos.

3.4.8 Difração de Raios-X

A técnica de Difração de Raios X (DRX) foi empregada para a identificação das fases cristalinas presentes nas amostras de solo e lodo. Este método é fundamental para a elucidação da composição mineralógica, que por sua vez governa muitas das propriedades geoquímicas e físicas dos materiais em estudo.

A principal justificativa para o emprego da Difração de Raios X reside em sua capacidade singular de identificar e caracterizar materiais cristalinos de forma não destrutiva, baseando-se em sua estrutura atômica única. O fenômeno físico subjacente é a difração, um processo de interferência construtiva que ocorre quando um feixe de raios X interage com os planos de átomos regularmente espaçados em uma estrutura cristalina. Esta relação é descrita quantitativamente pela Lei de Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (6)$$

Onde:

n - Número inteiro;

λ - Comprimento de onda da radiação X incidente;

d - Espaçamento interplanar;

θ - Ângulo de difração.

Cada fase cristalina, em virtude de sua estrutura atômica e simetria únicas, produz um padrão de difração característico, conhecido como difratograma. Este padrão funciona como uma "impressão digital" inequívoca do material, permitindo sua identificação por meio da comparação dos ângulos de difração (posições dos picos) e suas intensidades relativas com extensos bancos de dados de referência, como os mantidos pelo *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

No contexto deste estudo, a análise da composição mineralógica é de importância fundamental. Para amostras de solo, a mineralogia determina propriedades cruciais como a capacidade de troca catiônica, a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e a reatividade com contaminantes. Para amostras de lodo, que frequentemente são consideradas para aplicação agrícola como condicionadores de solo, a DRX permite a identificação de precipitados cristalinos, cargas inorgânicas e componentes mineralizados que podem impactar o ambiente do solo após sua aplicação.

O ensaio de Difração de Raios-X (DRX) foi realizado no solo e no lodo, seguindo a norma "ASTM D 934 - Standard Test Method for Identification of Crystalline Compounds in Water-Treatment Sludge by X-ray Diffraction". A obtenção de dados de alta qualidade por DRX depende criticamente de uma preparação de amostra rigorosa e padronizada. O procedimento geral adotado seguiu as melhores práticas para análise de pós policristalinos. O tratamento inicial das amostras de solo e lodo foi projetado para transformá-las em um pó fino e homogêneo, condição essencial para garantir a aleatoriedade na orientação dos cristalitos e, conseqüentemente, a precisão das intensidades de difração.

O pó fino e peneirado foi cuidadosamente acondicionado em um porta-amostra de baixo fundo, geralmente de alumínio ou vidro. Para mitigar o efeito de orientação preferencial, que é particularmente pronunciado em minerais lamelares como os

argilominerais, foram empregadas técnicas de preenchimento como o carregamento pela parte traseira (*back-loading*), que pressiona o pó contra uma superfície plana, promovendo uma superfície de análise mais aleatória.

A análise foi conduzida em um difratômetro de raios X para pós. O porta-amostra foi posicionado no goniômetro do equipamento. Um feixe de raios X monocromático, tipicamente radiação Cobre K α (CuK α), foi direcionado para a superfície da amostra. O detector e/ou o tubo de raios X rotacionaram em um arranjo síncrono para varrer uma faixa angular pré-definida, por exemplo, de 2° a 80° em 2 θ . O detector registrou a intensidade dos raios X difratados em cada incremento angular, gerando o difratograma, um gráfico da intensidade difratada em função do ângulo 2 θ .

3.4.9 MEV

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), acoplada à Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X, foi utilizada para investigar a morfologia superficial, a microestrutura e a composição elementar das amostras de lodo em escala micrométrica.

A MEV é uma técnica de imagem poderosa, selecionada por sua capacidade de produzir imagens de alta resolução e alta magnificação da superfície de uma amostra, revelando detalhes topográficos, morfológicos e texturais que são completamente inacessíveis por microscopia óptica convencional. Uma das vantagens mais significativas da MEV é sua grande profundidade de foco, que confere às imagens uma aparência tridimensional e permite que superfícies irregulares permaneçam em foco em uma ampla faixa de magnificação. Esta característica é inestimável para a compreensão da arquitetura de agregados de solo, da estrutura de poros e do arranjo espacial de partículas individuais.

A sinergia da MEV com um detector de EDS transforma o microscópio em uma ferramenta de microanálise química de alta precisão espacial. O feixe de elétrons focalizado que varre a amostra para formar a imagem também excita os átomos no volume de interação, fazendo com que emitam raios X com energias características de cada elemento químico presente. O detector EDS mede essas energias, permitindo a identificação qualitativa e a determinação semiquantitativa da composição elementar de volumes micrométricos selecionados pelo operador, seja em um ponto específico, ao longo de uma linha ou em um mapeamento bidimensional da área imageada.

As técnicas de DRX e MEV/EDS são intrinsecamente complementares. Enquanto a DRX fornece uma análise da composição mineralógica média e em massa da amostra, a MEV/EDS permite a visualização direta dos grãos minerais individuais identificados pela DRX. Com a MEV/EDS, é possível determinar a composição elementar de uma partícula específica, avaliar seu tamanho e forma, e investigar como as diferentes fases minerais estão intercrescidas ou associadas à matéria orgânica.

No contexto das amostras de solo, a MEV pode visualizar a morfologia de argilominerais, a estrutura de agregados e as interações entre microrganismos e minerais. Para o lodo, a técnica é útil para caracterizar a morfologia dos flocos biológicos, identificar inclusões inorgânicas e visualizar a textura de biossólidos estabilizados.

As amostras foram completamente desidratadas. Dependendo da fragilidade das estruturas a serem preservadas, podem ser utilizados diferentes métodos. A secagem em estufa é adequada para materiais robustos. Uma porção representativa da amostra seca é fixada sobre um suporte metálico, conhecido como stub. A fixação é realizada com um adesivo condutor, como fita de carbono dupla-face ou tinta de prata/carbono, para garantir um caminho elétrico contínuo da amostra para o terra do microscópio.

O stub com a amostra montada é inserido em um metalizador (sputter coater) ou evaporador de carbono. Uma fina camada de um material condutor é depositada sobre toda a superfície da amostra. Para imageamento de alta resolução, utiliza-se frequentemente ouro ou uma liga de ouro-paládio, devido ao seu alto rendimento de elétrons secundários. Contudo, para análises onde a EDS é o foco principal, um revestimento de carbono é preferível, pois seu sinal de raios X de baixa energia não interfere com os picos da maioria dos elementos de interesse em amostras geológicas e biológicas.

O stub preparado é introduzido na câmara de amostras do MEV, que opera sob alto vácuo. Um feixe de elétrons de alta energia, finamente focado, é gerado por um canhão de elétrons e varre a superfície da amostra em um padrão de varredura retangular (raster). Detectores específicos coletam os sinais gerados pela interação entre o feixe de elétrons e a amostra. Os dois principais tipos de sinais para a formação de imagem são:

Elétrons Secundários (SE): Elétrons de baixa energia ejetados dos átomos da superfície da amostra. Sua emissão é altamente sensível à topografia local, produzindo imagens detalhadas da morfologia e da textura superficial.

Elétrons Retroespalhados (BSE): Elétrons do feixe primário que são espalhados elasticamente por núcleos atômicos na amostra. A intensidade do sinal de BSE é fortemente dependente do número atômico médio (Z) da região analisada. Áreas com Z mais alto (elementos mais pesados) aparecem mais brilhantes na imagem, fornecendo um contraste composicional que permite distinguir diferentes fases minerais ou localizar partículas de metais pesados.

Análise EDS: Simultaneamente ao imageamento, o detector EDS coleta os raios X característicos emitidos pelo volume de interação. Os dados podem ser apresentados como um espectro que mostra os picos de energia correspondentes aos elementos presentes em um ponto, um perfil de concentração ao longo de uma linha, ou mapas elementares bidimensionais que mostram a distribuição espacial de elementos selecionados na área imageada.

3.4.10 Compactação

A compactação de solos é um procedimento indispensável em pavimentação e obras geotécnicas, pois permite melhorar as propriedades mecânicas do material por meio da redução de seu índice de vazios. Segundo Caputo (1975), a compactação de um solo consiste no processo mecânico (manual ou com equipamentos) de reduzir o volume de vazios, aumentando assim sua resistência e estabilidade.

Em outras palavras, o adensamento provocado pela compactação eleva a densidade seca do solo, tornando-o mais resistente às cargas e menos suscetível a deformações indesejáveis. De fato, os objetivos clássicos da compactação incluem aumentar a capacidade de suporte do solo e eliminar recalques, proporcionando maior estabilidade à estrutura construída sobre ele.

Proctor (1933), pioneiro no estudo da compactação, demonstrou que a eficiência desse processo depende principalmente do tipo de solo, do teor de umidade durante a compactação e da energia ou esforço de compactação aplicado. Assim, para cada solo existe um teor de umidade ótimo no qual se obtém a máxima densidade seca – parâmetro fundamental para garantir a resistência e durabilidade das camadas de pavimento. *Souza Pinto* (2006) destaca que a técnica de compactação é amplamente

empregada em aterros, bases e sub-bases de pavimentos, barragens de terra, reforço de fundações e reaterros em geral, justamente devido à melhoria significativa das características do solo compactado.

Em síntese, a realização do ensaio de compactação em laboratório é tecnicamente justificável por fornecer a umidade ótima de compactação e a densidade seca máxima das misturas solo-lodo estudadas, valores estes necessários para orientar o controle tecnológico da compactação em campo, assegurando o desempenho adequado do pavimento (maior resistência e menor deformabilidade) (Caputo, 1975; Souza Pinto, 2006).

Os ensaios de compactação foram realizados conforme a norma DNIT 443/2023 – ME (método de ensaio para solos em moldes cilíndricos tripartidos). Foram preparadas misturas de solo com adição de lodo desidratado nos teores de 0%, 5%, 7,5% e 10% (em relação à massa seca do solo. Antes da moldagem, o solo foi seco em estufa a 105 °C e destorroado em almofariz, passando em peneira de malha 4,8 mm, de forma a eliminar grumos e garantir uma mistura homogênea com o lodo, conforme recomendação das normas de preparação de amostras (DNIT, 2023).

Em seguida, procedeu-se ao ensaio de compactação propriamente dito para cada mistura. Utilizou-se a energia de compactação modificada definida pela DNIT 443/2023, aplicando golpes com soquete mecânico de massa 2,5 kg e altura de queda de 45,7 cm, como mostrado na Figura 18 .

Figura 18 Soquete mecânico



Fonte: Autor, (2025)

Cada corpo de prova foi moldado em um cilindro metálico tripartido de 10 cm de diâmetro interno e 20 cm de altura como mostrado na Figura 19, em 10 camadas aproximadamente iguais. Foram desferidos 38 golpes por camada com o soquete padronizado, resultando na energia de compactação modificada ($\approx 27,3 \text{ kgf/cm}^2$) conforme especificado pela norma para moldes de 10×20 cm.

Figura 19 Molde tripartido compactação



Fonte: Autor, (2025)

Este procedimento de compactação – número de camadas, golpes e energia – atende às condições padronizadas para se obter em laboratório a máxima densidade seca possível do material, simulando um esforço de campo elevado.

Para cada dosagem de lodo (0%, 5%, 7,5% e 10%), realizaram-se no mínimo cinco ensaios de compactação com teores de umidade variados, cobrindo a faixa desde o ramo “seco” até o ramo “úmido” da curva de compactação. Os teores de umidade das amostras foram escolhidos com espaçamento de cerca de 2% entre si, de modo a abranger valores abaixo e acima da umidade estimada como ótima. Em cada ponto de umidade, a mistura solo-lodo foi devidamente homogeneizada e colocada em camadas no molde, compactando-se camada por camada com os golpes mencionados.

Após a compactação de todas as camadas e extrusão do corpo de prova do molde, foram determinadas a massa do material seco e a umidade de moldagem,

calculando-se então a massa específica aparente seca correspondente a cada ponto, segundo os critérios da DNIT 443/2023 – ME. Para o cálculo de umidade e da massa específica aparente seca, utilizou-se as seguintes equações:

Determinação da umidade.

$$h = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

h - Teor de umidade da amostra, em %;

m_h - Massa da amostra úmida;

m_s - Massa da amostra seca;

Massa específica aparente seca

$$MEAS = \frac{m_h \times 100}{(100 + h_c) \times V} \quad (8)$$

Onde:

MEAS - Massa específica aparente seca do corpo de prova compactado, em g/cm³

m_h - Massa da amostra úmida;

h – Teor de umidade da amostra;

V – Volume aparente do corpo de prova.

Com os pares de valores obtidos (teor de umidade × Massa específica aparente seca), construiu-se a curva de compactação de cada mistura, identificando-se graficamente o ponto de máxima densidade e sua respectiva umidade, definidos como densidade seca máxima e umidade ótima de compactação daquela mistura.

O ensaio de compactação forneceu parâmetros essenciais – *teor de umidade ótimo* e *densidade seca máxima* – que nortearam tanto a avaliação comparativa das misturas solo-lodo em laboratório quanto o correto procedimento de compactação dessas misturas em obras de pavimentação, garantindo camadas estáveis, resistentes e duráveis.

3.4.11 Mini - CBR e Expansão

O Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) é um dos parâmetros mais importantes no dimensionamento de pavimentos flexíveis, pois mede a capacidade de suporte de um material sob a aplicação de carga. Tradicionalmente, o ensaio de CBR é realizado em moldes de grandes dimensões. No entanto, para a caracterização de solos tropicais, a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), desenvolvida por Nogami e Villibor, introduziu o ensaio de Mini-CBR, que apresenta vantagens significativas.

O ensaio Mini-CBR foi adotado neste trabalho em função de suas vantagens técnicas e operacionais em relação ao CBR tradicional. O princípio de medição é equivalente ao do ensaio CBR, porém o Mini-CBR utiliza corpos-de-prova de dimensões reduzidas, diâmetro de 50 mm e altura de 50 mm, mantendo a representatividade do teste. A miniaturização do ensaio traz ganhos significativos: requer menor quantidade de material, utiliza equipamentos mais compactos e reduz o tempo de imersão necessário, resultando em maior produtividade do laboratório e menor custo operacional. Estudos indicam que essa redução de tempo e recursos pode chegar a aproximadamente 45% em comparação ao procedimento convencional (Assali; Fortes, 2004).

Além disso, o Mini-CBR foi incorporado às normas brasileiras de pavimentação há décadas, padronizado pelo extinto DNER em 1994 (revisado em 1997) e atualmente normatizado pelo DNIT 254/2023 – ME, o que demonstra seu reconhecimento técnico para avaliação expedita da capacidade de suporte de solos tropicais. Em resumo, a opção pelo Mini-CBR justifica-se pela economia de material e tempo, sem prejuízo da confiabilidade dos resultados, estando em conformidade com as normas vigentes (DNIT, 2023).

A escolha pelo ensaio de Mini-CBR neste estudo se justifica principalmente por ser um método desenvolvido especificamente para as peculiaridades dos solos de regiões tropicais, que frequentemente apresentam comportamento distinto daqueles de climas temperados para os quais o ensaio CBR convencional foi originalmente concebido.

Essas características tornam o Mini-CBR uma ferramenta eficiente para a avaliação da capacidade de suporte, especialmente em programas de pesquisa que envolvem múltiplas dosagens e réplicas, como o presente estudo.

Os procedimentos experimentais seguiram rigorosamente as seguintes normas:

- NORMA DNIT 228/2023 – ME: Solos - Ensaio de compactação em equipamento miniatura - Método de ensaio. Esta norma rege o procedimento de moldagem dos corpos de prova.
- NORMA DNIT 254/2023 – ME: Solos - Compactação em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão - Método de ensaio. Esta norma estabelece os procedimentos para a determinação do índice Mini-CBR e da expansão.

Foram preparadas misturas de solo com adição de lodo de ETE nas proporções de 0%, 5%, 7,5% e 10% em relação à massa de solo seco.

O solo e o lodo, foram previamente secos e destorroados, em seguida, peneirados na peneira de malha quadrada nº 10 (2 mm), então a mistura solo-lodo ou solo puro foi homogeneizado, garantindo uma distribuição uniforme na mistura. Os corpos de prova foram moldados manualmente em molde miniatura com diâmetro interno de 50 mm e altura final de 50 mm, de acordo com a DNIT 228/2023 – ME, que define o equipamento Mini-Proctor, os soquetes e dimensões padronizadas.

A DNIT 228 permite compactação nas energias normal, intermediária ou outra especificada pelo projetista, no caso deste estudo utilizamos a energia modificada. A energia específica é dada por:

$$E_c = \frac{M \times H \times N \times n}{V} \quad (9)$$

Em que:

E_c – Energia de compactação;

M – Massa do soquete;

H – Altura de queda;

N – Número de camadas;

n – Número de golpes por camadas;

Para reproduzir a energia modificada requerida para uso em camadas estruturais, utilizou-se $n = 13$ golpes por camada com compactador manual, calculado por equivalência via equação acima

A moldagem de cada corpo de prova seguiu rigorosamente os procedimentos descritos na norma DNIT 228/2023 – ME, que visa garantir a uniformidade e a altura correta do espécime. O processo iterativo é detalhado a seguir:

1. **Preparação Inicial:** O molde miniatura, limpo e levemente lubrificado, foi posicionado sobre os espaçadores bipartidos no pistão inferior do compactador. Um disco de polietileno foi colocado na base do molde.
2. **Massa Inicial:** Para o primeiro ponto de cada dosagem, uma massa inicial de material de aproximadamente 200 g foi pesada e despejada no molde com auxílio de um funil. O material foi então nivelado com uma leve pressão.
3. **Compactação:** O soquete foi posicionado sobre a amostra e aplicou-se metade do número de golpes calculado para a energia modificada. Em seguida, o soquete e os espaçadores foram removidos, o corpo de prova foi invertido, e a outra metade dos golpes foi aplicada na face oposta. Esta técnica de compactação em duas faces visa uma maior uniformidade da densidade ao longo da altura do corpo de prova.
4. **Verificação da Altura:** Após a compactação, a altura final do corpo de prova (A) foi medida com um extensômetro. O objetivo era atingir uma altura final no intervalo de (50 ± 1) mm.
5. **Correção da Massa:** Caso a altura estivesse fora do intervalo tolerado, o corpo de prova era descartado. Uma nova massa de compactação era calculada pela fórmula de correção:

$$M_c = \frac{M_i \times 50}{A} \quad (10)$$

M_c – Massa corrigida para a nova compactação, expressa em gramas (g);

M_i – Massa inicial;

A – Altura do corpo de prova.

E o procedimento era repetido com a nova massa até que a altura final do espécime atendesse ao critério de (50 ± 1) mm. Este controle rigoroso da altura é fundamental para garantir que o volume do corpo de prova seja padronizado, permitindo cálculos precisos de massa específica.

6. **Moldagem dos Demais Pontos:** Para os outros pontos de umidade da curva, a massa inicial de compactação foi estimada a partir da massa final do ponto anterior, ajustada por uma variação de massa recomendada pela norma em função do tipo de solo, otimizando o processo iterativo.

7. **Determinação da Umidade:** Antes da compactação de cada ponto, duas amostras do material restante foram coletadas para a determinação do teor de umidade de compactação, utilizasse a equação (7) do ensaio de compactação.
8. **Massa específica aparente seca:** Com os corpos de prova compactados, e com a determinação da umidade. Pode calcular a Massa específica aparente seca pela equação (8) a mesma que foi utilizada no ensaio de compactação.

Após a compactação, voltamos para execução da DNIT 254/2023 – ME. O corpo-de-prova foi submetido à imersão em água por um período mínimo de 24 horas permanecendo submerso sob uma sobrecarga padrão que simula o peso das camadas superiores do pavimento. Em seguida, ainda sob a sobrecarga, realizou-se o ensaio de penetração. A condição imersa tem por objetivo reproduzir um cenário crítico de saturação do material, equivalente à condição de solo subleito após longa exposição à umidade, permitindo avaliar a perda de resistência devido à água e a susceptibilidade à expansão da mistura. Durante a imersão, foi medida a expansão dos corpos-de-prova, por meio de leituras no extensômetro, registrando-se a variação de altura causada pela absorção de água, demonstrado na Figura 20.

Figura 20 Cp de Mini-CBR imerso



Fonte: Autor, (2025)

Essa expansão é expressa em percentual do adensamento, conforme a Equação:

$$E = \frac{(L_f - L_i) \times 100}{L_o} \quad (11)$$

E – Expansão, expressa em porcentagem;

L_i – Leitura inicial do extensômetro;

L_f – Leitura final do extensômetro;

L_o – Altura inicial do corpo de prova.

Para cada corpo-de-prova ensaiado, obteve-se a curva de carga versus penetração do pistão padronizado. As leituras de carga do anel dinamométrico foram convertidas em forças (kgf) e plotadas em função da penetração, traçando-se a curva característica. Em seguida, determinaram-se as cargas correspondentes às penetrações de **2,00 mm** e **2,50 mm** na curva corrigida. Com esses valores, calcularam-se os respectivos índices mini-CBR utilizando as correlações empíricas da norma DNIT 254/2023 – derivadas originalmente dos estudos de Nogami (1972) – dadas pelas equações abaixo:

$$\log(\text{mini} - \text{CBR}_1) = -0,254 + 0,896 \times \log C_1 \quad (12)$$

$$\log(\text{mini} - \text{CBR}_2) = -0,356 + 0,937 \times \log C_2 \quad (13)$$

Onde:

$\text{mini} - \text{CBR}_1$ – Valor mini-CBR para penetração de 2,00 mm, expresso em porcentagem (%);

C_1 – Carga para penetração de 2,00 mm;

$\text{mini} - \text{CBR}_2$ – Valor mini-CBR para penetração de 2,50 mm, expresso em porcentagem (%);

C_2 – Carga para penetração de 2,50 mm;

A norma estabelece que se **adote como resultado** o maior valor entre $\text{mini} - \text{CBR}_1$ e $\text{mini} - \text{CBR}_2$ representando assim o **Índice mini-CBR** do material na condição ensaiada. Esse índice foi calculado para cada corpo-de-prova, permitindo então a obtenção do índice conforme já descrito. Todos os cálculos e resultados

seguiram rigorosamente os procedimentos normativos, assegurando que os valores de **índice Mini-CBR** e **RIS** obtidos reflitam com fidelidade o comportamento de suporte das misturas solo-lodo nas duas condições de exposição à água.

3.4.12 Módulo Resiliência

O Módulo de Resiliência (MR) é um parâmetro mecânico que quantifica o comportamento elástico e recuperável de materiais como solos e agregados sob a ação de carregamentos cíclicos, típicos do tráfego veicular. Sua determinação é crucial para os métodos modernos de dimensionamento de pavimentos, especialmente os modelos mecanístico-empíricos, que buscam prever de forma mais realista as tensões e deformações nas estruturas de pavimentação. Este ensaio simula em laboratório as condições de carregamento dinâmico a que os materiais são submetidos em campo, o que permite uma previsão mais precisa do desempenho estrutural das camadas do pavimento. Segundo Medina (1997), a diferenciação entre o Módulo de Resiliência e o Módulo de Young, utilizado em estruturas de concreto e aço, é essencial, pois as deformações recuperáveis em pavimentos são significativamente maiores.

A obtenção deste parâmetro é realizada por meio de ensaios triaxiais de carga repetida, que reproduzem as condições de carregamento das cargas de tráfego sobre o pavimento. O comportamento tensão-deformação da maioria dos materiais de pavimentação é do tipo não linear, sendo altamente dependente das tensões aplicadas. Esta propriedade tem sido utilizada para a caracterização de materiais de pavimentação desde a década de 1970, com os primeiros ensaios no Brasil datados de 1977, conforme Preussler (1978). Bernucci et al. (2010) mencionam que os estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais foram introduzidos na pavimentação a partir de 1940 por Francis Hveem, que foi o primeiro a relacionar as deformações recuperáveis (resiliência) com as fissuras em revestimentos asfálticos.

A análise de tensões e deformações em estruturas de pavimentos multicamadas, conforme citam Medina e Preussler, é uma das formas de se considerar as deformações no dimensionamento. A manifestação dessas deformações recorrentes pode ser identificada em pavimentos asfálticos que exibem fissuração, frequentemente de maneira prematura. A perda de serventia de um pavimento pode ser minimizada ao considerar no dimensionamento o comportamento tensão-

deformação dos materiais sob carregamento dinâmico, que gera deformações resilientes e permanentes. Materiais com maior Módulo de Resiliência são preferencialmente situados próximo à superfície, pois distribuem os esforços do tráfego de maneira mais uniforme, diminuindo as tensões e deflexões no subleito.

A mistura solo-lodo, como material alternativo para camadas de base, exige uma avaliação rigorosa de seu desempenho mecânico, e o ensaio de Módulo de Resiliência é o método primário para quantificar essa propriedade. A relevância do ensaio reside em sua capacidade de capturar a rigidez do material sob as condições de carregamento dinâmico que ele enfrentará em campo. Solos com maior MR são preferidos para camadas de base e sub-base, pois proporcionam maior capacidade de suporte e menor deformação sob cargas repetidas, o que é fundamental para a durabilidade e o desempenho de pavimentos flexíveis, conforme salientado por Specht (2004). Conforme Segundo Medina (1997), a resiliência é particularmente importante em pavimentos flexíveis, onde as deformações resilientes predominam, e a fadiga do material pode levar a trincas e falhas estruturais. Para Specht (2004), o MR pode ser empregado para investigar e prever o desempenho de um pavimento rodoviário em várias condições de umidade, densidade e tensão

3.4.12.1 Procedimento Experimental

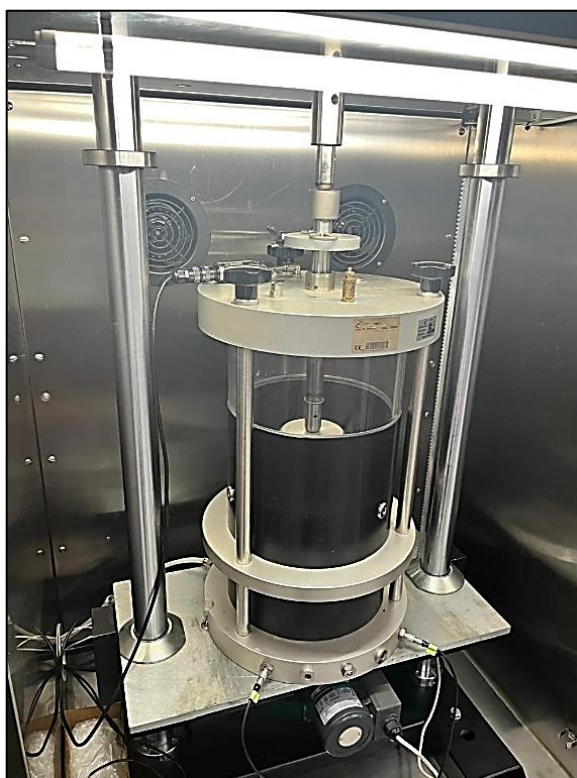
O ensaio para a determinação do Módulo de Resiliência (MR) da mistura solo-lodo foi realizado conforme a norma "DNIT 134/2018-ME - Pavimentação asfáltica – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio".

A preparação dos corpos de prova é uma etapa crítica para a obtenção de resultados fidedignos. A compactação dos corpos de prova para o ensaio de MR foi realizada na umidade ótima do material, a qual foi obtida a partir da curva de compactação do material, seguindo as diretrizes da norma DNIT 443/2023–ME, descrita na subseção 3.4.10 desta pesquisa. A DNIT 134/2018-ME recomenda que, para assegurar a confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados, a preparação e o ensaio sejam realizados em triplicata, ou seja, com três corpos de prova em condições idênticas de umidade e densidade. A moldagem foi feita em um cilindro tripartido de aço com dimensões internas de 10x20 cm (diâmetro x altura), utilizando a energia de compactação Proctor modificada.

O procedimento de compactação por impacto dinâmico seguiu as especificações da norma, incluindo o número de camadas e golpes por camada, conforme a Tabela do Anexo D da DNIT 134/2018-ME. É fundamental que a umidade final do corpo de prova, medida após o ensaio, não varie mais do que $\pm 1\%$ em relação à umidade ótima para material granular e $\pm 0,5\%$ para material fino. Para a mistura solo-lodo, a compactação na umidade ótima garante que o ensaio ocorra em uma condição de rigidez maximizada, visto que a umidade é um dos fatores mais influentes no comportamento resiliente do solo.

O ensaio é conduzido em um equipamento triaxial de carga repetida, conforme esquematizado no Anexo B da norma. A aparelhagem inclui uma prensa pneumática, uma célula ou câmara triaxial, um sistema pneumático de carregamento, um transdutor de carga axial (célula de carga) e um sistema de medição do deslocamento vertical do corpo de prova. Todo o sistema se encontra representado na Figura 21.

Figura 21 Equipamento triaxial



Fonte: Autor, (2025)

A aplicação de uma tensão confinante (σ_3) constante, que envolve o corpo de prova, é uma característica essencial do ensaio triaxial. A norma descreve este ensaio como um procedimento com confinamento, que simula a pressão lateral que o material de uma camada de pavimento experimenta devido ao peso das camadas superiores

e à interação com o solo circundante, a Figura 22 demonstra o cp em confinamento. O estado de tensões, composto pela tensão de confinamento e pela tensão desvio, é um dos fatores que mais afetam o comportamento resiliente do material, conforme citado por Hicks e Monismith (1971) e Uzan (1985). Portanto, a simulação dessas condições em laboratório é indispensável para que os resultados sejam representativos e possam ser utilizados no dimensionamento estrutural.

Figura 22 Confinamento MR



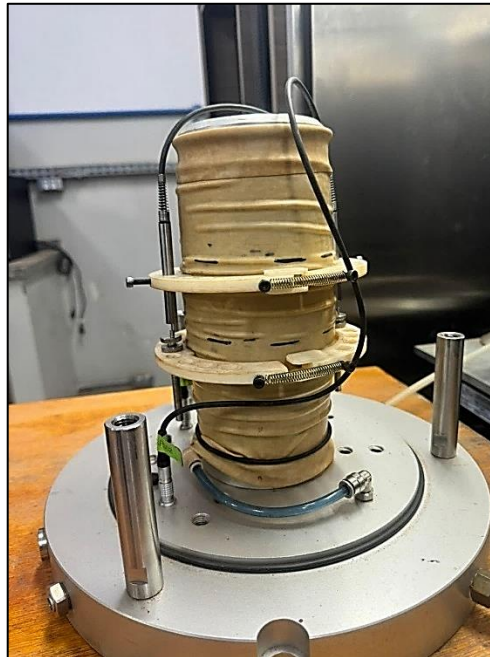
Fonte: Autor, (2025)

Para a medição da deformação resiliente, a norma exige a utilização de dois transdutores de deslocamento do tipo LVDT, posicionados diametralmente opostos no corpo de prova. A média das leituras desses dois transdutores é usada para o cálculo do Módulo de Resiliência, garantindo maior precisão. A norma prevê duas posições para os LVDTs: fixados no cabeçote superior, apoiados em hastes que se estendem até a base da câmara triaxial, ou diretamente fixados no terço médio da amostra.

A escolha da posição do LVDT é uma decisão técnica de alta relevância que reflete a compreensão aprofundada do comportamento do material. Embora a medição no topo seja uma opção, ela pode incluir efeitos de compliância das interfaces e das extremidades do corpo de prova, que não representam a deformação real do material no volume principal. O posicionamento dos LVDTs no terço médio da amostra é uma abordagem mais avançada, pois isola a medição do volume central do corpo de prova (Figura 23). Nessa região, o estado de tensões é mais homogêneo e os efeitos de contorno das extremidades são minimizados. Este método resulta em

valores de deformação mais representativos do material em si, aumentando a confiabilidade e a precisão do Módulo de Resiliência obtido e tornando-o um parâmetro mais robusto para a entrada em modelos de dimensionamento.

Figura 23 Posicionamento LVD



Fonte: Autor, (2025)

Antes de iniciar a determinação do MR, o corpo de prova é submetido a uma fase de condicionamento. Esta etapa, que consiste na aplicação de uma sequência de 500 ciclos de carregamento para cada par de tensões da Tabela 7, tem como objetivo principal eliminar as deformações plásticas iniciais e estabilizar a resposta do material. A frequência das cargas repetidas na tensão vertical (tensão desvio) é de 1 Hz, correspondendo a um pulso de carga de 0,1 segundo seguido por 0,9 segundo de repouso. Durante o condicionamento, a tensão confinante é mantida constante.

Tabela 7 Sequência de tensões para fase de

Tensão Confinante σ_3 (MPa)	Tensão Desvio σ_d (MPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
0,07	0,07	2
0,07	0,21	4
0,105	0,315	4

Fonte: Adaptado DNIT, (2018)

Após a conclusão da fase de condicionamento, inicia-se a determinação do Módulo de Resiliência. Nesta etapa, o material é submetido a uma sequência de 18

pares de tensões, conforme as combinações de tensão confinante (σ_3) e tensão desvio (σ_d) definidas na Tabela 8. Para cada par de tensões, são aplicados no mínimo 10 ciclos de carga, com aquisição de dados de pelo menos 5 repetições, garantindo que a diferença entre as leituras seja, no máximo, de 5%. A média dessas 5 leituras é usada para o cálculo final do MR.

Tabela 8 Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência

Tensão Confinante σ_3 (MPa)	Tensão Desvio σ_d (MPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
0,02	0,02	2
	0,04	3
	0,06	4
0,035	0,035	2
	0,07	3
	0,105	4
0,05	0,05	2
	0,1	3
	0,15	4
0,07	0,07	2
	0,14	3
	0,21	4
0,105	0,105	2
	0,21	3
	0,315	4
0,14	0,14	2
	0,28	3
	0,42	4

Fonte: Adaptado DNIT, (2018)

Com os valores obtidos são calculados os módulos de resiliência para cada par de tensões, por meio das expressões:

$$\sigma_d = \frac{P}{A} \quad (14)$$

Onde:

σ_d – Tensão desvio (Mpa);

P – Carga cíclica aplicada (N);

A – Área do corpo de prova.

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_r}{H_o} \quad (15)$$

Onde:

ε_r – Deformação específica recuperável ou resiliente;

δ_r – Deslocamento resiliente ou recuperável;

H_0 – Altura de referência do medidor de deslocamento (LVDT).

O MR pode ser calculado pela seguinte equação. Que é definida como a relação entre a tensão desvio aplicada (σ_d) e a deformação vertical recuperável correspondente (ε_r).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (16)$$

Os dados podem ser expressos como um modelo matemático (linear ou não linear) que relaciona o Módulo de Resiliência com as tensões aplicadas, obtido por meio de regressão, conforme discutido por Medina (1997) e Medina e Motta (2015).

De forma complementar, aplicou-se os modelos lineares de MR em função da tensão confinante, tensão desvio para realizar uma análise do comportamento resiliente do solo. O modelo composto, proposto por Macedo (2006), foi utilizado para verificar o MR de maneira não linear.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo dedica-se à apresentação e análise aprofundada dos resultados obtidos no programa experimental, cujos procedimentos foram detalhados no capítulo de Metodologia. A exposição dos dados seguirá uma sequência lógica, iniciando-se pela caracterização geotécnica completa do solo em seu estado natural, coletado da jazida em questão. Esta etapa inicial é fundamental, pois, conforme preconizam autores como Caputo (1988) e Das (2010), o conhecimento de parâmetros como a granulometria, os limites de consistência e a massa específica dos grãos é indispensável para a correta interpretação do comportamento do material.

Na sequência, serão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos realizados com as misturas de solo-lodo, analisando comparativamente o efeito da adição de lodo nos teores de 5%, 7,5% e 10% sobre os parâmetros de compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Módulo de Resiliência (MR).

Cada conjunto de resultados será discutido à luz do referencial teórico apresentado, estabelecendo um diálogo com a literatura pertinente e avaliando o desempenho das misturas frente aos critérios normativos do DNIT. O objetivo final é consolidar as evidências experimentais que permitirão, no capítulo de conclusões, aferir a viabilidade técnica da utilização do lodo de ETE como agente estabilizador em camadas de pavimento. Ressalta-se que as fichas de ensaio, contendo os dados brutos, encontram-se nos apêndices deste trabalho.

4.1 Limites de Atterberg

Os Limites de Atterberg, também conhecidos como limites de consistência, são parâmetros empíricos, porém fundamentais, que definem as fronteiras entre os estados de consistência de um solo fino: líquido, plástico e semissólido. A determinação desses limites foi realizada na fração do solo J-10 que passa na peneira de 0,42 mm (nº 40), seguindo rigorosamente os procedimentos das normas já citadas. O Limite de Liquidez (LL) foi determinado pelo método de Casagrande Figura 24.

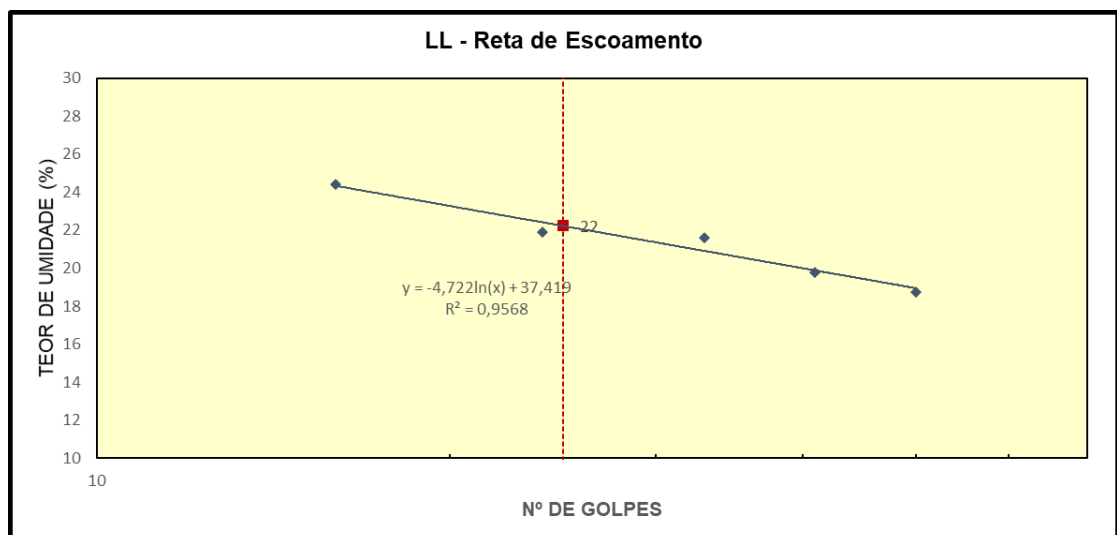
Figura 24 Ensaio de limite de Liquidez



Fonte: Autor (2024)

A relação entre o teor de umidade e o número de golpes é apresentada na Figura 25, conhecida como Reta de Escoamento.

Figura 25 Reta de escoamento



Fonte: Autor, (2025)

O coeficiente de determinação da regressão ajustada foi $R^2 = 0,9568$, indicando excelente correlação dos dados experimentais com o modelo logarítmico de escoamento. A partir da reta, obteve-se o teor de umidade correspondente a 25 golpes, resultando em um valor de **22,2%**.

O Limite de Plasticidade (LP) foi determinado pela umidade média de três corpos de prova que atingiram o ponto de fissuramento ao serem rolados até um diâmetro de 3 mm, como mostrado na Figura 26.

Figura 26 Ensaio limite de plasticidade



Fonte: Autor (2025)

O LP apresentou valor médio de 13,3%, com base nas três cápsulas válidas que atenderam ao critério de consistência da norma.

Com os valores de LL e LP, podemos calcular o Índice de plasticidade com a equação 4. Com o cálculo chegamos a um valor de IP de 8,9%. Os resultados consolidados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 Resultados dos Limites de Atterberg para o Solo J-10

	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)
Solo J - 10	22,2 %	13,3 %	8,9 %

Fonte: Autor (2025)

O Índice de Plasticidade é um dos parâmetros mais eloquentes da mecânica dos solos, pois quantifica a magnitude das forças de superfície nas partículas de argila, que são as responsáveis pelo comportamento coesivo e pela interação do solo com a água (Terzaghi et al., 1996). Um IP de 8,9% situa o solo J-10 na fronteira entre os materiais de baixa plasticidade e os não plásticos, sugerindo a presença de argilominerais, mas em quantidade ou com atividade mineralógica que não resulta em um comportamento predominantemente argiloso.

Os resultados obtidos indicam que o solo apresenta baixa plasticidade, com base na classificação tradicional da Tabela de Plasticidade proposta por Casagrande. O valor do Índice de Plasticidade ($IP = 8,9\%$) sugere que o solo possui comportamento coesivo moderado, típico de solos argilosos com teores relativamente baixos de finos ativos (Pinto, 2000).

Segundo Terzaghi e Peck (1967), solos com IP entre 5% e 15% tendem a apresentar plasticidade baixa a intermediária, podendo exibir retrações moderadas, mas ainda com comportamento relativamente estável em termos de volume e resistência quando sujeitos a variações de umidade. Isso é importante do ponto de vista do desempenho mecânico de camadas de pavimento, pois solos com plasticidade excessiva tendem a se deformar sob cargas repetidas ou em ambientes com alta sazonalidade de chuvas (Seed; Chan, 1959).

Mitchell e Soga (2005) também destacam que materiais com LL abaixo de 30% e IP abaixo de 10% geralmente se enquadram em categorias de solos com baixo teor de argilominerais expansivos, como as esmectitas, o que sugere um risco reduzido de instabilidade volumétrica. Isso se alinha aos objetivos deste trabalho, que busca materiais com comportamento previsível e com menor suscetibilidade à deformação plástica para camadas estruturais de pavimentos.

Do ponto de vista construtivo, a baixa plasticidade favorece o processo de compactação e estabilização, reduzindo o consumo de água e a energia necessária para alcançar a densidade ótima do solo. Em termos de durabilidade, solos com IP na faixa observada são menos propensos a formação de trilhas e recalques sob tráfego repetitivo, especialmente quando adequadamente compactados (Bowles, 1992).

Além disso, o valor de LL abaixo de 25% também é um indicativo de que o solo possui baixo potencial de expansão, o que permite sua utilização em bases e sub-bases com desempenho satisfatório.

Em resumo, os resultados dos Limites de Atterberg apontam que o solo estudado apresenta condições aceitáveis para uso em obras de pavimentação, sendo compatível com os critérios estabelecidos em diretrizes do DNIT para materiais de sub-base e base.

O primeiro limite, limite de liquidez representa o teor em água acima do qual o solo adquire o comportamento de um líquido e, o valor encontrado no ensaio para o solo analisado foi de 22,2%. Já o limite de plasticidade refere-se ao teor de umidade

abaixo do qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido, ou seja, ele perde a capacidade de ser moldado e passa a ficar quebradiço e, para o solo da jazida J-10 obteve-se um valor de 13,3% para tal limite Figura 26.

A partir dos valores dos limites apresentados acima, pode-se determinar o índice de plasticidade de 8,9%, indicando plasticidade baixa ($5 < IP < 10$).

4.2 Granulometria.

Dando continuidade aos ensaios de caracterização, foi realizada a granulometria por peneiramento do material, cuja norma que preconiza o ensaio está descrita em DNER-ME 080/94. O resumo das frações é representado na tabela Tabela 10.

Tabela 10 Resumo granulometria

Fração Granulométrica	Diâmetro (mm)	Porcentagem (%)
Pedregulho	> 4,8	0,4
Areia Grossa	4,8 - 2,0	0,8
Areia Média	2,0 - 0,42	10,4
Areia Fina	0,42 - 0,074	54,3
Silte + Argila	< 0,074	34
Total		100

Fonte: Autor (2025)

Para uma melhor compreensão visual da composição do solo, a Figura 27 apresenta as porções de material retidas nas diferentes peneiras após o ensaio. Esta representação ilustra de forma tangível a distribuição das partículas.

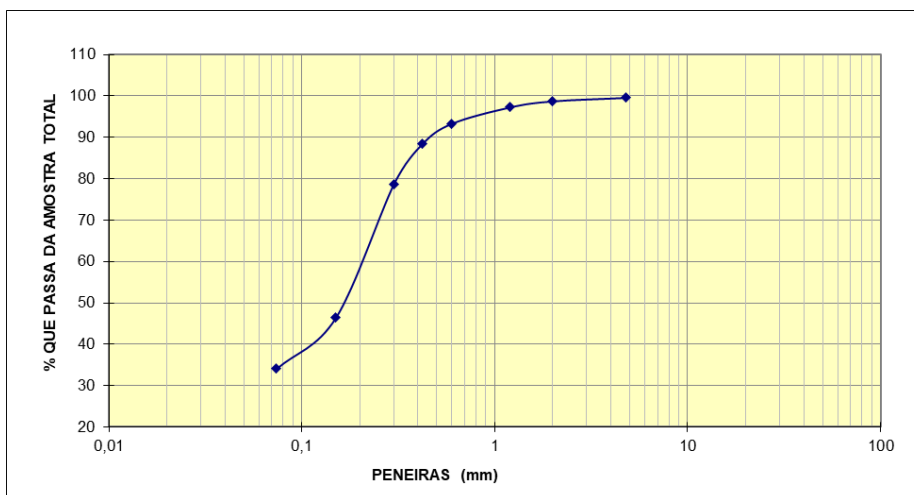
Figura 27 Porções de solo retido por peneira no ensaio de granulometria.



Fonte: Autor (2025)

A curva granulométrica resultante do ensaio está apresentada na Figura 28, visando determinar a distribuição quantitativa das partículas que constituem seu esqueleto sólido.

Figura 28 Curva granulométrica do solo da Jazida J-10.



Fonte: Autor (2025)

A análise da distribuição granulométrica revela uma estrutura de solo bastante particular e de grande interesse geotécnico. O material é predominantemente arenoso (65,5%), contudo, a maior parte desta fração (54,3% da massa total) está concentrada em uma faixa de diâmetros muito restrita, a de areia fina. Esta concentração é visualmente confirmada pela elevada declividade da curva granulométrica entre as peneiras de 0,42 mm (Nº 40) e 0,074 mm (Nº 200), o que caracteriza a fração arenosa como sendo mal graduada ou de alta uniformidade. Conforme Pinto (2006), solos mal graduados são aqueles aos quais faltam partículas de certos diâmetros, resultando em um esqueleto granular com elevado índice de vazios, pois as partículas menores não são adequadas para preencher os espaços deixados pelas maiores.

A segunda fração mais significativa é a de finos (silte + argila), que corresponde a 34,0% da massa total. Esta quantidade de finos é a principal responsável pelo comportamento coesivo do solo, corroborando diretamente os resultados dos Limites de Atterberg. A presença de 34,0% de material com diâmetro inferior a 0,074 mm justifica plenamente a plasticidade observada ($IP = 8,9\%$), indicando que estes finos não são inertes, mas possuem atividade mineralógica suficiente para reter água adsorvida e conferir coesão à massa de solo (Mitchell; Soga, 2005). A interação entre uma matriz de areia uniforme e uma fração argilosa ativa define o comportamento híbrido do material.

Esta caracterização detalhada estabelece o cenário para a investigação central desta tese. A adição de lodo de ETE, um material composto quase que integralmente por partículas finas, irá inevitavelmente alterar essa estrutura. A literatura geotécnica aponta para a existência de um teor de finos de transição, um ponto crítico no qual o comportamento de uma mistura deixa de ser governado pelo contato grão-a-grão da fração grossa (areia) e passa a ser dominado pela matriz de finos (Thevanayagam; Martin, 2002). No caso do solo J-10, a adição de lodo poderá, inicialmente, preencher os vazios da areia mal graduada, potencialmente aumentando a massa específica seca e melhorando o intertravamento.

Contudo, a partir de um certo teor, é provável que as partículas de areia comecem a "flutuar" na matriz de finos (lodo + argila do solo), o que resultaria em uma drástica redução da resistência ao atrito e um aumento da deformabilidade. A análise subsequente do comportamento de compactação, CBR e, fundamentalmente, do Módulo de Resiliência das misturas solo-lodo, buscará identificar precisamente este ponto de transição e avaliar se a incorporação do lodo otimiza a estrutura do solo ou a degrada do ponto de vista do desempenho em pavimentos.

4.3 Massa Específica dos Sólidos

O ensaio para determinação da massa específica dos sólidos (ou densidade real dos grãos) do solo J-10 foi executado em duplicata, seguindo os preceitos da norma ABNT NBR 6508, que emprega o método do picnômetro com água (Figura 29). O resultado deste ensaio é um parâmetro adimensional que expressa a relação entre a massa das partículas sólidas e a massa de um volume equivalente de água destilada a 4°C.

Figura 29 Ensaio Massa Específica dos Sólidos



A Tabela 11 apresenta o valor médio obtido.

Tabela 11 Resultado da Massa Específica dos Sólidos

Picnômetro	δ	δ_{medio}
6	2,528	2,533
14	2,537	

Fonte: Autor (2025)

O valor médio obtido para a massa específica dos sólidos do solo J-10 foi de 2,533. Este parâmetro é uma propriedade intrínseca do material, sendo diretamente influenciado pela sua composição mineralógica. Conforme a literatura geotécnica clássica, a maioria dos minerais constituintes dos solos, como quartzo, feldspatos e calcita, apresenta valores de massa específica que variam tipicamente entre 2,65 e 2,75 (Das, 2010).

O valor de 2,533, portanto, situa-se ligeiramente abaixo desta faixa convencional. Esta observação é significativa e suscita algumas hipóteses interpretativas. Uma vez que a análise granulométrica indicou a predominância de areia, seria esperado um valor mais próximo de 2,65, característico do quartzo. O valor inferior pode ser atribuído à presença da considerável fração de finos (34,0%), que, como vimos, confere plasticidade ao solo.

A composição mineralógica destes argilominerais pode incluir minerais de menor densidade. Sólidos orgânicos possuem uma massa específica muito inferior à dos minerais, e sua presença, mesmo em pequenas porcentagens, é suficiente para reduzir o valor médio do agregado mineral (Holtz; Kovacs, 1981).

A principal implicação deste resultado para a presente tese reside na sua função como parâmetro de referência. O lodo de ETE, que será incorporado ao solo, é um material caracterizado por um elevado teor de matéria orgânica. Consequentemente, a massa específica de seus sólidos é sabidamente baixa, frequentemente inferior a 2,0. Assim, é imperativo reconhecer que a massa específica dos sólidos não será uma constante nas misturas, mas sim uma variável que diminuirá progressivamente com o aumento do teor de lodo.

4.4 Classificação do Solo

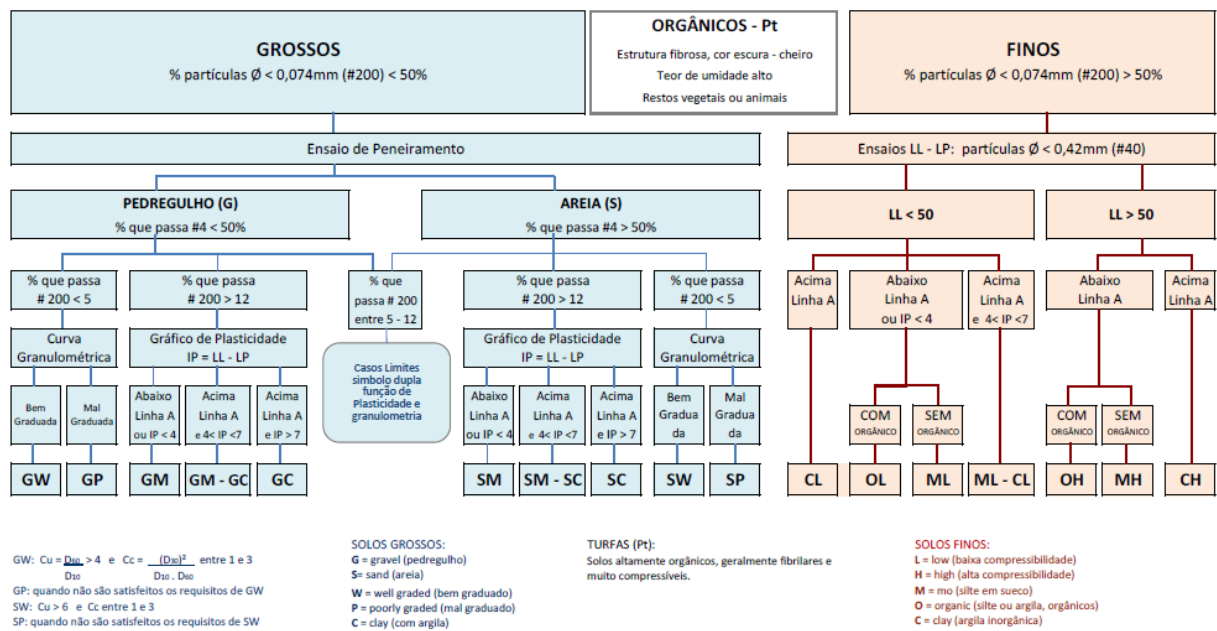
A classificação de um solo por diferentes sistemas é uma prática de grande valor na engenharia geotécnica, pois cada sistema foi desenvolvido com um foco particular,

e a análise conjunta oferece uma compreensão mais holística do material. Nesta subseção, o solo J-10 será classificado por três sistemas distintos e complementares: o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), de aplicação geotécnica geral; o sistema rodoviário HRB (Highway Research Board); e a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), específica para solos tropicais. A classificação em cada um desses sistemas será apresentada e discutida individualmente. Ao final, será realizada uma análise comparativa, confrontando os resultados das três classificações para o solo J-10, a fim de consolidar o entendimento sobre seu comportamento e potencial de aplicação.

4.4.1.1 Classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos)

O Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), normatizado pela ASTM D-2487, é um dos mais utilizados mundialmente por sua abordagem sistemática que integra a granulometria e a plasticidade para definir o comportamento do solo. O fluxograma de classificação do sistema SUCS, apresentado na Figura 30, detalha o processo decisório para a categorização do solo. A classificação do solo J-10, com base nos resultados obtidos, segue o caminho delineado neste fluxograma:

Figura 30 Classificação SUCS

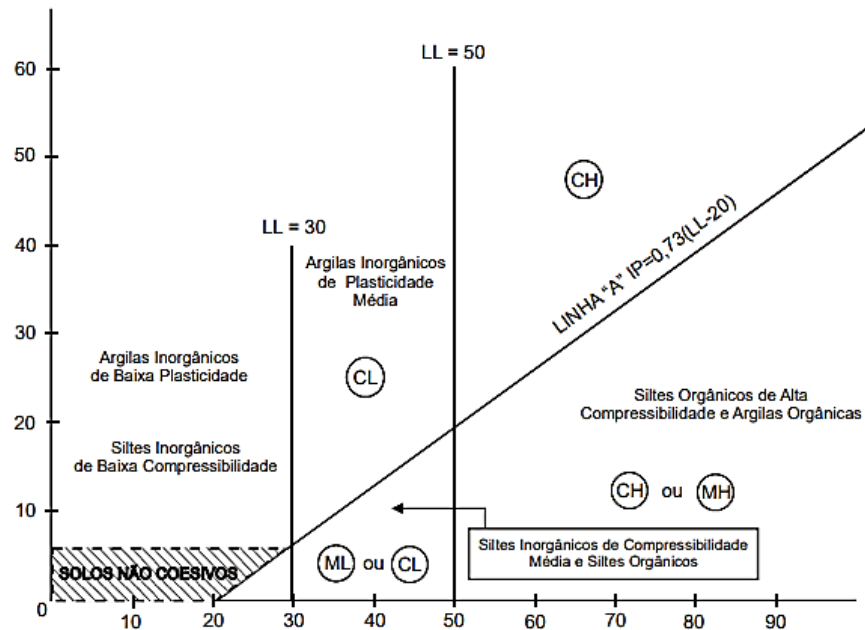


Análise da Fração Fina: O ponto de partida no fluxograma é a análise da porcentagem de partículas com diâmetro inferior a 0,074 mm (passante na peneira Nº 200). O solo J-10 apresenta 34,0% de finos. Como este valor é inferior a 50%, o caminho seguido é o dos Solos Grossos.

Análise da Fração Grossa: Dentro do grupo dos solos grossos, o critério seguinte é a predominância de areia ou pedregulho na fração retida na peneira Nº 200. Da fração grossa (66,0% do total), a porcentagem de areia (65,5%) é superior à de pedregulho (0,4%). O fluxograma direciona, portanto, para o grupo das Areias (S), que recebem o símbolo primário S.

Análise da Plasticidade dos Finos: Como a porcentagem de finos (34,0%) é superior a 12%, o fluxograma indica a necessidade de analisar a plasticidade da fração fina utilizando o Gráfico de Plasticidade (Figura 31). Com um Limite de Liquidez (LL) de 22,2% e um Índice de Plasticidade (IP) de 8,9%, o ponto correspondente situa-se acima da Linha "A". Isso indica que a fração fina tem um comportamento argiloso, o que, segundo o fluxograma, confere ao solo o símbolo secundário C.

Figura 31 Gráfico de plasticidade



Fonte: Adaptado Casagrande (2006)

A combinação do símbolo primário (S) com o secundário (C) resulta na classificação final do solo J-10 pelo sistema SUCS como SC – Areia Argilosa.

A classificação SC (Areia Argilosa) é de profunda significância e sintetiza todas as nossas observações anteriores. Ela descreve um material de comportamento híbrido, no qual a estrutura mecânica é governada pelo esqueleto granular de areia, mas cujo comportamento é substancialmente influenciado pela coesão e plasticidade da fração argilosa (Lambe; Whitman, 1979). A resistência ao cisalhamento deste solo, portanto, possui duas componentes: uma parcela friccional, oriunda do contato grão-a-grão da areia, e uma parcela coesiva, proveniente da matriz de finos.

Esta classificação posiciona o solo J-10 como um material geotécnico de bom potencial para a pavimentação. Solos SC são frequentemente considerados materiais de boa a excelente qualidade para sub-base e base de pavimentos, pois a fração argilosa atua como um aglutinante natural, preenchendo os vazios da areia (especialmente relevante no nosso caso, dada a má graduação da areia) e conferindo coesão à massa compactada, o que facilita a execução e melhora a estabilidade (Holtz; Kovacs, 1981).

É crucial, no entanto, aprofundar a análise. A interação entre a fração grossa e a fina em um solo SC é complexa. A questão fundamental é se os finos estão apenas

preenchendo os vazios ou se o seu volume é tal que começa a afastar os grãos de areia, reduzindo o contato entre eles. No caso do solo J-10, com 34,0% de finos, estamos em uma zona de transição. A literatura sugere que, para teores de finos acima de 25-30%, o comportamento do solo começa a ser cada vez mais dominado pela matriz de finos, aproximando-se do comportamento de um solo fino (Thevanayagam; Martin, 2002).

Esta observação é o ponto de partida para a hipótese central do nosso estudo. A adição de lodo de ETE, que é essencialmente um material fino e plástico, irá inevitavelmente aumentar a proporção de finos na mistura. Isso poderá causar uma transição no comportamento do material, alterando sua classificação de uma Areia Argilosa (SC) para, potencialmente, uma Argila Arenosa (CS) ou mesmo uma Argila de Baixa Plasticidade (CL).

Tal mudança não é apenas uma alteração de sigla; ela representa uma transformação fundamental no mecanismo de suporte de carga do material. Um solo SC é dominado pelo atrito; um solo CL é dominado pela coesão. Essa transição pode implicar em uma redução da capacidade de suporte sob carregamento rápido (tráfego) e um aumento da suscetibilidade à deformação plástica e à variação de volume com a umidade. A análise do comportamento mecânico das misturas solo-lodo nos capítulos seguintes buscará, portanto, quantificar o impacto dessa transição e determinar o teor ótimo de lodo que melhora as propriedades do solo sem comprometer seu mecanismo de resistência fundamental.

4.4.1.2 Classificação HRB (Highway Research Board)

O sistema de classificação HRB (Highway Research Board), também conhecido como sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), é especificamente voltado para a avaliação de solos para subleitos de rodovias. Sua lógica é agrupar os materiais com base em seu provável desempenho como fundação de pavimentos. A classificação do solo J-10, com base nos dados já apresentados, é a seguinte:

Análise Granulométrica e Plasticidade: Os parâmetros de entrada para o sistema são:

- Porcentagem passante na peneira Nº 200: 34,0%

- Limite de Liquidez (LL): 22,2%
- Índice de Plasticidade (IP): 8,9%

Enquadramento nos Grupos: Seguindo a Tabela 12 de classificação, o processo é eliminatório, da esquerda para a direita:

- O solo possui menos de 35% de material passante na peneira Nº 200, enquadrando-se, portanto, nos materiais granulares (A-1, A-2 ou A-3).
- Ele não atende aos critérios de graduação para o grupo A-1, nem aos de material não plástico para o grupo A-3.
- Ele se enquadra no grupo A-2, que compreende areias e pedregulhos siltosos ou argilosos. Dentro dos subgrupos, ele atende especificamente aos critérios do A-2-4, que são: % passante na Nº 200 $\leq$ 35%, LL $\leq$ 40 e IP $\leq$ 10.

Tabela 12 - Classificação de Solos HRB

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 / A-7-6
Grupo											
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40											
Limite de Liquidez - LL (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidade IP (%)	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

Fonte: Adaptado DNIT (2006)

A classificação A-2-4 é um indicativo extremamente positivo do ponto de vista da engenharia rodoviária. Ela designa um material granular cuja fração fina é de natureza siltosa ou argilosa de baixa plasticidade. Segundo o sistema HRB, solos A-2-4 são classificados como de excelente a bom como material para subleito de rodovias (Caputo, 1988).

Esta classificação não apenas corrobora, mas também complementa a classificação SUCS (SC – Areia Argilosa). Enquanto o SUCS nos dá uma descrição mais detalhada da composição e do comportamento geotécnico geral, o HRB nos oferece um prognóstico direto de seu desempenho em uma aplicação específica: a pavimentação. A classificação A-2-4 reforça a interpretação de que o solo J-10 é um material de partida de alta qualidade, com boa capacidade de suporte e baixa

suscetibilidade a variações de umidade, características primordiais para a longevidade de uma estrutura de pavimento.

Esta conclusão é fundamental para o delineamento da nossa pesquisa. Ao contrário de muitos estudos que utilizam lodo para "corrigir" solos problemáticos, esta tese parte de um cenário de "otimização". O solo J-10 já é, por si só, um material de excelente qualidade. O desafio, portanto, é avaliar até que ponto a incorporação de um resíduo (lodo de ETE) pode ser realizada sem que este material de referência perca suas características superiores. A análise das misturas solo-lodo buscará identificar o teor máximo de lodo que ainda permite que a mistura mantenha uma classificação rodoviária favorável, estabelecendo um limite técnico claro para a aplicação sustentável deste resíduo.

4.4.1.3 Classificação MCT (Miniatura Compactada Tropical)

A Classificação Miniatura Compactada Tropical (MCT) é uma metodologia desenvolvida especificamente para a avaliação de solos de regiões tropicais para fins rodoviários, com foco em camadas de infraestrutura de pavimentos. Esta sistemática foi desenvolvida por Nogami e Villibor (1981) para superar as limitações dos sistemas tradicionais (SUCS e HRB), que, segundo diversos pesquisadores, nem sempre refletem adequadamente o comportamento de solos tropicais, especialmente os de natureza laterítica (Vertamatti, 1988).

A amostra do solo J-10 foi submetida aos procedimentos de ensaio conforme as normas DNIT 258/2023 – ME (Ensaio Mini-MCV) e DNIT 259/2023 – CLA (Classificação). A partir dos ensaios de mini-MCV e perda de massa por imersão, foram obtidos os coeficientes e parâmetros apresentados na Tabela 13.

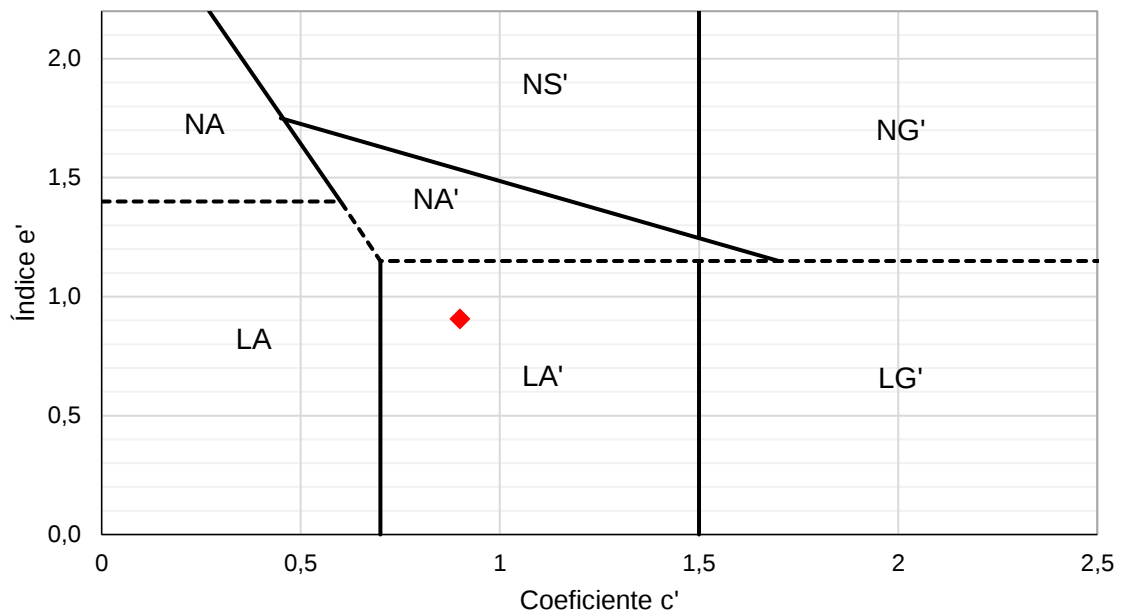
Tabela 13 Resumo parâmetros

Parâmetro	Valor
Coeficiente c'	0,9
Coeficiente d'	137,02
Parâmetro P_i	74
Coeficiente e'	0,96

Fonte: Autor (2025)

Com os coeficientes $c' = 0,90$ e $e' = 0,96$, o solo é posicionado no gráfico de classificação da metodologia MCT, conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 32 Gráfico para classificação de solos pela metodologia MCT.



Fonte: Autor (2025)

A classificação LA' designa o solo J-10 como um solo arenoso de comportamento laterítico, conforme a sistemática proposta por Nogami e Villibor (1995). Esta classificação é de extrema importância e refina consideravelmente as interpretações anteriores. No contexto da metodologia MCT, o termo "laterítico" transcende seu significado pedológico e assume uma conotação tecnológica: ele descreve solos com um comportamento geotécnico superior para aplicações rodoviárias, caracterizado por baixa expansão e baixa perda de resistência quando submetidos à saturação (Nogami; Villibor, 1995).

Ao consultar a tabela de propriedades típicas dos grupos MCT (Figura 17), observa-se que os solos do grupo LA' são caracterizados por apresentarem um comportamento mecânico favorável, incluindo alta capacidade de suporte e baixa variação volumétrica (Nogami; Villibor, 1995).

Esta classificação, portanto, não apenas confirma as avaliações positivas dos sistemas SUCS (SC) e HRB (A-2-4 (0)), mas as qualifica. Ela explica *por que* o solo J-10 é um material de bom desempenho: seu comportamento é laterítico. A literatura geotécnica brasileira é vasta em exemplos de solos que, apesar de serem classificados como inadequados pelos sistemas tradicionais, apresentam excelente

desempenho em campo justamente por possuírem essa estrutura laterítica, uma característica que a metodologia MCT consegue capturar com sucesso (Vertamatti, 1988; Medina; Motta, 2015).

A classificação LA' posiciona o solo J-10 como um material de referência de alta qualidade para camadas de base e sub-base. A discussão central desta tese, portanto, ganha uma nova camada de complexidade. A pesquisa não se limita a avaliar a incorporação de um resíduo em um solo qualquer, mas sim a investigar a interação de um material orgânico, plástico e de comportamento não laterítico (o lodo de ETE) com a microestrutura estável e robusta de um solo laterítico.

A hipótese a ser verificada nos ensaios mecânicos subsequentes é se a adição de lodo irá "contaminar" ou desestabilizar a estrutura laterítica do solo J-10. A estabilidade dos agregados em solos lateríticos é, em grande parte, atribuída à cimentação por óxidos de ferro e alumínio, que criam uma microestrutura porosa e resistente (Mitchell; Soga, 2005). A introdução de um material com alta concentração de finos e matéria orgânica, como o lodo, pode ter um efeito duplo. Por um lado, os finos do lodo podem preencher os vazios da areia mal graduada, potencialmente aumentando a massa específica seca. Por outro, a matéria orgânica e os finos plásticos podem recobrir os agregados do solo, interferindo nas ligações cimentantes e "lubrificando" os contatos, o que poderia levar a uma perda das características favoráveis do grupo LA', como um aumento na perda de suporte por imersão e na expansibilidade.

Portanto, a análise dos resultados de Compactação, CBR e Módulo de Resiliência das misturas será crucial para determinar se existe um teor de lodo que possa ser incorporado de forma benéfica, sem, contudo, degradar o comportamento laterítico superior do solo original.

4.4.1.4 Análise Comparativa das Classificações

A classificação do solo J-10 pelos três sistemas distintos SUCS, HRB e MCT. Fornece um panorama completo e multifacetado de suas propriedades e de seu potencial de aplicação. Embora cada sistema utilize critérios e focos diferentes, a análise conjunta de seus resultados, apresentada na Tabela 14, revela uma notável convergência no diagnóstico do material como sendo de alta qualidade para fins rodoviários.

Tabela 14 Resumo Comparativo das Classificações

Sistema de Classificação	Classificação	Interpretação Geotécnica
SUCS	SC – Areia Argilosa	Material de granulação grossa com comportamento híbrido, combinando a resistência ao atrito da areia com a coesão da fração argilosa.
HRB	A-2-4 (0)	Material granular de excelente a bom para uso como subleito, com Índice de Grupo nulo, indicando desempenho superior dentro de sua categoria.
MCT	LA' – Solo Arenoso Laterítico	Solo de comportamento laterítico, indicando alta capacidade de suporte, baixa expansibilidade e baixa perda de resistência quando saturado.

Fonte: Autor (2025)

A convergência dos resultados é o primeiro ponto a ser destacado. Os três sistemas, por caminhos distintos, apontam para um solo de bom a excelente desempenho. A classificação SUCS (SC) descreve a *composição fundamental* do solo: um esqueleto de areia cujos vazios são preenchidos por uma fração argilosa ativa, conferindo-lhe um comportamento misto de atrito e coesão (Lambe; Whitman, 1979). A classificação HRB (A-2-4) traduz essa composição em um *prognóstico de desempenho empírico* para rodovias, classificando-o como um material superior para subleitos (Caputo, 1988).

É a classificação MCT (LA'), no entanto, que oferece a explicação mais sofisticada para este bom desempenho, ao identificar a *natureza* do solo. A designação "comportamento laterítico" explica *por que* o solo J-10, mesmo com 34,0% de finos, exibe características tão favoráveis. Conforme Nogami e Villibor (1995), solos de comportamento laterítico possuem uma microestrutura cimentada por óxidos de ferro e alumínio que lhes confere alta estabilidade e resiliência, especialmente em condições de umidade adversas.

A literatura frequentemente aponta para as limitações das classificações tradicionais quando aplicadas a solos tropicais, com muitos solos sendo subestimados pelos sistemas SUCS e HRB (Santana et al., 2023). No caso do solo J-10, a concordância entre os sistemas é um indicativo ainda mais forte de sua qualidade: ele é considerado bom até mesmo pelos critérios mais conservadores e é classificado como superior pela metodologia mais adequada ao seu contexto, como a de solos amazônicos estudados por Vertamatti (1988).

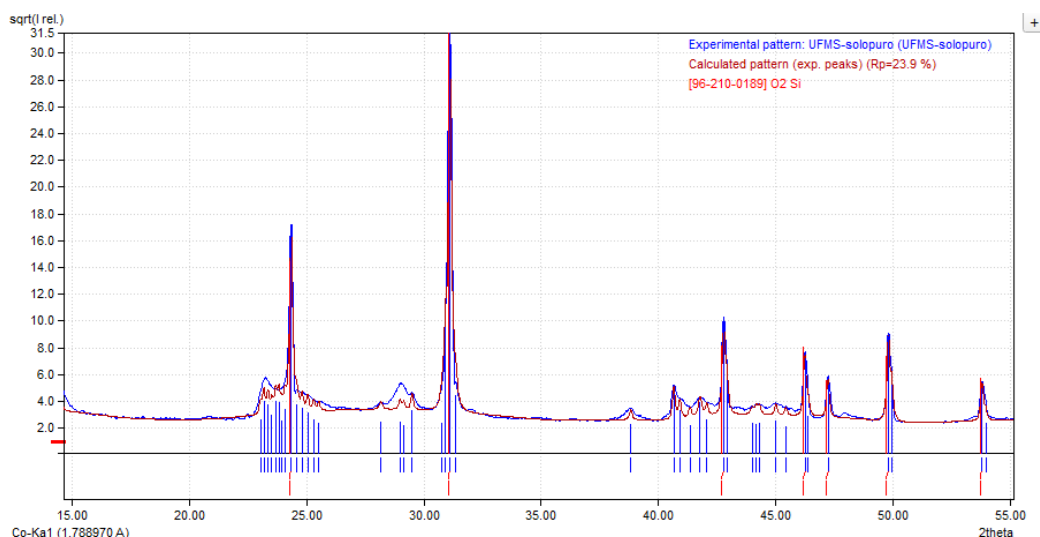
4.5 Difração de Raios-X (DRX)

Para aprofundar a compreensão da constituição dos materiais, amostras do solo J-10 e do lodo de ETE foram submetidas à análise por Difração de Raios X (DRX). Esta técnica é essencial para a identificação das fases cristalinas presentes em um material, fornecendo informações indispensáveis sobre sua composição mineralógica. A identificação das fases cristalinas nos difratogramas foi realizada com o auxílio do software *Match!*, utilizando o banco de dados cristalográfico de referência.

4.5.1 Análise Mineralógica do Solo

O difratograma obtido para a amostra do solo J-10 é apresentado na Figura 33.

Figura 33 Difratograma de Raios X para o Solo J-10



Fonte: *Match!* (2025)

A Figura 34 apresenta as principais fases candidatas identificadas pelo software com base na correspondência com o padrão experimental.

Figura 34 Principais fases DRX

Formula	Candidate phase	P(2theta)	P(I/I0)	I scale fct.	I/Ic	FoM
O2 Si		0.9950	0.9676	1.0113	4.76	0.9045
O2 Si	Quartz	0.9954	0.9625	1.0121	4.75	0.9041
O2 Si	Quartz	0.9909	0.9652	1.0118	4.74	0.9035
O2 Si	Silicon oxide β -alpha (Quartz low)	0.9889	0.9689	1.0131	4.64	0.9034
O2 Si	Silicon oxide β -alpha (Quartz low)	0.9822	0.9749	1.0120	4.43	0.9027
O2 Si	Silicon oxide (Quartz)	0.9788	0.9671	1.0126	4.66	0.9013
O2 Si		0.9720	0.9717	1.0141	4.46	0.9005
O2 Si	Silicon oxide (Quartz low)	0.9174	0.9386	1.0132	4.82	0.8868
O2 Si	Si O2	0.9879	0.6408	0.8304	3.51	0.8709
O2 Si	Si O2	0.8063	0.9618	1.0134	4.57	0.8676
O2 Si	Silicon oxide - β -alpha (Quartz low)	0.7959	0.9304	1.0132	4.82	0.8626
O2 Si	Si O2	0.8066	0.9139	1.0077	4.59	0.8604
O2 Si	Quartz	0.9874	0.5007	0.6181	3.00	0.8520
O2 Si	Quartz	0.9883	0.4992	0.6168	2.99	0.8520
O2 Si	Si O2	0.8160	0.7830	0.4139	1.55	0.8386
Al O4 P	Berlinite	0.6384	0.5526	0.5458	2.72	0.7929
C4 N4 S4 Si	Si (N C S)4	0.4060	0.7962	0.8296	3.47	0.7867
O2 Si	Quartz	0.6609	0.9034	0.1982	3.01	0.7822
O2 Si	Quartz	0.5866	0.9054	0.2000	3.03	0.7689
O2 Si	Quartz	0.5340	0.9269	0.1985	3.01	0.7641
O2 Si	Quartz	0.5393	0.9021	0.2029	2.99	0.7604
Fe Li3 Mo3 O12	Li3 Fe (Mo O4)3	0.4569	0.4139	0.3551	3.74	0.7325
O2 Si	Quartz	0.3644	0.9274	0.1990	2.99	0.7316
Fe Li2.6 Mo3 Na0.4 O...	Sodium lithium iron(III) trimolybdate	0.3588	0.4879	0.3279	4.04	0.7283

Fonte: Match! (2025)

A análise do difratograma do solo revela um padrão característico de um material de alta cristalinidade, evidenciado pela presença de picos de difração intensos, bem definidos e com baixo ruído de fundo. A análise no software *Match!* identificou o Quartzo (SiO_2) como a fase mineralógica largamente predominante, com um excelente Fator de Mérito (FoM) que indica alta confiabilidade na identificação.

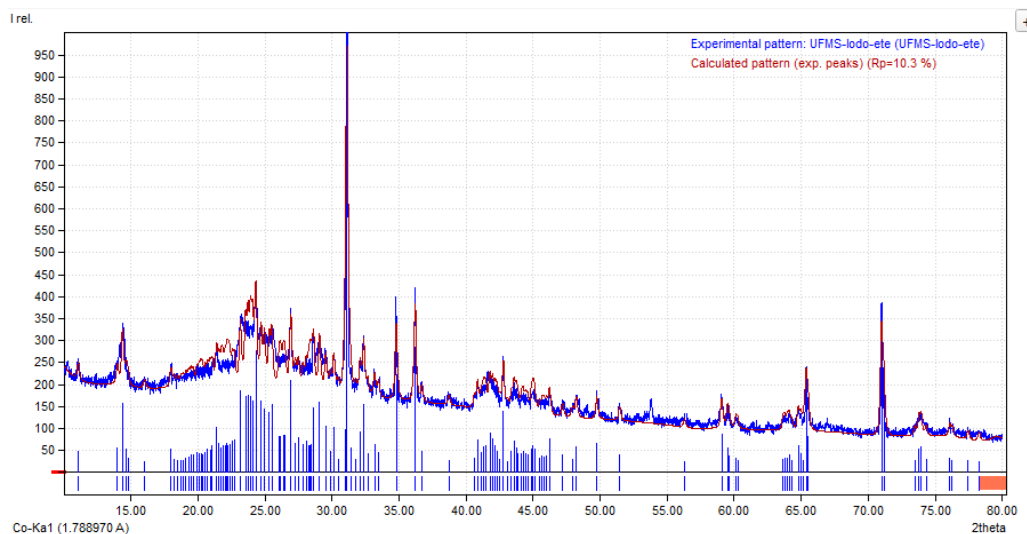
É de fundamental importância, no entanto, notar o que o difratograma não mostra com clareza: picos significativos de óxidos de ferro e alumínio, que seriam esperados em um solo de comportamento laterítico (LA'). Essa aparente ausência não indica que tais compostos não existam, mas sim que eles se encontram em um estado de baixa cristalinidade ou amorfos (Lima, 2007).

Esta é a assinatura da cimentação que confere aos solos tropicais sua estabilidade microestrutural, um fenômeno que a DRX, focada em estruturas cristalinas ordenadas, não captura eficientemente. Portanto, a DRX corrobora a natureza quartzosa do esqueleto granular do solo, enquanto a classificação MCT (LA') e a análise MEV explicam a natureza dos agentes ligantes que a DRX não evidencia.

4.5.2 Análise Mineralógica do Lodo

O difratograma obtido para a amostra de lodo de ETE, apresentado na Figura 35, exibe um perfil marcadamente distinto do solo.

Figura 35 Difratoograma de Raios X para o Lodo



Fonte: Match! (2025)

A Figura 36 mostra as fases candidatas mais prováveis.

Figura 36 Principais fases análise de DRX do Lodo

Entry	Formula	Candidate phase	P(2theta)	P(1/10)	I scale fct.	I/Ic	FoM
96-101-1160	O2 Si	Silicon oxide (Quartz low)	0.9042	0.8142	1.0112	4.82	0.8564
96-152-6861	O2 Si	Si O2	0.8187	0.9031	1.0109	4.57	0.8473
96-101-1177	O2 Si	Silicon oxide - β -alpha (Quartz low)	0.7939	0.8731	1.0112	4.82	0.8397
96-153-2513	O2 Si	Si O2	0.6938	0.9410	1.0108	4.59	0.8269
96-411-4284	C0 F8 Fe2 N6 O8 P2		0.4308	0.8963	0.3736	1.75	0.8190
96-231-0482	Co2 H33 N10 O18 S4	(N H3)5 Co O2 Co (N H3)5 S O4 (H S O4)3	0.3951	0.8951	0.3213	1.66	0.8185
96-900-8998	B N		0.7399	0.8544	0.9925	2.37	0.8122
96-154-1742	C4 N4 S4 Si	Si (N C S)4	0.5163	0.8191	0.8358	3.47	0.8113
96-900-4014	Al1.806 H4 Na1.71 O...	Analcime	0.3582	0.8876	0.3282	0.62	0.8084
96-201-8503	Al Li3 Mo3 O12	Trilithium aluminium trimolybdate(VI)	0.4990	0.8044	0.6898	4.20	0.8055
96-411-6714	Rb12 Si17	Rb12Si17	0.4301	0.7982	0.1892	0.36	0.8024
96-900-9235	Al2 H4 O9 Si2	Kaolinite	0.5456	0.8936	0.2845	1.14	0.8004
96-403-1418	F39 Sb9 Se4	Se4 (Sb2 F4) (Sb2 F5) (Sb F6)5	0.4334	0.7614	0.2517	1.94	0.8003
96-201-5446	Mo2 O7 Rb2	dirubidium heptaaxodimolybdate	0.3920	0.8667	0.9619	8.26	0.7988
96-153-7107	Cs23 O14.15 Sn8	Cs23 (Sn4) (Sn O3)4 O2.15	0.3571	0.7535	0.3199	4.34	0.7982
96-434-4112	F2 N P	N P F2	0.6466	0.7286	0.7560	3.44	0.7962
96-210-6543	Ba2 Cu O18 P6	Ba2 Cu (P O3)6	0.5049	0.5779	0.7394	2.33	0.7950
96-202-0344	Fe H5 O9 P2	Fe (H3 O) (H P O4)2	0.4272	0.8408	0.3115	2.42	0.7931
96-220-2309	H2 Na O13 Rb3 V4		0.4824	0.6614	0.6172	2.66	0.7928
96-153-1932	Be F2	Be F2	0.7220	0.6311	0.9503	2.58	0.7924
96-451-3284	As4 O6		0.4653	0.7508	0.8220	4.85	0.7902
96-153-6598	Ga0.87 In5.13 Na2 S...	Na2 ((In5.13 Ga0.87) Se10)	0.4845	0.6732	0.2741	2.14	0.7893
96-901-1363	S8	Sulfur	0.5801	0.7295	0.3696	2.01	0.7885
96-901-1364	S8	Sulfur	0.5799	0.7286	0.3692	2.01	0.7883
96-900-9231	Al2 H4 O9 Si2	Kaolinite	0.5376	0.8551	0.2779	1.22	0.7878

Fonte: Match! (2025)

Em nítido contraste com o solo, o padrão do lodo é caracterizado por uma linha de base elevada e com uma ampla banda amorfa na faixa de 20° a 40° 2 θ . Este perfil é típico de materiais com uma fração amorfa ou de baixa cristalinidade significativa, o que, no caso do lodo, é atribuído ao alto teor de matéria orgânica e a compostos inorgânicos não cristalinos (Singh; Agrawal, 2008).

Sobreposta a esta base amorfa, a análise identificou fases cristalinas, notadamente Quartzo (SiO_2) e, de grande relevância geotécnica, Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). A presença de quartzo no lodo é esperada, sendo oriundo de partículas de areia e silte carregadas para o sistema de esgoto. A identificação da caulinita, um argilomineral do grupo 1:1, é um fator chave, pois sua estrutura lamelar e atividade de superfície contribuem diretamente para a plasticidade e a elevada capacidade de retenção de água do lodo.

A comparação dos resultados da DRX para o solo e o lodo evidencia a profunda diferença na natureza dos dois materiais e é a chave para entender a interação entre eles.

O solo J-10 é, essencialmente, um material mineral, geológico e de composição cristalina simples, dominado por uma estrutura estável de quartzo. Sua coesão e comportamento laterítico são governados por agentes cimentantes amorfos que a DRX não detecta. Em contrapartida, o lodo de ETE é um material heterogêneo e complexo, de origem biológica e química, cuja característica dominante é a grande quantidade de matéria amorfa e uma diversidade de fases cristalinas minoritárias.

Esta análise mineralógica fundamenta e refina nossa hipótese central. Ao misturar os dois materiais, estamos combinando um esqueleto granular robusto e quimicamente pouco reativo (quartzo do solo J-10) com um agente modificador complexo (lodo), que possui uma fase amorfa (matéria orgânica), uma fase cristalina inerte (quartzo) e uma fase cristalina reativa (caulinita). A interação resultante não será apenas física (preenchimento de vazios), mas também físico-química.

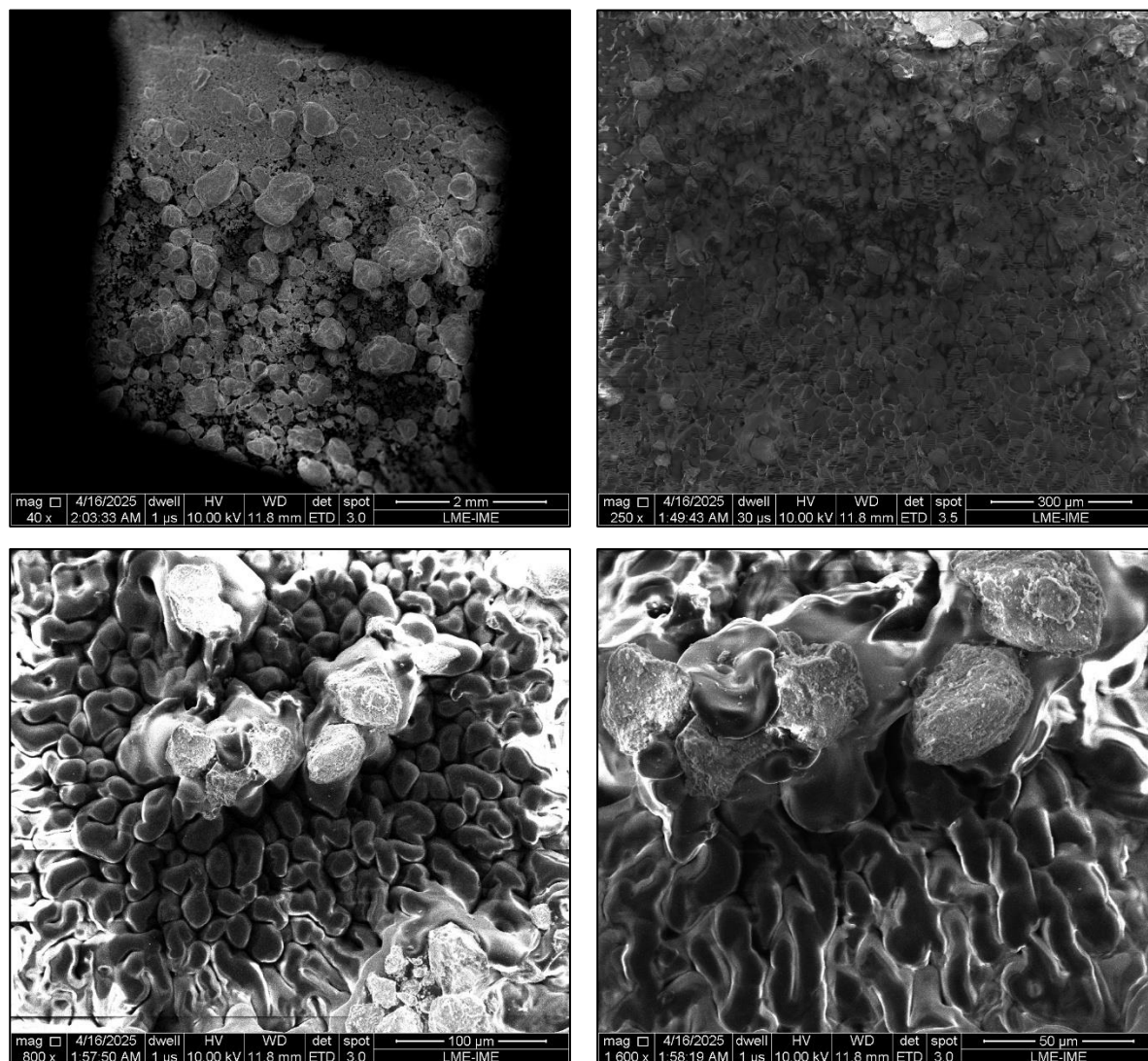
A caulinita e a matéria orgânica do lodo irão recobrir os grãos de quartzo do solo, alterando as forças interpartículas e, conseqüentemente, o comportamento de compactação e a resistência da mistura. A compreensão desta composição mineralógica é, portanto, indispensável para a correta interpretação dos resultados dos ensaios mecânicos que serão apresentados a seguir.

4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para compreender a natureza do lodo de ETE em sua escala fundamental, foram realizadas análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Esta investigação microestrutural é crucial, pois a forma, o tamanho e o arranjo das partículas do lodo

irão ditar os mecanismos de interação com o esqueleto granular do solo J-10. A Figura 37 apresenta as micrografias do lodo de ETE em diferentes níveis de ampliação.

Figura 37 Micrografias do lodo de ETE em diferentes ampliações



Fonte: Autor (2025)

A análise das micrografias revela que o lodo de ETE não é composto por partículas minerais discretas, mas sim por uma estrutura complexa e heterogênea. Em menor ampliação (40x), observa-se um material com aparência granular, mas as imagens subsequentes (250x, 800x e 1600x) deixam claro que esses "grãos" são, na verdade, agregados ou flocos, formados pela aglomeração de inúmeras partículas muito menores.

A morfologia desses agregados é predominantemente irregular, com uma textura superficial extremamente rugosa e porosa. Esta estrutura floculada é característica de

lodos de esgoto, onde processos biológicos e químicos durante o tratamento promovem a agregação de sólidos orgânicos e inorgânicos, resultando em uma matriz com elevada área de superfície específica e grande capacidade de retenção de água. A imagem de maior ampliação (1500x) permite visualizar a natureza das partículas constituintes desses flocos: são elementos finíssimos, de tamanho silte e argila, com um arranjo desordenado que cria uma rede de microporos intra-agregados.

Esta microestrutura explica diversas das propriedades macroscópicas do lodo. A alta porosidade interna dos flocos justifica sua baixa massa específica e sua elevada umidade de equilíbrio. A grande área de superfície específica, por sua vez, é responsável por seu comportamento plástico e coesivo quando umedecido.

A morfologia irregular e as arestas dos agregados poderiam, a princípio, sugerir um bom potencial de intertravamento. No entanto, é crucial considerar a baixa resistência intrínseca desses flocos. Diferente dos agregados cimentados do solo laterítico J-10, os agregados do lodo são mantidos coesos por forças físico-químicas e pela matéria orgânica, sendo suscetíveis à desagregação sob a ação de esforços mecânicos, como os de mistura e compactação (Tsutiya, 2006).

A evidência microestrutural aqui apresentada é, portanto, fundamental para a hipótese central da tese. O lodo não atuará como um simples *filler* inerte na mistura com o solo J-10. A energia de mistura e compactação provavelmente romperá parte desses flocos, liberando as partículas finas e a matéria orgânica, que irão recobrir os agregados lateríticos do solo.

Esta interação na interface solo-lodo é o que definirá o comportamento da mistura: o recobrimento pode "lubrificar" os contatos entre os agregados do solo, reduzindo a resistência ao atrito, ou pode atuar como um agente ligante, conferindo uma coesão adicional à mistura. A análise do comportamento mecânico das misturas nos permitirá inferir qual desses mecanismos é predominante em cada teor de lodo.

4.7 Compactação

O ensaio de compactação, realizado na energia modificada conforme a norma DNIT 443/2023 – ME, é um procedimento fundamental para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de um solo ou mistura. Seus resultados, a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima, são parâmetros indispensáveis para o controle de execução de camadas de pavimentos

e para a moldagem de corpos de prova para ensaios subsequentes. Foram ensaiados o solo J-10 puro e as misturas com 5%, 7,5% e 10% de lodo de ETE em relação à massa de solo seco.

Na Tabela 15, podemos ver os resultados, da umidade ótima e da massa específica aparente seca, de cada uma das compactações

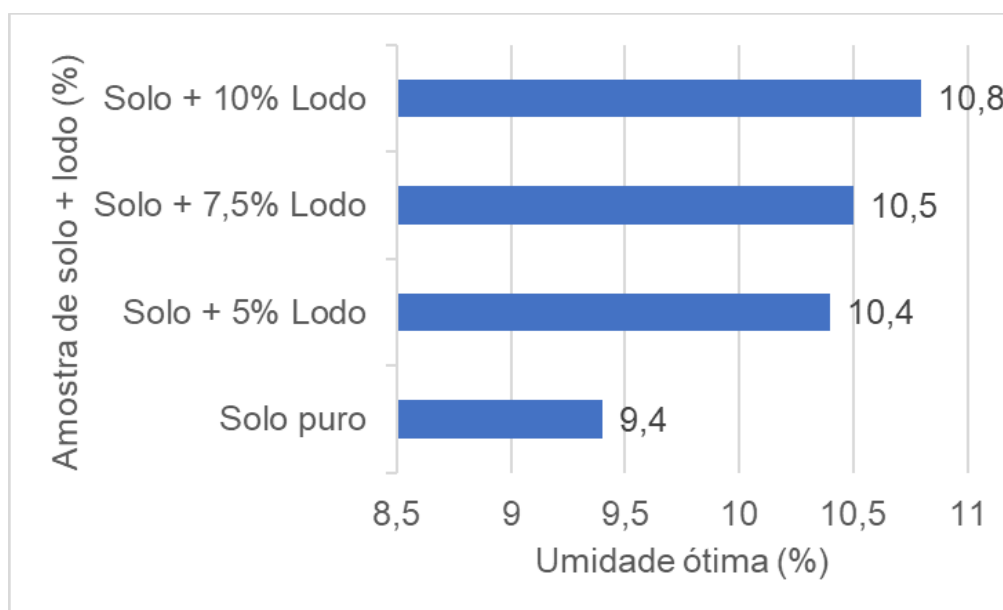
Tabela 15 Parâmetros de compactação

	Umidade Ótima (%)	Densidade Seca Máxima (g/cm ³)
Solo puro	9,4	1,944
Solo + 5%	10,4	1,965
Solo + 7,5%	10,5	1,979
Solo + 10%	10,8	1,909

Fonte: Autor (2025)

A Figura 38 apresenta um gráfico da variação da umidade ótima em função do teor de lodo incorporado.

Figura 38 Variação da Umidade Ótima (%) com o teor de lodo



Fonte: Autor (2025)

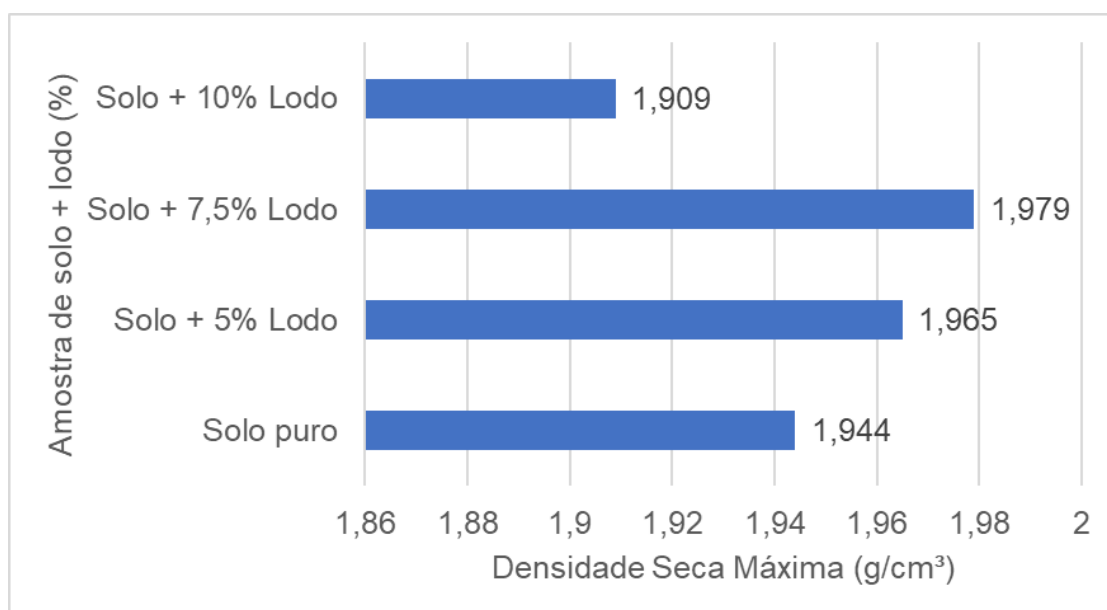
Observa-se um aumento progressivo e consistente da umidade ótima com a adição de lodo, passando de 9,4% no solo puro para 10,8% na mistura com 10% de lodo. Este comportamento é amplamente esperado e corroborado pela literatura. O lodo de ETE, como observado na análise de MEV, é composto por partículas finíssimas e com alto teor de matéria orgânica, o que lhe confere uma elevada área de superfície específica. Materiais com maior área de superfície demandam uma maior quantidade de água para lubrificar as partículas e permitir que elas se

rearranjam em uma estrutura mais densa durante a compactação (Holtz; Kovacs, 1981).

Este resultado está em consonância com diversas pesquisas da nossa revisão. Lucena et al. (2014), ao estabilizarem um solo com lodo de ETE e aditivos, também observaram um aumento no teor de umidade ótimo, atribuindo o fato ao comportamento de floculação-dispersão e à menor massa específica dos aditivos. Da mesma forma, Correia et al. (2019), ao estudarem misturas de lodo de ETE com areia, registraram um aumento significativo na umidade ótima, mesmo com apenas 2,5% de lodo. A tendência, portanto, é um consenso na área: a introdução de um material fino e orgânico como o lodo aumenta a demanda de água da mistura para se atingir a densificação máxima.

O comportamento da massa específica aparente seca máxima, ilustrado na Figura 39, é mais complexo e revelador.

Figura 39 Variação da Densidade Seca Máxima com o teor de lodo



Fonte: Autor (2025)

Observou-se um aumento da densidade seca máxima para os teores de 5% e 7,5% de lodo, atingindo um valor máximo de 1,979 g/cm³ na mistura com 7,5%. Apenas com a adição de 10% de lodo houve uma queda acentuada na densidade, para 1,909 g/cm³, valor inferior ao do solo puro.

Este fenômeno pode ser explicado pela interação entre a granulometria do solo e as partículas do lodo. Conforme discutido anteriormente, o solo J-10 é uma areia

argilosa mal graduada. Nos teores de 5% e 7,5%, as partículas finas do lodo atuaram como um *filler*, preenchendo eficientemente os vazios intergranulares da areia. Este efeito de preenchimento otimizou a graduação da mistura, permitindo um melhor empacotamento das partículas sob a mesma energia de compactação e, conseqüentemente, resultando em um aumento da massa específica seca (Lambe; Whitman, 1979).

A queda abrupta da densidade no teor de 10% de lodo sugere que foi ultrapassado um teor de finos de transição. Neste ponto, observa-se que o volume de lodo incorporado à mistura, na proporção de 10%, passou a ocupar parte significativa dos vazios originalmente existentes entre as partículas de solo. Dessa forma, o comportamento da mistura tende a ser influenciado pela redistribuição interna dos vazios e pela interação entre o lodo e a matriz arenosa, uma vez que o volume de finos adicionados se torna suficiente para preencher parte dos interstícios do solo. Assim, não se pode afirmar que o comportamento do material seja governado pelo lodo, mas sim que o acréscimo deste componente promove uma modificação estrutural no arranjo granular, reduzindo a predominância do contato direto grão-a-grão e alterando a compactabilidade e o comportamento mecânico do conjunto. Como o lodo possui uma massa específica dos sólidos inferior à do solo, a predominância de sua matriz resulta em uma mistura com menor massa específica aparente seca.

A análise mineralógica, obtida por Difração de Raios X (DRX), oferece uma explicação fundamental para o comportamento observado. O aumento progressivo da umidade ótima com a adição de lodo é diretamente justificado pela composição do resíduo. A identificação de Caulinita no lodo de ETE, um argilomineral do grupo 1:1, e a presença de uma expressiva fase amorfa, associada à matéria orgânica, explicam a maior demanda por água. Ambos os componentes possuem uma elevada área de superfície específica e capacidade de adsorção, exigindo uma película de água mais espessa para otimizar a lubrificação entre as partículas durante a compactação (Mitchell; Soga, 2005).

Adicionalmente, a DRX elucida o comportamento não monotônico da massa específica seca máxima. O lodo não é um material homogêneo; ele carrega consigo uma fração de **Quartzo** cristalino, que, nos teores de 5% e 7,5%, atua em sinergia com o efeito de *filler*, contribuindo para o preenchimento dos vazios da areia mal graduada do solo J-10 e para o conseqüente aumento da densidade.

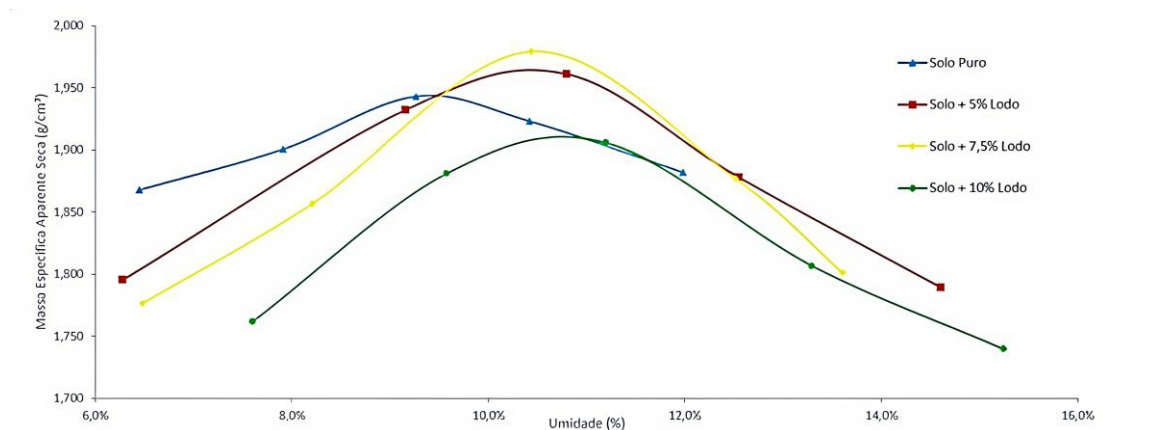
A massa específica seca máxima no teor de 10% é explicada não apenas pela superação do "teor de finos de transição", mas também pela composição do lodo. A **Caulinita** e, principalmente, a **matéria orgânica (fase amorfa)** possuem uma massa específica dos sólidos consideravelmente inferior à do quartzo que domina o solo. Assim, ao se aumentar o teor de lodo, a massa específica média dos sólidos da mistura diminui, o que, por sua vez, leva a uma menor massa específica aparente seca máxima para uma mesma energia de compactação (Das, 2010). Portanto, a DRX revela que o comportamento de compactação é o resultado de uma complexa interação entre o preenchimento físico de vazios e a alteração da composição mineralógica da mistura.

A comparação destes resultados com a literatura é particularmente interessante. A maioria dos estudos que analisados reportou uma diminuição da massa específica seca máxima com a adição de lodo. Güllü e Giriskan (2013), ao misturarem lodo industrial a um solo de grãos finos, observaram uma queda contínua na densidade. Da mesma forma, Boscov et al. (2021) e Nguyen et al. (2023), trabalhando com lodo de ETA, também registraram a mesma tendência de redução da densidade.

A divergência dos resultados da presente pesquisa para os teores de 5% e 7,5% em relação a esses estudos pode ser atribuída à característica fundamental do nosso solo de partida: a sua graduação. Enquanto os solos utilizados em outras pesquisas podem ter sido mais bem graduados, o solo J-10, por ser uniforme, beneficiou-se do efeito de *filler* do lodo em baixos teores. Este mesmo comportamento foi observado por Correia et al. (2019), que, ao adicionarem 2,5% de lodo de ETE a uma areia de fundição, também registraram um aumento na densidade seca máxima, reforçando a hipótese do efeito de preenchimento de vazios em solos granulares.

A análise comparativa das quatro curvas de compactação apresentadas na Figura 40 gráfico permite uma interpretação aprofundada da interação entre o solo J-10 e as diferentes dosagens de lodo de ETE. A curva do solo puro (azul) serve como referência, exibindo uma forma parabólica bem definida e relativamente "fechada", o que indica um material sensível a variações de umidade, com um pico nítido que define claramente os parâmetros ótimos

Figura 40 Gráficos de compactação



Fonte: Autor (2025)

Ao se adicionar 5% e 7,5% de lodo (curvas vermelha e amarela), observa-se um claro deslocamento dos picos para a direita e para cima. O deslocamento para a direita indica o aumento da umidade ótima, enquanto o deslocamento ascendente revela um aumento na massa específica seca máxima, com a curva de 7,5% atingindo o ponto mais alto de todo o gráfico. A forma dessas curvas permanece similar à do solo puro, sugerindo que o mecanismo de compactação ainda é governado pelo esqueleto granular do solo, mas otimizado pelo efeito de fíller das partículas de lodo, que preenchem os vazios da areia mal graduada.

A curva da mistura com 10% de lodo (verde) representa uma mudança fundamental no comportamento do material. Ela está posicionada significativamente abaixo das outras, indicando uma drástica redução na massa específica seca máxima. Além disso, sua forma é visivelmente mais achatada e aberta, o que sugere que a mistura se tornou menos sensível a variações de umidade em torno do ponto ótimo. Este achatamento e a queda na densidade indicam que o "ponto de transição" foi ultrapassado. Neste teor, o volume de finos é tão grande que as partículas de areia começam a "flutuar" na matriz de lodo, perdendo o contato grão-a-grão. O comportamento da mistura passa a ser dominado pela matriz de finos, que é menos densa e menos sensível à energia de compactação, explicando tanto a queda no valor de densidade quanto a forma mais aberta da curva.

Em síntese, os resultados da compactação indicam que existe um teor ótimo de incorporação de lodo, em torno de 7,5%, que maximiza a densidade da mistura ao otimizar sua granulometria. Esta conclusão é um pilar para a análise dos ensaios de resistência que se seguem, pois, a estrutura granular, governada pela densidade e

pelo índice de vazios é um dos principais fatores que determinam a capacidade de suporte de um material de pavimentação (Lambe; Whitman, 1979).

4.8 MINI - CBR

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) é um dos mais importantes para a caracterização de materiais para pavimentação. Ele fornece um índice adimensional que expressa a capacidade de suporte de um solo em relação a um material padrão, sendo um parâmetro empírico fundamental para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Os procedimentos experimentais seguiram rigorosamente as seguintes normas: a moldagem dos corpos de prova foi regida pela NORMA DNIT 228/2023 – ME, enquanto a determinação do índice Mini-CBR e da expansão seguiu a NORMA DNIT 254/2023 – ME. Foram avaliados os corpos de prova moldados nos cinco pontos da curva de compactação para o solo puro e para cada uma das misturas.

A Tabela 16 consolida os resultados mais relevantes: o valor máximo do Mini-CBR para cada mistura, a umidade em que ocorreu, e a expansão correspondente após o período de imersão de quatro dias.

Tabela 16 Resumo dos resultados de Mini-CBR e Expansão

Dosagem	Umidade ótima (%)	Mini-CBR Máximo (%)	Expansão (%)
Solo puro	10,1	13,8	0,35
Solo + 5% Lodo	10,2	14,1	0,37
Solo + 7,5% Lodo	10,6	21,8	0,38
Solo + 10% Lodo	11,2	12,6	0,40

Fonte: Autor (2025)

A análise dos resultados revela dois aspectos de grande importância: o comportamento em relação à expansão e a notável variação da capacidade de suporte com a adição de lodo.

A adição de lodo, embora em pequena magnitude, aumentou progressivamente a expansão do material, de 0,35% no solo puro para 0,40% na mistura com 10% de lodo. Este comportamento é diretamente explicado pela composição mineralógica dos materiais, revelada na análise de DRX. O lodo de ETE introduziu na mistura a Caulinita, um argilomineral, e uma expressiva fase amorfa, associada à matéria orgânica. Ambos os componentes possuem uma elevada área de superfície específica e, conseqüentemente, maior afinidade pela água do que o Quartzo que

domina o solo J-10 (Mitchell; Soga, 2005). Assim, o aumento do teor de lodo levou a uma maior adsorção de água durante a imersão, resultando em um leve aumento no inchamento. Contudo, é crucial notar que todos os valores de expansão permaneceram abaixo do limite de 0,5%, frequentemente especificado para materiais de sub-base de alta qualidade, indicando que a estabilidade da matriz laterítica do solo J-10 foi suficiente para controlar o potencial expansivo dos finos do lodo (Nogami; Villibor, 1995).

A análise do Mini-CBR, por sua vez, revela um comportamento não linear que corrobora e aprofunda as observações do ensaio de compactação. A adição de 5% e 7,5% de lodo promoveu um aumento na capacidade de suporte do solo, que passou de 13,8% para 14,1% e atingiu um pico expressivo de 21,8% com 7,5% de lodo. Este ganho de resistência está diretamente associado ao aumento da massa específica seca máxima observado na compactação. O efeito de *filler* das partículas de lodo, ao preencher os vazios da areia mal graduada, criou uma estrutura mais densa e intertravada, otimizando a transmissão de tensões entre as partículas e, conseqüentemente, aumentando a resistência à penetração do pistão de CBR (Pinto, 2006).

A queda acentuada do CBR para 9,6% na mistura com 10% de lodo é a consequência direta da superação do "teor de finos de transição". Conforme discutido na seção de compactação, neste teor, a estrutura deixa de ser governada pelo contato grão-a-grão da areia e passa a ser dominada pela matriz de finos. A queda na massa específica seca e a redução dos contatos entre as partículas de areia pela matriz de lodo reduzem o atrito interno, que é a principal fonte de resistência em solos granulares, resultando na diminuição da capacidade de suporte (Mitchell; Soga, 2005).

A comparação destes achados com a literatura é elucidativa. Os resultados, que mostram um ganho de resistência com a adição de lodo *sem* estabilizantes químicos, são particularmente interessantes. Lucena et al. (2014), por exemplo, ao estudarem um solo estabilizado com 10% de lodo de ETE, só obtiveram ganhos significativos de CBR após a adição de cal ou cimento. Da mesma forma, Kelm, Motta e Ubaldo (2014) também concluíram que a mistura mais promissora envolvia lodo de ETE e cimento. O fato de termos alcançado um aumento de quase 60% no CBR (de 13,8% para 21,8%) apenas com a adição de 7,5% de lodo destaca o potencial sinérgico entre a granulometria do nosso solo de referência e o resíduo. Este comportamento se

assemelha ao observado por Nguyen et al. (2023), que, ao misturarem 50% de lodo de ETA com um solo argiloso, também registraram um aumento significativo no CBR, atribuído à melhoria na distribuição de tensões proporcionada pela mistura.

Do ponto de vista prático, os valores de CBR obtidos são muito promissores. Segundo as especificações do DNIT (2006), materiais para sub-base de pavimentos flexíveis devem apresentar um CBR mínimo de 20%. A mistura com 7,5% de lodo, com seu CBR de 21,8%, atende a este critério, transformando um solo que seria adequado apenas para subleito (CBR > 6%) em um material apto para uma camada estrutural mais nobre.

Em síntese, os ensaios de CBR e expansão demonstram que não apenas é viável incorporar o lodo de ETE ao solo J-10, como existe um teor ótimo, em torno de 7,5%, que otimiza o comportamento mecânico do material, elevando sua capacidade de suporte a um patamar compatível com o de materiais para sub-base de pavimentos, sem introduzir problemas de instabilidade volumétrica.

4.9 Módulo Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) é o principal método para a caracterização do comportamento de materiais de pavimentação sob a ação repetida das cargas do tráfego. Diferentemente de ensaios estáticos como o CBR, o MR quantifica a rigidez elástica do material em uma faixa de tensões que simula as condições reais de serviço, sendo um parâmetro de entrada essencial para os métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos, como o MeDiNa (Medina; Motta, 2015). Os ensaios triaxiais de cargas repetidas foram realizados seguindo os 18 pares de tensão preconizados pela norma DNIT 134/2018-ME.

Os resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência para o solo puro e para as três misturas com lodo de ETE são consolidados na Tabela 17, que apresenta o valor médio do MR calculado a partir dos 18 ciclos de carregamento para cada mistura, a média foi calculada a partir dos valores obtido atreves da triplicata recomendada pela norma.

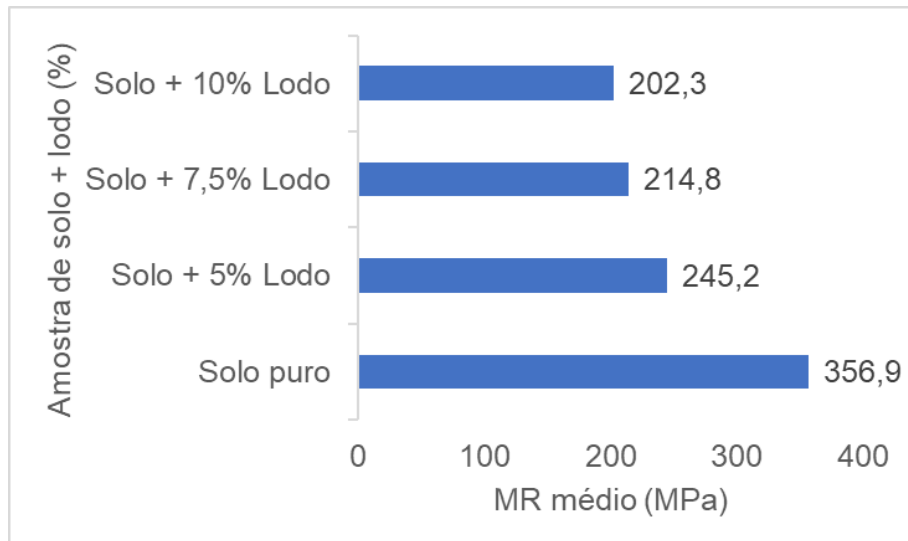
Tabela 17 Resumo dos resultados MR

Dosagem	Módulo de Resiliência Médio (MPa)
Solo puro	356,9
Solo + 5% Lodo	245,2
Solo + 7,5% Lodo	214,8

Solo + 10% Lodo | 202,3
Fonte: Autor (2025)

A Figura 41 ilustra graficamente a variação da rigidez média com o teor de lodo.

Figura 41 MR médio



Fonte: Autor (2025)

A análise dos resultados, revela uma tendência clara e consistente: a adição de lodo de ETE promoveu uma redução progressiva no Módulo de Resiliência médio do material. A rigidez do solo puro, de 356,9 MPa, diminuiu em 31% com a adição de 5% de lodo, 40% com 7,5% de lodo, e atingiu o menor valor, 202,3 MPa (uma redução de 43%), na mistura com 10% de lodo.

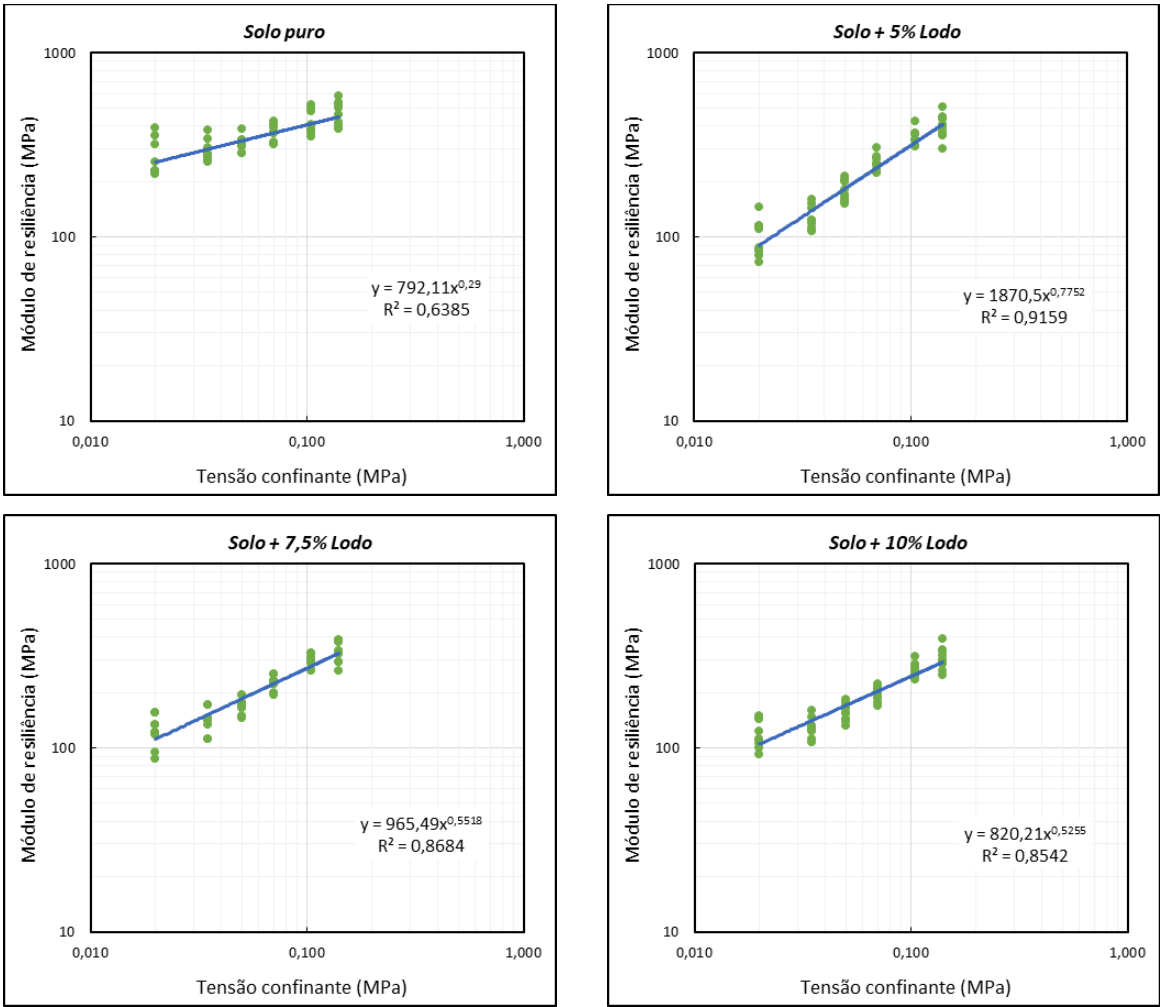
Este comportamento, à primeira vista, parece contraditório aos resultados de CBR, nos quais a mistura com 7,5% de lodo apresentou a maior capacidade de suporte. Esta aparente discrepância, no entanto, é a chave para uma compreensão aprofundada do comportamento do material e reside na diferença fundamental entre os dois ensaios. O ensaio de CBR mede a resistência à ruptura sob grandes deformações plásticas, enquanto o ensaio de MR mede a rigidez sob pequenas deformações elásticas (Huang, 2004). A adição de 7,5% de lodo otimizou o empacotamento granular do solo (maior densidade máxima seca), aumentando o intertravamento e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento mobilizada no ensaio de CBR.

Contudo, as partículas de lodo, por sua natureza orgânica e floculada, são inerentemente menos rígidas e mais deformáveis que os agregados minerais do solo. Sob as pequenas deformações do ensaio de MR, a "maciez" dessas partículas de

lodo domina a resposta da mistura, atuando como "molas" mais flexíveis na matriz do solo e resultando em uma rigidez geral (MR) inferior.

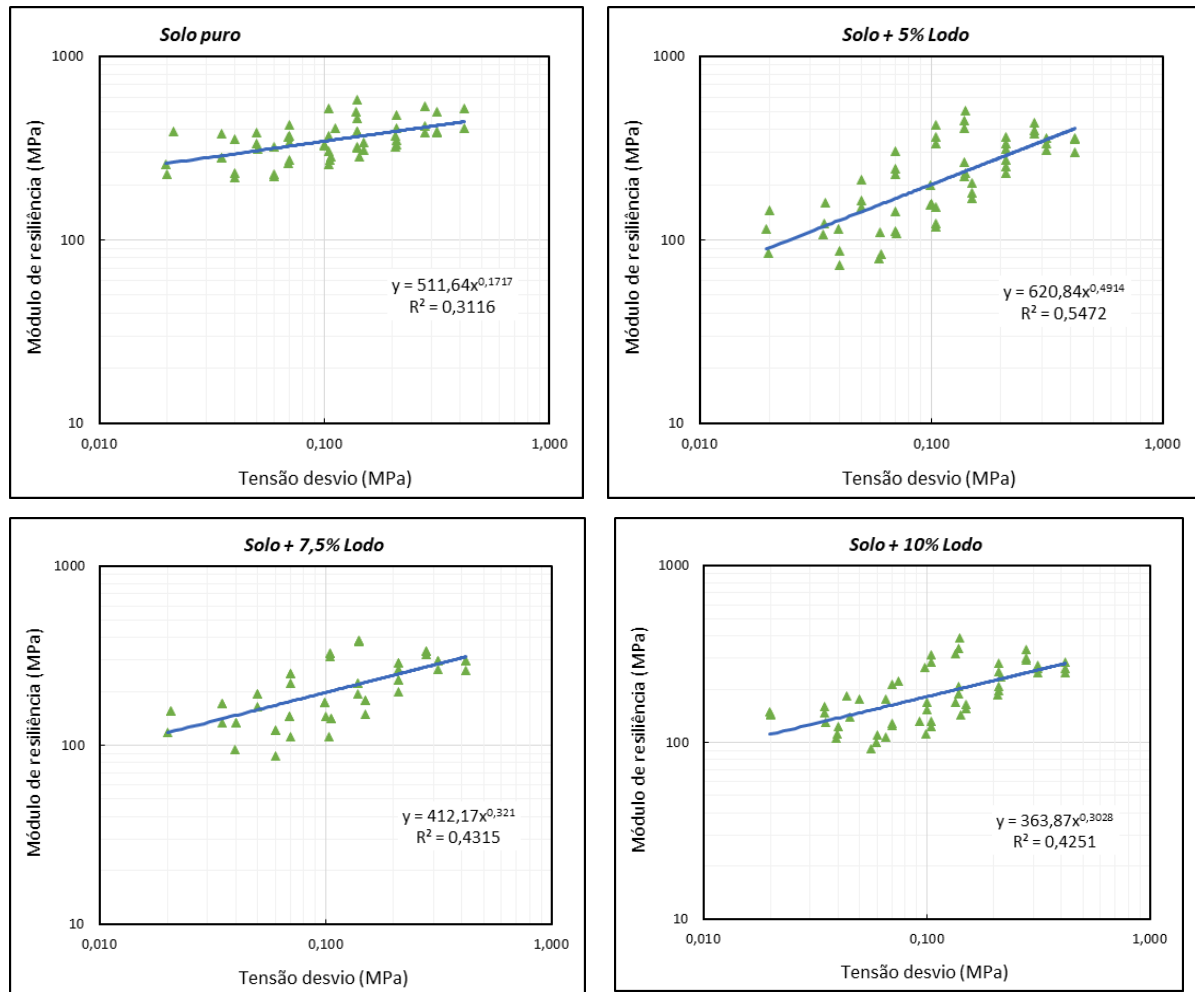
A análise da dependência do MR ao estado de tensões, apresentada nos gráficos das Figura 42 e Figura 43, reforça essa interpretação e revela diferenças importantes sobre a microestrutura das misturas.

Figura 42 MR vs. Tensão Confinante



Fonte: Autor (2025)

Figura 43 MR vs. Tensão Desvio



Fonte: Autor (2025)

Para todos os materiais testados, o Módulo de Resiliência demonstrou ser uma função do estado de tensões, um comportamento não linear típico de materiais de pavimentação não ligados. A análise dos gráficos de correlação mostra que a tensão confinante (σ_3) é a variável que mais influencia a rigidez do solo J-10 e de suas misturas. Observou-se que a adição de lodo tornou o material significativamente mais sensível à tensão confinante. O coeficiente de determinação (R^2) da correlação entre MR e σ_3 saltou de um moderado 0,6385 no solo puro para valores consistentemente acima de 0,85 em todas as misturas com lodo. Isso indica que a presença dos finos do lodo, ao "lubrificar" os contatos entre os agregados do solo, permite um rearranjo mais eficaz da estrutura sob confinamento, resultando em um maior ganho de rigidez com o aumento da pressão lateral.

Este comportamento está em perfeita consonância com estudos clássicos. Hicks e Monismith (1971) constataram que o MR de materiais granulares se eleva

consideravelmente com o aumento da pressão de confinamento, que aumenta o atrito entre os grãos. A adição de finos plásticos, como os do lodo, tende a acentuar essa dependência, pois diminui a rigidez intrínseca do material, mas permite que o confinamento seja mais eficaz em travar a estrutura (Di Tullio, 2015). Por outro lado, a influência da tensão de desvio (σ_d) mostrou-se menos pronunciada, com coeficientes de determinação mais baixos em todos os casos, indicando um comportamento de amolecimento menos significativo, o que é característico de solos granulares com finos coesivos.

A comparação destes achados com a literatura é elucidativa. Lucena et al. (2014), ao estudarem um solo estabilizado com 10% de lodo de ETE, obtiveram valores de MR na faixa de 200 a 400 MPa, porém, apenas com a adição de estabilizantes químicos como cal e cimento. Os ganhos de rigidez em seu estudo são atribuídos às reações cimentícias.

Os resultados dessa pesquisa, por outro lado, isolam o efeito puramente físico da adição do lodo. O valor de 202,3 MPa para a mistura com 10% de lodo, sem aditivos, situa-se no limite inferior da faixa encontrada por eles, o que é coerente, dado que não contamos com o benefício da cimentação química. Este comportamento também se alinha com as conclusões de Kelm, Motta e Ubaldo (2014), que, ao realizarem ensaios de MR, também identificaram a mistura com lodo *in natura* (sem calcinação ou aditivos) como promissora para uso em pavimentos, mesmo que isso implique em uma alteração no comportamento resiliente.

É importante contrastar nossos resultados com estudos que utilizaram outros tipos de resíduos. Nguyen et al. (2023), por exemplo, incluíram o ensaio de MR em seu programa experimental para avaliar misturas de solo com lodo de ETA, reforçando a importância deste parâmetro na análise de materiais alternativos. A diferença fundamental é que, enquanto resíduos cimentícios ou pozolânicos, como cinzas de lodo, tendem a aumentar a rigidez da mistura (Shishehboran et al., 2021), o lodo de ETE *in natura*, por ser um material "macio" e orgânico, atua de forma oposta, reduzindo a rigidez elástica.

Do ponto de vista do dimensionamento mecanístico-empírico, esta constatação é crucial. Se um projetista se baseasse apenas no critério de CBR, a mistura com 7,5% de lodo (CBR $\approx$ 21,8%) seria considerada superior ao solo puro (CBR $\approx$ 13,8%). No entanto, ao utilizar o MR como parâmetro de entrada no MeDiNa, a camada com a

mistura de 7,5% de lodo (MR $\approx$ 215 MPa) exigiria uma espessura maior ou um reforço superior para suportar o mesmo tráfego que a camada de solo puro (MR $\approx$ 357 MPa), a fim de controlar as deformações elásticas e a fadiga do revestimento.

Em síntese, os resultados do Módulo de Resiliência demonstram que, embora a adição de lodo em até 7,5% seja benéfica para a resistência estática (CBR), ela acarreta uma perda de rigidez sob carregamento dinâmico. A mistura com 7,5% de lodo, com um MR médio de 214,8 MPa, ainda apresenta um valor de rigidez considerável, compatível com o de bons materiais para sub-base de pavimentos (Medina; Motta, 2015). A análise que se seguirá, utilizando o modelo composto, nos permitirá caracterizar de forma mais precisa este comportamento não linear para aplicação em projetos de dimensionamento.

Para que os resultados do ensaio de Módulo de Resiliência possam ser efetivamente utilizados em softwares de dimensionamento mecanístico-empírico, é necessário representá-los por meio de um modelo matemático que descreva a variação da rigidez em função do estado de tensões. Dentre os diversos modelos propostos na literatura, optou-se pelo modelo composto, proposto por Macêdo (2006), que relaciona o MR com a tensão confinante (σ_3) e a tensão de desvio (σ_d) por meio da seguinte equação de potência:

$$MR = k_1 \cdot (\sigma_3)^{k_2} \cdot (\sigma_d)^{k_3} \quad (17)$$

Onde k1, k2 e k3 são coeficientes de regressão obtidos a partir dos dados experimentais. Estes parâmetros foram determinados para o solo puro e para cada uma das misturas por meio de regressão não linear. A Tabela 18 consolida os parâmetros obtidos para cada material, e as equações constitutivas resultantes são apresentadas a seguir.

Tabela 18 Parâmetros de regressão do modelo composto

Dosagem	k1	k2	k3	R ²
Solo puro	840,98	0,369	-0,0786	0,97
Solo + 5% Lodo	2075,17	0,8716	-0,0832	0,97
Solo + 7,5% Lodo	1132,4	0,7258	-0,1608	0,97
Solo + 10% Lodo	941,54	0,6816	-0,1393	0,95

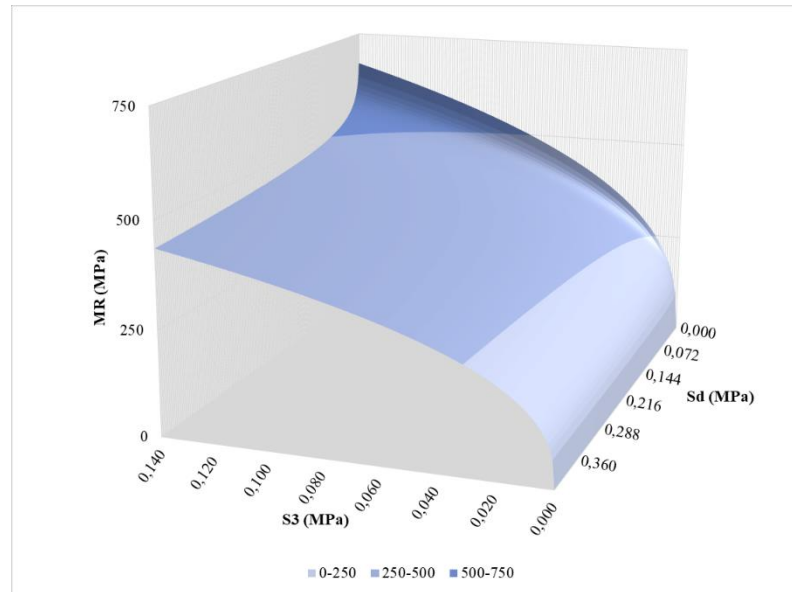
Fonte: Autor (2025)

Para cada material, o modelo composto apresentou um excelente ajuste aos dados experimentais, com coeficientes de determinação (R²) superiores a 0,95, validando sua capacidade de prever o comportamento resiliente. As Figura 44 a Figura

47 apresentam as superfícies de resposta do MR em função das tensões e as equações constitutivas para cada material.

$$\text{Solo Puro: } MR = 840,98 \cdot (\sigma_3)^{0,3690} \cdot (\sigma_d)^{-0,0786}$$

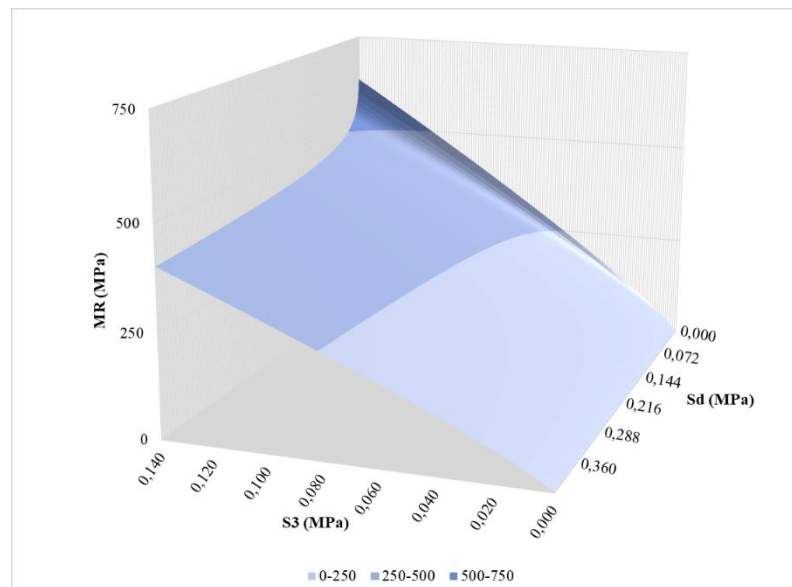
Figura 44 Superfície de resposta solo puro



Fonte: Autor (2025)

$$\text{Solo + 5\% Lodo: } MR = 2075,17 \cdot (\sigma_3)^{0,8716} \cdot (\sigma_d)^{-0,0832}$$

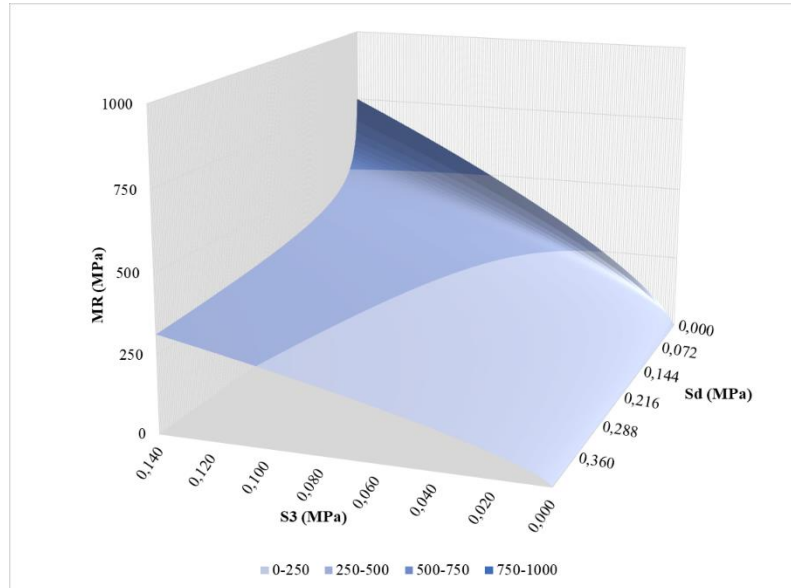
Figura 45 Superfície de resposta solo + 5% lodo



Fonte: Autor (2025)

Solo + 7,5% Lodo: $MR = 1132,40 \cdot (\sigma_3)^{0,7258} \cdot (\sigma_d)^{-0,1608}$

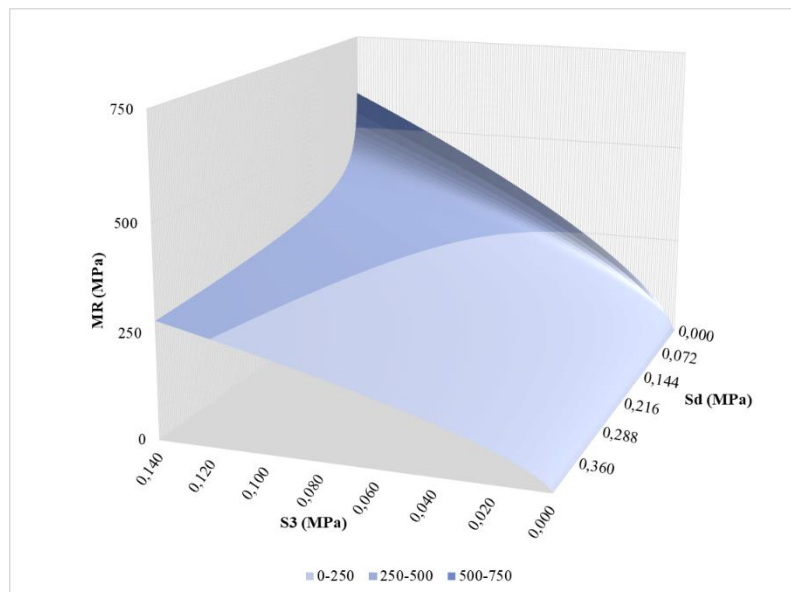
Figura 46 Superfície de resposta solo + 7,5% lodo



Fonte: Autor (2025)

Solo + 10% Lodo: $MR = 941,54 \cdot (\sigma_3)^{0,6816} \cdot (\sigma_d)^{-0,1393}$

Figura 47 Superfície de resposta solo + 10% lodo



Fonte: Autor (2025)

A análise comparativa dos parâmetros de regressão (k_1 , k_2 e k_3) revela de forma quantitativa como a adição de lodo alterou fundamentalmente o comportamento resiliente do solo J-10.

- **Parâmetro k_1 :** Este coeficiente representa a rigidez intrínseca do material. Observa-se um comportamento não monotônico: o k_1 do solo puro (840,98) salta para 2075,17 na mistura com 5% de lodo, e então decresce progressivamente para 1132,40 (7,5%) e 941,54 (10%). O aumento expressivo no teor de 5% sugere que, neste ponto, o efeito de *filler* do lodo otimizou a estrutura granular de tal forma que o modelo matemático captura essa maior eficiência estrutural com um k_1 elevado, que é compensado pelos outros parâmetros. A partir deste ponto, a queda de k_1 confirma que a introdução de mais partículas do lodo reduz a rigidez fundamental da mistura.
- **Parâmetro k_2 :** Este expoente mede a sensibilidade do material ao **enrijecimento por confinamento**. O sinal positivo de k_2 para todos os materiais confirma que a rigidez aumenta com a tensão confinante, um comportamento típico de materiais granulares (Hicks; Monismith, 1971). O valor de k_2 também exibe um pico na mistura com 5% de lodo (0,8716), indicando uma sensibilidade máxima ao confinamento neste teor, antes de decrescer para os teores subsequentes.
- **Parâmetro k_3 :** Este expoente mede a sensibilidade do material ao **amolecimento por cisalhamento** (*stress-softening*). O sinal negativo de k_3 para todos os materiais indica que a rigidez diminui com o aumento da tensão de desvio. A magnitude de k_3 **aumenta significativamente** com a adição de lodo, passando de -0,08 no solo puro para -0,16 na mistura com 7,5%. Isso significa que as misturas com lodo são muito mais suscetíveis à perda de rigidez sob o efeito de tensões de cisalhamento repetidas, o que é coerente com a introdução de uma matriz mais plástica e menos coesa entre os grãos do solo.

Em síntese, a modelagem matemática do comportamento resiliente nos permite concluir que a adição de lodo de ETE ao solo J-10 cria um novo material compósito que é intrinsecamente menos rígido (tendência geral de k_1), com uma sensibilidade complexa ao confinamento (k_2) e mais suscetível ao amolecimento por cisalhamento (k_3 mais negativo). Estas equações constitutivas são a contribuição final desta análise

experimental, permitindo que um projetista de pavimentos utilize estes materiais alternativos em um dimensionamento mecânico-empírico.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo geral analisar a viabilidade técnica, ambiental e econômica da utilização de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) como agente estabilizador em um solo tropical para aplicação em camadas de pavimentos rodoviários. Partiu-se da hipótese de que a incorporação de um resíduo fino e plástico poderia interagir de forma sinérgica com um solo de referência de alta qualidade, otimizando suas propriedades geotécnicas e, ao mesmo tempo, oferecendo uma rota de destinação mais nobre e sustentável para o lodo. A partir de um programa experimental abrangente, foi possível alcançar os objetivos propostos e responder às questões de pesquisa que nortearam este trabalho. As conclusões desta dissertação podem ser sintetizadas nos seguintes pontos:

Desempenho Técnico: A pesquisa revelou um comportamento dual e complexo das misturas solo-lodo. Do ponto de vista da resistência estática, a adição de lodo mostrou-se benéfica até um teor ótimo de 7,5%, no qual a massa específica seca máxima e o Índice de Suporte Califórnia (CBR) atingiram seus valores máximos, de 1,979 g/cm³ e 21,8%, respectivamente. Este ganho de quase 60% na capacidade de suporte em relação ao solo puro (13,8%) é tecnicamente relevante, pois eleva a classificação do material, tornando-o apto para uso em camadas de sub-base de pavimentos (CBR ≥ 20%). Contudo, a análise do comportamento sob carregamento dinâmico, realizada por meio do ensaio de Módulo de Resiliência (MR), revelou uma tendência oposta: a adição de lodo promoveu uma redução progressiva da rigidez. A mistura ótima em termos de CBR (7,5% de lodo) apresentou um MR médio de 214,8 MPa, valor 40% inferior ao do solo puro (356,9 MPa). Essa aparente discrepância é justificada pela natureza distinta dos ensaios: a adição de lodo otimiza o empacotamento granular (aumentando o CBR), mas introduz partículas "macias" e orgânicas que reduzem a rigidez elástica da matriz do solo (diminuindo o MR).

Viabilidade Ambiental: A utilização do lodo de ETE na forma proposta representa uma solução ambientalmente vantajosa em duas frentes. Primeiramente, oferece uma destinação sustentável para um resíduo de grande volume, cuja disposição em aterros sanitários representa um custo crescente e um passivo ambiental. Ao incorporar o lodo em uma matriz de solo para pavimentação, transforma-se um resíduo em um coproduto, alinhando-se perfeitamente aos princípios da economia circular. Em segundo lugar, o estudo demonstrou que todas as misturas apresentaram expansão

nula, um forte indicativo da estabilidade da matriz cimentada do solo laterítico, sugerindo um baixo potencial de instabilidade volumétrica.

Viabilidade Econômica: A solução proposta apresenta um claro potencial econômico. Os custos diretos de disposição do lodo em aterro, somados à logística de transporte, representam uma despesa significativa para as concessionárias de saneamento. A utilização do lodo como material de construção não apenas elimina esse custo, mas também pode gerar economia na outra ponta da cadeia. Ao melhorar as propriedades de um solo local (J-10) e elevá-lo da categoria de material de subleito para a de sub-base (segundo o critério CBR), reduz-se a necessidade de exploração e transporte de agregados de maior custo ou de jazidas mais distantes, otimizando o orçamento de obras rodoviárias.

Portanto, pode-se afirmar que o objetivo geral desta pesquisa foi plenamente alcançado. O estudo demonstrou a viabilidade do uso do lodo de ETE como estabilizador, mas com uma importante ressalva técnica: a viabilidade é condicionada a um dimensionamento que considere adequadamente o comportamento dual do material. A principal contribuição deste trabalho reside na demonstração de que a otimização de um parâmetro (CBR) pode ocorrer em detrimento de outro (MR). A pesquisa quantificou este efeito e forneceu as equações constitutivas do modelo composto para cada mistura, permitindo que o comportamento resiliente não linear seja incorporado em métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos. Assim, demonstrou-se que o lodo pode ser empregado para otimizar solos com deficiências granulométricas, desde que o projeto do pavimento seja ajustado para a nova rigidez do material.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a continuidade desta linha de pesquisa com a realização dos ensaios de Deformação Permanente para as misturas, a fim de completar a caracterização do seu comportamento sob carregamento cíclico. Adicionalmente, recomenda-se a expansão do estudo para outros tipos de solos e lodos, a construção de trechos experimentais para avaliação de campo e, fundamentalmente, a realização de uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) e de um estudo de viabilidade econômica detalhado, para quantificar de forma robusta os ganhos ambientais e financeiros da solução proposta, considerando os ajustes de espessura de camada que a análise do Módulo de Resiliência indicou serem necessários.

REFERÊNCIAS

- AASHTO – **Mechanistic-empirical pavement design guide**. American Association of Highways and Transportation Officials. Washington, D.C., 2002.
- AL NAGEIM, H. et al. **The development of an eco-friendly cold mix asphalt using wastewater sludge ash**. *Journal of Environmental Management*, v. 329, 2023. ISSN 03014797.
- ALI, M. H.; MAHMOOD, K. R.; MUSTAFA, A. S. **Using water treatment sludge to Improve Geotechnical Engineering Properties of Soils: A Review**. *Anbar Journal for Engineering Sciences*, 2023.
- ALMEIDA, M. M.; LAUTENSCHLÄGER, C. E. R.; TONUS, B. P. de A. **Revisão sobre as aplicações geotécnicas de lodo de estação de tratamento de água no Brasil**. *Revista Geociências*, v. 13, n. 2, 2023.
- ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. **Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções**. Curitiba: Sanepar, 2007.
- ANDREOLI, Cleverson Vitorio et al. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa/ABES, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10005:2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Preparação de amostra de solos**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Solo - Determinação da massa específica dos grãos - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: 1984. Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895: Solo - Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) e da expansão.** Rio de Janeiro, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D2487-17: **Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System).** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3282-15: **Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D934-13: **Standard practices for identification of crystalline compounds in water-formed deposits by X-ray diffraction.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.

BABATUNDE, A.; ZHAO, Y. **Constructive approaches toward water treatment works sludge management: An international review of beneficial reuses.** Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 37, n. 2, p. 129-64, 2007.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

BERNUCCI, Liedi Bariani. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para Engenheiro.** Rio de Janeiro: Petrobras, 2008.

BOSCOV, M. E. G.; TSUGAWA, J. K.; MONTALVAN, E. L. T. **Beneficial use of water treatment sludge in geotechnical applications as a sustainable alternative to preserve natural soils.** Sustainability, Switzerland, v. 13, n. 17, 2021. ISSN 20711050.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 3-7, 3 ago. 2010.

CAI, Y. C.; LIU, X. C. **Mechanical properties test of pavement base or subbase made of solid waste stabilized by acetylene sludge and fly ash**. AIP Advances, v. 10, n. 6, p. 11, Jun 2020.

CAMPELO, N. de S.; SILVA, J. F. A. da; ANDRADE, J. B. L. de. **Use of Wastewater Treatment Sludge (WTS) as Filler in Hot-Mixed Asphalt Concrete**. International Journal of Waste Resources, v. 10, n. 2, 2020.

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

CARNEIRO, Alex Pires; BURGOS, Paulo César; ALBERTE, Elaine Pinto Varela. **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, p. 190-227, 2001.

Casagrande A. **Research on the Atterberg limits of soils**. Public Roads. 1932;13:121-36

CIARIÁN, M. E.; LYNN, C. J.; DHIR, R. K. **Environmental impacts of sewage sludge ash in construction: Leaching assessment**. Waste Management, v. 78, p. 863-872, 2018.

COBAN, H. S.; CETIN, B. **Suitability assessment of using lime sludge for subgrade soil stabilization**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 34, n. 3, 2022. ISSN 08991561.

COELHO, Rodrigo Vaz et al. **Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária**. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 10, n. 2, 2015.

CORREIA, N. S. *et al.* **Estudo de misturas de lodo de estação de tratamento de esgoto e areia de fundição para uso em aterros sanitários**. In: SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 15., 2019, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Foz do Iguaçu: ABES, 2019.

DAS, B. M. **Principles of Geotechnical Engineering**. 7. ed. Stamford, CT: Cengage Learning, 2010.

DE ASSIS GOMES, Lídia et al. **Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto e a relação com o meio ambiente.** 2019.

DE SOUZA BUENO, Benedito; VILAR, Orêncio Monje. **Mecânica dos solos.** Oficinas Gráficas da Imprensa Universitária-UFV, 1980.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 080/94: Solo - Granulometria - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 082/94: Solo - Limite de plasticidade - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 122/94: Solo - Limite de liquidez - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 134/2018 – ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.** Brasília, DF: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 228/2023 – ME: Solos – Ensaio de compactação em equipamento miniatura – Método de ensaio.** Brasília, DF: DNIT, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 254/2023 – ME: Solos – Compactação em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão – Método de ensaio.** Brasília, DF: DNIT, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 259/2023 – CLA: Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação.** Brasília, DF: DNIT, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 443/2023 – ME: Pavimentação – Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos – Método de ensaio.** Brasília, DF: DNIT, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134/2018-ME: Pavimentação asfáltica – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 179/2018-IE: Pavimentação – Misturas não ligadas e solos – Ensaio de deformação permanente em carga repetida.** Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

DI TULLIO, P. V. **The Effect of Fines Content on Strength of Granular Materials.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - McMaster University, Hamilton, 2015.

DIAS, G. A. **Estudo para aplicação de lodo de estações de tratamento de água em misturas asfálticas a quente.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

DULAIMI, A. *et al.* **A Sustainable Cold Mix Asphalt Mixture Comprising Paper Sludge Ash and Cement Kiln Dust.** Sustainability, v. 14, n. 1, 102, 2022.

FADANELLI, Lis Eveline Athaydes; WIECHETECK, Giovana Katie. **Estudo da utilização do lodo de estação de tratamento de água em solo cimento para pavimentação rodoviária.** Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 2, n. 2, p. 31-37, 2010.

FERREIRA, G. O. **Abordagem sistêmica do uso de lodo de ETE e ETA em pavimentação.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

IORE, F. A. *et al.* **Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study.** Cleaner Engineering and Technology, v. 7, 100512, 2022.

FORTES, R. M. *et al.* **Avaliação de cinco anos de programa interlaboratorial de misturas asfálticas desenvolvido no Brasil.** 35ª Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

GARCÍA-GALÁN, María Jesús *et al.* **Ecotoxicity evaluation and removal of sulfonamides and their acetylated metabolites during conventional wastewater treatment.** Science of the Total Environment, v. 437, p. 403-412, 2012.

GIL, J. M. L. *et al.* **Análise do aproveitamento do lodo de estações de tratamento de água em pavimentos.** 2019.

GLEICK, P. H. **Water, Drought, Climate Change, and Conflict in Syria**. Weather, Climate, and Society, 7(4), 2015.

GÜLLÜ, H.; FEDAKAR, D. **Investigation of the effective usability of wastewater sludge in the construction of pavement sub-base layer by factorial experimental design and estimation of effect size**. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 20, p. 2419-2430, 2016.

GÜLLÜ, H.; GIRISKEN, S. **Performance of fine-grained soil treated with industrial wastewater sludge**. Environmental Earth Sciences, v. 70, n. 2, p. 777-788, 2013. ISSN 1866-6280.

HASAN, M. *et al.* **Utilization of sludge from water treatment plant as a filler material in pavements**. Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 24, p. 2169-2181, 2022.

HICKS, R. G.; MONISMITH, C. L. **Factors Influencing the Resilient Response of Granular Materials**. *Highway Research Record*, n. 345, p. 15–31, 1971

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1981.

HOLTZ, Robert D.; KOVACS, William D.; SHEAHAN, Thomas C. **An introduction to geotechnical engineering**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-hall, 1981.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2004.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

JANUÁRIO, Gladys Fernandes; FERREIRA FILHO, Sidney Seckler. **Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da Região Metropolitana de São Paulo**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 12, n. 2, p. 117-126, 2007.

JASSIM, S. J. A.; MURALIKRISHNAN, B. **Eco-Friendly Asphalt Approach for the Development of Sustainable Roads**. Journal of Human, Earth, and Future, v. 1, n. 3, p. 98-105, 2020.

KAHVECI, T. E.; ÖZEN, H. **Utilisation of Waste Sludge from Drinking Water Treatment as a Filler Material in Hot Mix Asphalt**. *Materials*, v. 17, n. 7, 1528, 2024.

KAUR, N.; IRSHAD MALIK, M. **Influence of lime sludge on the compaction and strength properties of soil when mixed with RHA & polypropylene fiber**. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, v. 9, n. 8, p. 693-699, 2018. ISSN 09766308.

KELM, T. A.; MOTTA, L. M. G.; UBALDO, M. de O. **Avaliação do uso de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto na estabilização de materiais para pavimentação**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., 2014, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: ABMS, 2014.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics, SI version**. New York: John Wiley & Sons, 1979.

LIMA, H. V. de. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos do bioma Cerrado**. 2007. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

LIN, D.-F. et al. **Enhancing soft subgrade soil with a sewage sludge ash/cement mixture and nano-silicon dioxide**. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, p. 1-11, 2016. ISSN 1866-6280.

LIU, X. et al. **Potential use of drinking water treatment sludge as a substitute for sand in concrete blocks**. *Journal of Cleaner Production*, v. 269, 122343, 2020.

LIU, Y. et al. **Properties and microstructure of concrete blocks incorporating drinking water treatment sludge exposed to early-age carbonation curing**. *Journal of Cleaner Production*, v. 261, p. 121257, 2020. ISSN 0959-6526.

LIU, Y. et al. **Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: Microstructural analysis, durability and leaching properties**. *Journal of Environmental Management*, v. 262, 2020. ISSN 03014797.

LUCENA, L. C. F. L. et al. **Potential uses of Sewage Sludge in highway construction**. *Transportation Research Procedia*, v. 4, p. 1-15, 2014.

LUCENA, L. C. L. *et al.* **Monitoramento de parâmetros físicos e ambientais de camadas de solo estabilizadas com lodo de ETA e de ETE.** Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 10, n. 3, p. 873-890, 2017.

LUCENA, L. C. L. *et al.* **Monitoring physical and environmental parameters of soil layers stabilized with eta and ete sludge.** Revista em Agronegocio e Meio Ambiente, v. 10, n. 3, p. 873-890, 2017. ISSN 19819951.

LUCENA, Leda C. *et al.* **Characterization and evaluation of the potential use of sludge from STP and WTP in Paving.** Engenharia Agrícola, v. 36, p. 166-178, 2016.

LYNN, C. J. *et al.* **Leaching of heavy metals from sewage sludge ash in concrete.** Waste Management, v. 78, p. 853-862, 2018.

LYNN, C. J.; DHIR, R. K.; GHATAORA, G. S. **Environmental impacts of sewage sludge ash in construction: Leaching assessment.** Resources, Conservation and Recycling, v. 136, p. 306-314, 2018. ISSN 09213449.

MACÊDO, M. M. de. **Solos modificados com cimento - efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

Match! - Phase Analysis using Powder Diffraction, Crystal Impact - Dr. H. Putz & Dr. K. Brandenburg GbR, Kreuzherrenstr. 102, 53227 Bonn, Germany, <https://www.crystalimpact.de/match>.

MAZZUTTI, E. A.; KLAMT, R. A.; FARO, V. P. **Soil stabilization with water treatment plant sludge for road paving.** REM, International Engineering Journal, Ouro Preto, v. 77, n. 4, e230118, 2024.

MEDAOUD, S. *et al.* **Characterization of stabilised sewage sludge for reuse in road pavement.** Civil and Environmental Engineering Reports, v. 32, n. 1, p. 201-217, 2022.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MINAYO, Maria Cecília de Souza. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade.** In: **Pesquisa social: teoria, método e criatividade.** 2001. p. 80-80.

Ministério das Cidades. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)**: Painei. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painei>

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. 3. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005.

MONTALVAN, E. L. T. **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

N. J. Van Eck, & L. Waltman, (2010). ***VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping***. *Scientometrics*, 84(2), 523-538.

NGUYEN, M. D. *et al.* **Investigation on the suitability of aluminium-based water treatment sludge as a sustainable soil replacement for road construction**. *Transportation Engineering*, v. 12, 100175, 2023.

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

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1., 1981, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1981. v. 1.

OLINGER, C. II-149 - **Caracterização e clarificação da água de lavagem do filtro de uma ETA que utiliza como coagulante o sulfato de**. 21o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. d, n. 1, p. 1–6, 2001.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos**: em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

POTTER, Sally H. *et al.* **The influence of impact-based severe weather warnings on risk perceptions and intended protective actions**. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 30, p. 34-43, 2018.

PREUSSLER, Ernesto Simões. **Ensaio triaxiais dinâmicos de um solo arenoso**. 1978.

PROCTOR, R. R. **Description of field and laboratory methods.** Engineering News-Record, v. 111, n. 10, p. 286-289, 1933.

RICHTER, C. A. **Resíduos das estações de tratamento de água. Disposição final dos lodos.** Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. São Paulo: Edgar Blucher LTDA, 2001.

SAHINKAYA, E.; YILMAZ, M.; ULUSAY, R.; TOKGÖZ, M. **Engineering properties of sewage sludge and its usability in geotechnical applications.** Environmental Earth Sciences, v. 74, n. 3, p. 2197–2212, 2015.

SAHINKAYA, Erkan et al. **Sulfur-based autotrophic denitrification of drinking water using a membrane bioreactor.** Chemical Engineering Journal, v. 268, p. 180-186, 2015.

SANTANA, L. H. S. *et al.* **Análise comparativa entre a classificação MCT e classificações geotécnicas tradicionais aplicadas a solos residuais brasileiros.** In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA (CONTECC), 2023, Gramado. Anais [...]. Brasília: Confea, 2023.

SANTOS, H.F. dos; TSUTIYA, M. T. **Aproveitamento e disposição final do lodo de estações de tratamento do Estado de São Paulo.** Engenharia sanitária e ambiental, v. 2, n. 2, p. 70-82, 1997.

SEED, Harry Bolton; CHAN, C. K. **Structure and strength characteristics of compacted clays.** Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, v. 85, n. 5, p. 87-128, 1959.

SHALTOUT, A. A. *et al.* **Usage of sewage sludge to produce environment-friendly asphalt mixtures.** HBRC Journal, 2025.

SHISHEHBORAN, M. *et al.* **Environmental and mechanical impacts of waste incinerated acidic sludge ash as filler in hot mix asphalt.** Case Studies in Construction Materials, v. 14, e00504, 2021.

SHULZE, D. G. **An introduction to soil mineralogy.** In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (ed.). **Minerals in soil environments.** 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 1-34.

SILVA, A. M. dos S.; BARBOZA, E. N.; SILVA, M. F. da C. **Uso alternativo de lodo de estação de tratamento de água em pavimentação: uma revisão.** Research, Society and Development, v. 9, n. 7, e786974458, 2020.

SILVA, Alysson Rogerio da. **Gestão dos riscos ocupacionais no manejo do lodo de estações de tratamento de esgotos e a NBR ISO 31000**. 2019. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de pós-graduação em Engenharia Urbana, PPGEU, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, 2019.

SINGH, R. P.; AGRAWAL, M. **Potential benefits and risks of land application of sewage sludge**. *Waste Management*, v. 28, n. 2, p. 347-358, 2008.

SINGH, Rajeev Pratap; AGRAWAL, Manindra. **Potential benefits and risks of land application of sewage sludge**. *Waste management*, v. 28, n. 2, p. 347-358, 2008.

SIQUEIRA, C. E. C. de. **Utilização do lodo proveniente de estação de tratamento de água (ETA) em obras de pavimentação**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2022**. Brasília: SNS/MDR, 2023.

SPECHT, L. P. **Estudo do comportamento resiliente de solos tropicais e sua aplicação em pavimentação**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TAKAO, T. W. *et al.* **Beneficial Use of Water Treatment Sludge with Stabilizers for Application in Road Pavements**. *Sustainability*, v. 16, n. 13, 5333, 2024.

TAKI, K. *et al.* **Enhancement of geotechnical properties of municipal sewage sludge for sustainable utilization as engineering construction material**. *Journal of Cleaner Production*, v. 251, p. 119723, 2020. ISSN 0959-6526.

TAO, J.; WU, S.; SUN, L.; TAN, X.; YU, S.; ZHANG, Z. **Composition of Waste Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plant**. *Procedia Environmental Science*, v. 12, 2012, p. 964–971.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

THEVANAYAGAM, S.; MARTIN, G. R. **Liquefaction in silty soils—screening and remediation issues**. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 22, n. 9-12, p. 1035-1042, 2002.

THEVANAYAGAM, S.; MARTIN, G. R. **Significance of inter-granular contacts on monotonic and cyclic undrained shear response of silty sands.** *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHYSICAL MODELLING IN GEOTECHNICS*, 5., 2002, St. John's. Proceedings [...]. Lisse: A.A. Balkema, 2002. p. 513-518.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, 643p. São Paulo, v. 42, 2006.

TSUTIYA, M. T. **Tratamento de resíduos de estações de tratamento de água.** 2. ed. São Paulo: ABES, 2006.

UNITED NATIONS. **Perspectiva Global Reportagens Humanas.** News UN, ONU, 2024. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2025/08/1850796>

URBAN, R. C. **Metodologia para Gerenciamento lodo de ETA e ETE.** Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil, na área de Saneamento e Ambiente. Campinas-SP, 2016.

UZAN, J. **Characterization of granular material.** Transportation Research Record, n. 1022, p. 52-59, 1985.

VERMA, S.; DHAPEKAR, N. K. **Utilization of Treated Sludge for Sustainable Road Construction: A Review on Geotechnical Performance, Environmental Impacts, and Global Trends.** Educational Administration: Theory and Practice, v. 30, n. 1, p. 7290-7304, 2024.

VERTAMATTI, E. **Contribuição ao Conhecimento Geotécnico de Solos da Amazônia com Base na Investigação de Aeroportos e Metodologias MCT e Resiliente.** Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico da Aeronáutica: São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 1988.

VERTAMATTI, E. **Solos da Amazônia para fins rodoviários.** *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA*, 2., 1988, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: ABMS, 1988.

VITOR FREITAS. **Parsifal.** Available at <https://parsif.al/>. Accessed on: 2023-05-24, 2014. Parsifal is an online tool designed to support researchers to perform systematic literature reviews within the context of Software Engineering.

VON SPERLING, M. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2014. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 6).

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO); UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND (UNICEF). **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2022: special focus on gender**. New York: WHO; UNICEF, 2023