



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BRUNA LUANA BEZERRA DA SILVA

**ANÁLISE LABORATORIAL PARA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLO
ARGILOSO PROVENIENTE DE MOSSORÓ-RN PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

MOSSORÓ

2023

BRUNA LUANA BEZERRA DA SILVA

**ANÁLISE LABORATORIAL PARA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLO
ARGILOSO PROVENIENTE DE MOSSORÓ-RN PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Bruno Tiago Angelo da Silva

.

MOSSORÓ

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

SS586 SILVA, BRUNA LUANA BEZERRA DA.
a ANÁLISE LABORATORIAL PARA ESTABILIZAÇÃO
QUÍMICA DE SOLO ARGILOSO PROVENIENTE DE MOSSORÓ-RN
PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO / BRUNA LUANA BEZERRA
DA SILVA. - 2023.
55 f. : il.

Orientador: BRUNO TIAGO ANGELO DA SILVA.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2023.

1. Solos. 2. Estabilização . 3. Argila. 4.
Cimento. 5. CBR. I. SILVA, BRUNO TIAGO ANGELO DA
, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

BRUNA LUANA BEZERRA DA SILVA

**ANÁLISE LABORATORIAL PARA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLO
ARGILOSO EM MOSSORÓ-RN PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Defendida em: 14/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



BRUNO TIAGO ANGELO DA SILVA

Data: 21/10/2023 15:07:02-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Bruno Tiago Angelo da Silva, Prof. Me. (UFERSA)

Presidente

Documento assinado digitalmente



MARILIA PEREIRA DE OLIVEIRA

Data: 18/10/2023 07:53:43-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marília Pereira de Oliveira, Prof. Dra. (UFERSA)

Membro Examinador

**WENDEL SILVA
CABRAL**

Assinado de forma digital por WENDEL
SILVA CABRAL

Dados: 2023.10.18 11:04:33 -03'00'

Wendel Silva Cabral, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Expresso, em primeiro lugar, a minha gratidão a Deus pela dádiva da vida e pela conclusão desta etapa em minha vida. A minha fé Nele sempre foi depositada, não sendo somente na finalização deste trabalho. O Senhor guiou-me, deu-me orientação e capacitação, tornando possível a concretização deste sonho.

Agradeço também à minha família pelo apoio e incentivo que me concederam, não apenas neste momento, mas ao longo de toda a minha vida acadêmica.

Quero expressar minha profunda gratidão ao meu namorado Anderson, por todo o apoio durante a realização dos experimentos em laboratório, por sempre ter acreditado em mim e ter me dado todo suporte desde o início.

Além disso, agradeço a todos os colaboradores da Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA, em particular àqueles que contribuíram para a minha formação acadêmica. Isso inclui meu orientador, o Prof. Me. Bruno Tiago Angelo da Silva, por ter confiado em mim e orientando-me, possibilitando a conclusão deste projeto.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para tornar este trabalho realidade. A todos, minha sincera gratidão.

É uma disciplina que promove, com visão integrada, o gerenciamento e o compartilhamento de todo o ativo de informação possuído pela empresa. Esta informação pode estar em um banco de dados, documentos, procedimentos, bem como em pessoas, através de suas experiências e habilidades.

Gartner Group

RESUMO

A necessidade de encontrar métodos alternativos para obras de pavimentação é motivada principalmente pela escassez de solos naturais apropriados, agravada por regulamentações ambientais rigorosas que tornam a obtenção de licenças para a exploração dessas reservas desafiadora. Diante da limitação na disponibilidade desses recursos naturais de alta qualidade no estado do Rio Grande do Norte, torna-se imperativo recorrer à estabilização do solo como meio de aprimorar suas características, a fim de garantir que ele tenha propriedades capazes de suportar as cargas de tráfego aplicadas sobre o pavimento. Visando essa necessidade, esta monografia apresenta um estudo abrangente sobre a viabilidade da estabilização de um solo argiloso para seu uso como base de pavimento, por meio da utilização da mistura de solo-cimento. A pesquisa envolveu uma série de ensaios laboratoriais essenciais para determinar os parâmetros geotécnicos relevantes à estabilização do solo. Inicialmente, foram conduzidos ensaios de caracterização do solo, incluindo análises de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, umidade higroscópica e densidade real. Posteriormente, procedeu-se a ensaios de compactação do solo, que serviram como base de comparação com a curva de compactação da mistura solo-aglomerantes. Na segunda fase do estudo, foram preparados corpos de prova em teores específicos de cimento e umidade ótima para cada amostra. Esses corpos de prova foram submetidos a ensaios de expansão e penetração conforme a norma para ser levado em consideração a sua utilização em camadas de pavimentação, obtendo-se o Índice de Suporte Califórnia (ISC) de 94,94% no qual foi caracterizado como pavimento semirrígido que se classifica para utilização em camadas de base destinadas a vias de alto volume de tráfego segundo os critérios estabelecidos pelo DNIT.

Palavras-chave: Solos; estabilização; argila; cimento; CBR.

ABSTRACT

The need to find alternative methods for road construction is primarily driven by the shortage of suitable natural soils, exacerbated by stringent environmental regulations that make obtaining licenses for the exploitation of these reserves challenging. Faced with the limited availability of these high-quality natural resources in the state of Rio Grande do Norte, it becomes imperative to resort to soil stabilization as a means to enhance its characteristics, ensuring that it possesses properties capable of withstanding the traffic loads applied to the pavement. With this need in mind, this thesis presents a comprehensive study on the feasibility of stabilizing clayey soil for use as a pavement base, using a soil-cement mixture. The research involved a series of essential laboratory tests to determine the geotechnical parameters relevant to soil stabilization. Initially, soil characterization tests were conducted, including particle size analysis, liquid limit, plastic limit, hygroscopic moisture content, and real density. Subsequently, soil compaction tests were carried out, serving as a basis for comparison with the compaction curve of the soil-aggregate mixture. In the second phase of the study, test specimens were prepared at specific cement content and optimum moisture content for each sample. These test specimens were subjected to expansion and penetration tests in accordance with the standard to assess their suitability for use in pavement layers, resulting in a California Bearing Ratio (CBR) of 94.94%. This was characterized as a semi-rigid pavement suitable for use in base layers intended for high-traffic volume roads according to the criteria established by DNIT."

Keywords: Soils; stabilization; clay; cement; CBR (California Bearing Ratio).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Estrutura granular simples	18
Figura 2	– Estrutura alveolar ou em favo de abelha	19
Figura 3	– Estrutura floculada	19
Figura 4	– Estrutura em esqueleto	20
Figura 5	– Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez.	21
Figura 6	– Classificação dos solos segundo TRB.....	24
Figura 7	– Vista superior do local de coleta do solo argiloso para análise.....	28
Figura 8	– Localização do solo por trás do laboratório de química/física e matemática...29	
Figura 9	– Representação esquemática da metodologia.....	30
Figura 10	– Fluxograma sobre o preparo de amostra de solos para os ensaios de caracterização.....	31
Figura 11	– Preparo de amostras de solos para ensaios de caracterização.....	32
Figura 12	– Amostras sendo resfriadas no dessecador.....	34
Figura 13	– Preparação do ensaio de densidade real.....	35
Figura 14	– Molde do solo com 3cm de diâmetro.....	36
Figura 15	– Ensaio de sedimentação e peneiramento.....	38
Figura 16	– Ensaio de compactação.....	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Curva de fluidez.....	38
Gráfico 2	–	Curva granulométrica.....	41
Gráfico 3	–	Curva de compactação do solo natural	43
Gráfico 4	–	Curva de compactação do solo-cimento.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Classificação do solo segundo o índice de plasticidade	21
Tabela 2	–	Valores obtidos no ensaio de umidade higroscópica.....	36
Tabela 3	–	Valores obtidos no ensaio de densidade real.....	37
Tabela 4	–	Valores obtidos no ensaio de determinação do limite de liquidez.....	38
Tabela 5	–	Valores obtidos no ensaio de determinação do limite de plasticidade.....	38
Tabela 6	–	Resultado do Índice de plasticidade.....	38
Tabela 7	–	Resumo granulometria.....	39
Tabela 8	–	Resultado por peneiramento da amostra total.....	39
Tabela 9	–	Resultado da análise granulométrica por sedimentação.....	40
Tabela 10	–	Peneiramento parcial da sedimentação.....	40
Tabela 11	–	Levantamento dos pontos no ensaio de compactação do solo natural.....	42
Tabela 12	–	Resultados obtidos do ensaio de compactação solo natural.....	42
Tabela 13	–	Resumo do ensaio de compactação solo natural.....	43
Tabela 14	–	Resultados obtidos do ensaio de compactação solo-cimento.....	43
Tabela 15	–	Resultados obtidos no ensaio de compactação solo-cimento.....	44
Tabela 16	–	Resumo do ensaio compactação solo-cimento.....	44
Tabela 17	–	Resultado do ensaio de CBR solo-natural.....	45
Tabela 18	–	Ensaio de penetração do solo-natural.....	46
Tabela 19	–	Penetração do solo-natural corrigida.....	46
Tabela 20	–	Resumo do ensaio de CBR solo-cimento.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Bel	Bacharel
Dr	Doutor
Me	Mestre
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
ISC	Índice de Suporte Califórnia

LISTA DE SÍMBOLOS

@	Arroba
©	Copyright
®	Marca registrada
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivos.....	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
1.2	Estrutura do trabalho.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Solos.....	18
2.1.1	Estruturas dos solos.....	18
2.1.1.1	Solos não-coesivos.....	18
2.1.1.2	Solos coesivos.....	19
2.1.2	Ensaio para caracterização dos solos.....	20
2.1.2.1	Limite de liquidez (LL).....	20
2.1.2.2	Limite de plasticidade (LP).....	21
2.1.2.3	Índice de plasticidade (IP).....	21
2.1.2.4	Granulometria.....	22
2.1.3	Compactação dos solos.....	22
2.1.4	Índice de Suporte Califórnia (CBR).....	23
2.1.5	Classificação dos solos.....	23
2.1.5.1	Sistema de classificação HRB/TRB.....	23
2.2	Pavimentos.....	24
2.2.1	Classificação dos pavimentos.....	24
2.3	Estabilização de solos para pavimentação.....	25
2.3.1	Estabilização química.....	25
2.3.1.1	Cimento Portland.....	26
2.3.1.1.1	Fatores influentes na mistura solo-cimento.....	26
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	Materiais.....	28
3.2	Métodos.....	29
3.2.1	Preparação de amostras para ensaios de caracterização.....	30
3.2.2	Umidade higroscópica.....	32
3.2.3	Densidade real	33

3.2.4	Limite de liquidez.....	34
3.2.5	Limite de plasticidade.....	35
3.2.6	Análise granulométrica.....	35
3.2.6.1	Peneiramento	35
3.2.6.2	Sedimentação.....	36
3.2.7	Ensaio técnico para fins de pavimentação	37
3.2.7.1	Compactação utilizando amostras não trabalhadas.....	37
3.2.7.2	Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1	Caracterização dos solos.....	40
4.1.1	Umidade higroscópica.....	40
4.1.2	Densidade real.....	40
4.1.3	Limite de liquidez.....	41
4.1.4	Limite de plasticidade.....	42
4.1.5	Análise granulométrica.....	42
4.2	Resultado dos Ensaio de Compactação.....	41
4.2.1	Solo natural.....	41
4.2.2	Solo-cimento.....	43
4.3	Resultado dos Ensaio de Índice de Suporte Califórnia.....	49
4.3.1	Solo natural.....	49
4.3.2	Solo-cimento.....	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
5.1	Conclusões.....	52
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	52
6	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A estabilização química de solos argilosos representa um tópico de alta relevância, tanto do ponto de vista teórico quanto prático, especialmente no contexto das obras de pavimentação da região oeste potiguar, nas proximidades do município de Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte. Essa região é conhecida por sua predominância de solos argilosos, o que exige uma abordagem meticulosa para assegurar a estabilidade e a durabilidade das vias pavimentadas.

A busca e utilização de materiais alternativos em obras de pavimentação são impulsionadas principalmente pela escassez de solos naturais adequados, que não atendem às especificações técnicas para pavimentação, juntamente com regulamentações ambientais rigorosas que dificultam a obtenção de licenças para a exploração dessas jazidas (Batalione, 2007).

Paralelo a limitação e indisponibilidade destes recursos naturais no estado do Rio Grande do Norte, se faz necessário a estabilização e reforço de solos para que possamos alcançar melhores características, de modo que tenhamos resistências capazes de suportar as cargas do tráfego aplicadas sobre o pavimento (Batalione, 2007).

A estabilização química por meio da adição de cimento oferece diversas vantagens práticas, tais como o aumento da resistência do solo, a redução das variações de volume causadas por mudanças na umidade, e o incremento da capacidade de suporte dos pavimentos, entre outros benefícios.

Em conjunto a necessidade da estabilização do solo temos as pesquisas e as análises laboratoriais, que desempenham um papel crucial na compreensão das propriedades físicas e mecânicas dos solos disponíveis na região e na definição das melhores estratégias para alcançar a estabilidade necessária. Do ponto de vista teórico, esse estudo contribui para o avanço do conhecimento científico nas engenharias geotécnicas, proporcionando uma compreensão mais profunda das características físicas e químicas dos solos argilosos, bem como dos impactos resultantes da incorporação de aditivos químicos. Esses estudos permitem o aprimoramento das técnicas de estabilização e o desenvolvimento de pavimentos mais eficientes e sustentáveis.

Portanto, através da dificuldade que encontramos atualmente em encontrarmos um solo com as características desejáveis para fins de pavimentação, essa pesquisa tem como objetivo estudar um solo disponível em jazida localizada em Mossoró, no Rio Grande do Norte, bem como avaliar a combinação eficaz para estabilização química de solo, não somente considerando a qualidade técnica, mas também avaliando a sua aplicabilidade em camadas de base para projetos de pavimentação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este estudo tem como propósito avaliar a eficácia da combinação de cimento Portland na estabilização química de um solo argiloso proveniente de Mossoró, Rio Grande do Norte, visando atender aos critérios estabelecidos pelo DNIT para sua aplicação na construção de pavimentos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar uma pesquisa de campo no solo argiloso obtido da jazida localizada na UFERSA, campus Mossoró – RN;
- Conduzir ensaios de caracterização do solo natural, compactação e CBR para compreender suas propriedades;
- Avaliar a proporção de solo-cimento necessária para estabilizar o solo de acordo com os requisitos estabelecidos pelo DNIT;
- Efetuar ensaios de compactação e CBR no solo estabilizado para determinar sua adequação em projetos de pavimentação.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No Capítulo 1, a Introdução fornece uma breve visão do tópico, além de expor a justificativa e os objetivos do estudo.

O Capítulo 2, denominado Referencial Teórico, oferece uma explanação de conceitos essenciais que auxiliam na compreensão do trabalho.

No Capítulo 3, intitulado Metodologia, são apresentadas as etapas relacionadas à classificação do estudo, à caracterização do solo, à realização dos ensaios para uma compreensão mais aprofundada do solo e à aplicação dos métodos escolhidos.

Os Resultados e Discussões são abordados no Capítulo 4, no qual são analisados os dados obtidos por meio dos ensaios realizados em laboratório. Além disso, são discutidas sugestões para o reforço do solo por meio de sua estabilização química com a adição de cimento Portland.

Finalmente, no Capítulo 5, intitulado Considerações Finais, são apresentadas as conclusões derivadas do estudo realizado, bem como são sugeridas novas análises e pesquisas para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Solos

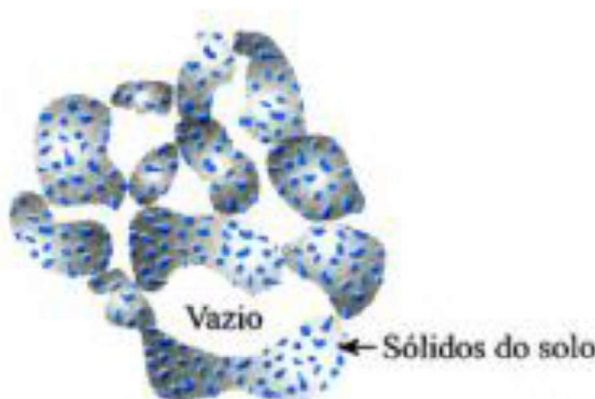
2.1.1 Estruturas do solo

Das (2016) aborda o solo como a organização ou arranjo espacial de suas partículas, enfatizando que a estrutura do solo é influenciada por diversos fatores, tais como as características do formato e tamanho das partículas, a composição mineralógica do solo e as propriedades inerentes à água presente no solo. O autor também destaca a divisão do solo em duas classificações: solos não-coesivos e solos coesivos.

2.1.1.1 Solos não-coesivos

Das (2016) classifica os solos não-coesivos em duas categorias principais: granular simples (ou de grãos isolados) e em favos (ou alveolares). Na estrutura granular simples (Figura 1), característica de solos como areias e pedregulhos, as forças predominantes que determinam a organização das partículas são as forças gravitacionais. Nesse tipo de estrutura, as partículas se apoiam diretamente umas sobre as outras. A disposição dessas partículas, seja mais compacta ou mais frouxa, influencia a densidade do solo, determinando o grau de compactação (Ortigão, 2007).

Figura 1 – Estrutura granular simples.

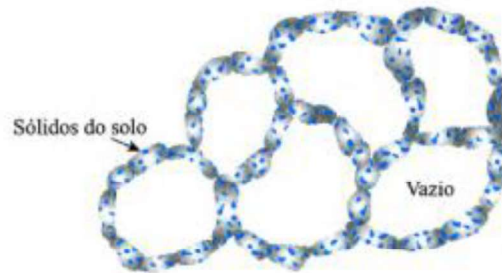


Fonte: Das (2016).

Por outro lado, a estrutura alveolar (Figura 2) é mais comumente encontrada em solos siltosos finos e, ocasionalmente, em alguns tipos de areias. Nessa configuração, as partículas do solo se organizam formando pequenos arcos, resultando em um maior volume de vazios entre as partículas. Essa característica assume importância considerável quando o solo está sujeito a

cargas mais pesadas, uma vez que a estrutura alveolar se torna mais vulnerável a rupturas, o que, por sua vez, pode resultar em recalques do solo (Ortigão, 2007).

Figura 2 – Estrutura alveolar ou em favo de abelha

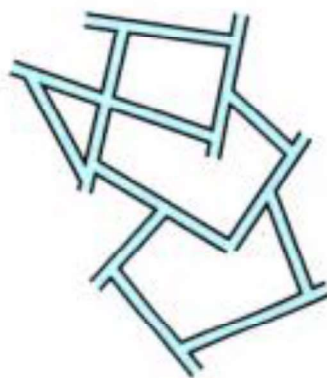


Fonte: Das (2016).

2.1.1.2 Solos coesivos

Os solos coesivos são categorizados em duas principais estruturas: floculenta e estrutura esquelética (Caputo, 1988). A estrutura floculenta é característica de solos com partículas de pequeno tamanho. Quando essas partículas se sedimentam, elas se organizam em arcos, formando, por sua vez, outros arcos (conforme ilustrado na Figura 3). Essa configuração desempenha um papel fundamental nas interações elétricas que ocorrem entre as partículas do solo e é influenciada pela natureza dos íons presentes no meio durante o processo de sedimentação (Caputo, 1988).

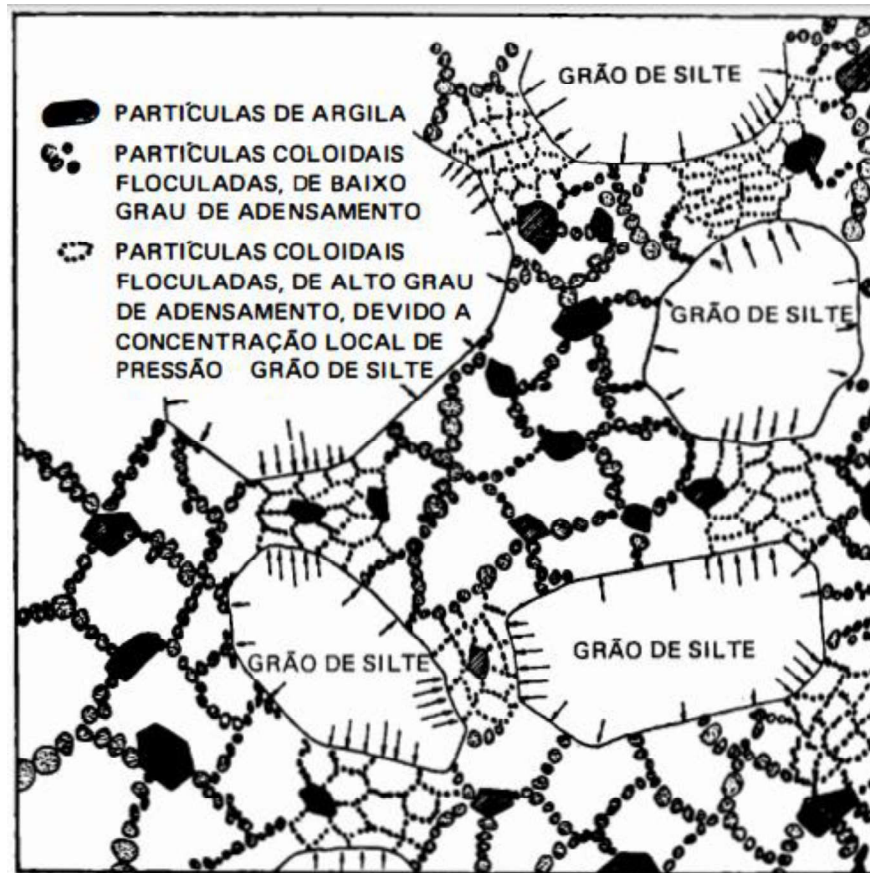
Figura 3 – Estrutura floculada



Fonte: Das (2016).

A estrutura em esqueleto (Figura 4) é observada em solos que contêm tanto grãos finos quanto grossos. Nesse tipo de estrutura, os grãos se organizam de maneira a formar um esqueleto tridimensional, e os espaços vazios entre esses grãos são parcialmente preenchidos por uma matriz de partículas mais finas. Essa configuração proporciona uma organização única que afeta as propriedades e o comportamento do solo.

Figura 4 – Estrutura em esqueleto.



Fonte: Caputo (1988).

2.1.2 Ensaio para caracterização dos solos

No século XX, o cientista sueco Albert Atterberg desenvolveu um método fundamental para descrever a consistência de solos granulares finos em diferentes níveis de umidade. Esse método possibilitou a classificação do comportamento do solo em quatro estados distintos: sólido, semissólido, plástico e líquido, com base no teor de umidade presente no solo (Das, 2016).

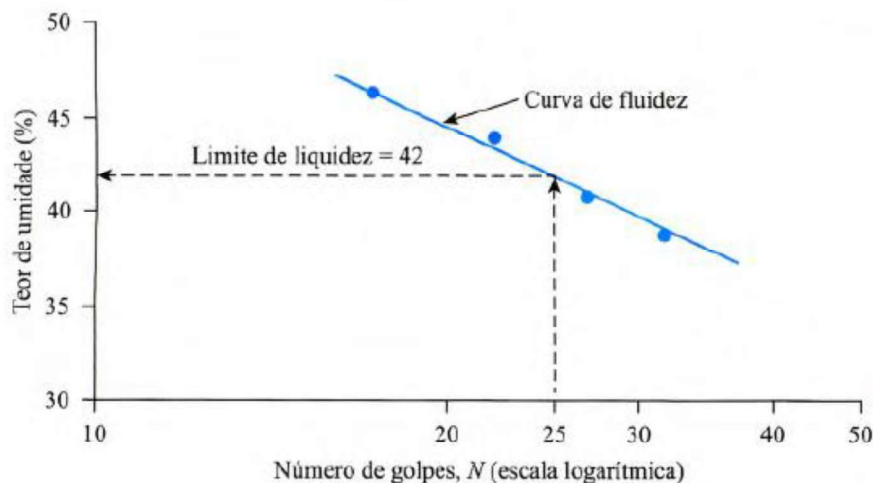
O ponto em que ocorre a transição do estado sólido para o semissólido é denominado de limite de contração. Quando o solo faz a transição do estado semissólido para o estado plástico, alcançamos o limite de plasticidade. Por fim, a mudança do estado plástico para o líquido é identificada pelo limite de liquidez. Esses limites são critérios cruciais para a caracterização das propriedades do solo e desempenham um papel fundamental em estudos geotécnicos e de engenharia civil (Das, 2016).

2.1.2.1 Limite de liquidez

De acordo com a norma DNER-ME 122/94, que trata da determinação do limite de liquidez de solos, o limite de liquidez é definido como o teor de umidade do solo no qual as bordas inferiores de uma canaleta feita em uma massa de solo, colocada na concha do aparelho de Casagrande e submetida a 25 impactos, se unem ao longo de um centímetro de comprimento. Esse ponto marca a transição do estado plástico para o estado líquido do solo, sendo uma característica fundamental para a classificação e análise das propriedades do solo.

O resultado é obtido graficamente por meio da curva de fluidez, na qual o teor de umidade é representado no eixo das abscissas e o número de impactos, em termos percentuais, no eixo das ordenadas (ver Figura 5) (Das, 2016).

Figura 5 – curva de fluidez para determinação do limite de liquidez.



Fonte: Das (2016).

2.1.2.2 Limite de plasticidade (LP)

Conforme Das (2016), o limite de plasticidade é estabelecido com base no teor de umidade percentual no qual o solo entra em colapso quando são moldados fios com diâmetro de 3,0mm. O resultado desse processo é situado no limite inferior do intervalo plástico do solo.

2.1.2.3 Índice de plasticidade (IP)

Segundo Caputo (1988), o índice de plasticidade é calculado como a diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade, o que proporciona a determinação da faixa na qual o solo se encontra no estado plástico. Portanto, quanto maior o valor do índice de plasticidade, mais

plástico é o solo. Burmister (1949, citado por Das, 2016) classificou o índice de plasticidade de acordo com o quadro apresentado a seguir:

Tabela 1 – Classificação do solo segundo o índice de plasticidade

Índice de plasticidade (IP)	Classificação
0	Não plástico
1 - 5	Ligeiramente plástico
5- 10	Plasticamente baixa
10 - 20	Plasticamente média
20 - 40	Plasticamente alta
>40	Plasticamente muito alta

Fonte: adaptação Burmister (1949).

2.1.2.4 Granulometria

Na sua obra de 1988, Caputo descreve a análise granulométrica como o processo de determinação das dimensões das partículas do solo e suas proporções relativas. Esse conceito é ilustrado por meio da curva granulométrica, onde as dimensões das partículas são representadas no eixo das abscissas e suas porcentagens de material que passa no eixo das ordenadas. Essa representação gráfica permite identificar diferentes tipos de granulometria, incluindo granulometria descontínua, uniforme e bem graduada.

Caputo (1988) também destaca que a análise granulométrica é realizada de forma diferente dependendo das dimensões das partículas do solo. Para solos com partículas maiores do que 0,074mm, é utilizado o método de peneiramento. Por outro lado, para solos finos com dimensões menores que 0,074mm, é empregado o método de sedimentação contínua em meio líquido. Esse método de sedimentação é baseado na lei de Stokes, que estabelece a relação entre o diâmetro da partícula, a velocidade de sedimentação e as características do meio líquido, como viscosidade e peso específico, que são conhecidas (Caputo, 1988).

2.1.3 Compactação dos solos

Segundo Caputo (2016), entende-se por compactação de um solo o processo manual ou mecânico que visa reduzir o volume de seus vazios, em consequência disso aumenta-se sua resistência. O processo de compactação de um solo visa melhorar suas características nos aspectos de permeabilidade, compressibilidade e absorção de água.

2.1.4 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Na virada da década de 1940, o cenário técnico da engenharia geotécnica no Brasil testemunhou a introdução do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou (CBR). Esse ensaio desempenhou um papel significativo na superação das limitações associadas ao uso dos índices tradicionais na seleção de solos para aplicações em obras de pavimentação.

De acordo com Batalione (2007), ensaio CBR é definido como a relação entre a carga aplicada por um pistão padrão sobre um solo e a carga correspondente a um material padrão, expressa como um valor percentual. A concepção desse ensaio remonta ao final da década de 1930, sendo creditada a O.J. Porter, diretor da Divisão de Materiais do Departamento de Rodovias da Califórnia.

2.1.5 Classificação dos solos

2.1.5.1 Sistema de classificação HRB/TRB

Na área de pavimentação, o sistema de classificação de solos conhecido como Highway Research Board (HRB), aprovado em 1945 e aprimorado a partir do sistema anterior proposto pela Public Roads Administration em 1929, é amplamente adotado (DNIT, 2006). O sistema HRB considera vários parâmetros, incluindo granulometria, limite de liquidez, índice de liquidez e índice de grupo. Essa classificação está intimamente relacionada ao método de dimensionamento de pavimentos com base no índice de grupo, agrupando os solos em categorias e subcategorias com base em suas características granulométricas, limites de consistência e índice de grupo (DNIT, 2006).

A classificação dos solos de acordo com o TRB (Transportation Research Board) é determinada por meio de um processo de eliminação, seguindo a ordem da esquerda para a direita no quadro de classificação. O grupo de solo que corresponder aos valores obtidos nos ensaios será considerado a classificação correta. Esse método possibilita a identificação precisa da categoria de solo com base nas características específicas do material analisado (Figura 6).

Figura 6 – Classificação dos solos segundo TRB.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidade	6 máx.	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	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: Manual de pavimentação – DNIT. 2023

2.2 Pavimentos

Dentro do contexto da pavimentação rodoviária, o pavimento se refere à camada superior composta por múltiplas camadas de espessura específica, que repousa sobre o subleito, o qual é o estrato de solo subjacente, teoricamente, de extensão infinita. A avaliação do subleito deve se estender até a profundidade em que as cargas do tráfego começam a exercer um impacto significativo (DNIT, 2006).

Na prática, a profundidade crítica para avaliação geralmente varia entre 0,60 e 1,50 metros. O pavimento consiste em uma estrutura estratificada composta por materiais com diferentes níveis de resistência e deformabilidade. Isso introduz uma considerável complexidade no cálculo das tensões e deformações induzidas pelas cargas do tráfego (DNIT, 2006).

2.3.1 Classificação dos pavimentos

Conforme enfatizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), os pavimentos são geralmente categorizados em três tipos principais: flexíveis, semirrígidos e rígidos.

Os pavimentos flexíveis se caracterizam pelo fato de que todas as camadas sofrem uma deformação elástica considerável quando submetidas à carga aplicada, resultando em uma distribuição aproximadamente equitativa da carga entre as camadas. Exemplos típicos incluem pavimentos compostos por uma base de brita (como brita graduada ou macadame) ou uma base de solo com pedregulhos, revestidos com uma camada asfáltica.

Por outro lado, os pavimentos semirrígidos apresentam uma base cimentada com propriedades aglutinantes cimentícias. Um exemplo comum é aquele que incorpora uma camada de solo-cimento revestida com uma camada asfáltica.

Por fim, os pavimentos rígidos são caracterizados pelo revestimento com alta rigidez em comparação com as camadas inferiores, absorvendo praticamente todas as tensões geradas pelo carregamento aplicado. Um exemplo típico é constituído por lajes de concreto de cimento Portland (DNIT, 2006).

2.3 Estabilização de solos para pavimentação

2.3.1 Estabilização química

Conforme França (2003), a estabilização química de um solo envolve a alteração de sua estrutura por meio da incorporação de uma quantidade específica de aditivo. Essa ação tem como objetivo a melhoria das propriedades físicas e mecânicas do solo, de modo a torná-lo adequado para aplicações em projetos. A literatura disponível aborda uma ampla gama de aditivos químicos que podem ser utilizados como agentes estabilizadores de solo, englobando tanto produtos manufaturados quanto subprodutos ou resíduos industriais.

Segundo Lima (2020), onde realizou a estabilização de um solo argiloso através de cimento, obteve os seguintes resultados: para 20% de cimento adicionado a mistura, o CBR foi de 20,85%; para 40% adicionado a mistura, o CBR foi de 40,93%; para 50% de cimento adicionado a mistura, o CBR foi de 48,69%; para 60% de cimento adicionado, CBR foi de 52,68%; e para 80% de cimento adicionado a mistura, CBR foi de 113,43%.

Já para Caneppele, 2016, para um teor de cimento de 3% foram obtidos uma umidade ótima de 37,4%; para 5% de cimento, obteve-se uma umidade ótima de 35,1%; para 7% de cimento, obteve-se umidade ótima do solo de 36,3%.

2.3.1.1 Cimento Portland

O cimento é uma substância em pó reconhecida por suas notáveis propriedades aglomerantes, aglutinantes e ligantes, que se solidifica ao entrar em contato com a água. Quando transformado em concreto, adquire a forma de uma substância artificial que pode ser moldada de acordo com as especificações de cada projeto. Devido a essa versatilidade, o concreto se destaca como o segundo material mais utilizado pela humanidade, sendo superado apenas pela água, graças às suas propriedades singulares (ABCP, 2023).

De acordo com informações da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2023), o mercado brasileiro oferece uma diversidade de oito tipos de cimento, cada um deles adequado para diferentes tipos de projetos e construções.

O cimento Portland comum (CP I) é considerado como um ponto de referência devido às suas características e propriedades, servindo como base para os outros tipos fundamentais de cimento Portland. As distinções entre esses tipos estão, principalmente, relacionadas à proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, bem como às adições (como escórias, pozolanas e material carbonático) que são incorporadas durante o processo de moagem. Nesse contexto, o material carbonático é frequentemente conhecido na indústria como filer calcário.

Além das diferenças na composição, esses tipos de cimento podem apresentar variações em propriedades específicas, como alta resistência inicial ou coloração, por exemplo. É importante notar que mesmo o Cimento Portland Comum (CP I) pode conter adições, variando de 1% a 5% de material pozolânico, escória ou carbonato de cálcio, com o restante composto de clínquer. Por outro lado, o CPI-S pode conter de 6% a 10% de material carbonático.

Outras opções incluem o Cimento Portland Composto (CP II-E, CP II-Z e CP II-F), que possuem adições de escória, pozolana e filer, respectivamente, em proporções um pouco maiores do que os CPs I e I-S.

Por fim, o Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) e o Cimento Portland Pozolânico (CP IV) se destacam por conter proporções ainda maiores de adições, com o CP III apresentando de 35% a 75% de escória e o CP IV, de 15% a 50% de pozolana, em sua composição (ABCP, 2023).

2.3.1.1.1 Fatores influentes na mistura solo-cimento

De acordo com a descrição de RDT (2018), o solo-cimento representa uma mistura que passa por um processo de estabilização química, no qual suas propriedades são aprimoradas pela adição de cimento, conferindo-lhe as características mecânicas necessárias para sua utilização.

Essa técnica de estabilização com cimento é amplamente aplicada em uma variedade de projetos de construção, abrangendo barragens, estradas, aeroportos e outras obras.

Por outro lado, conforme definido pelo DNIT (2006), o solo-cimento é uma composição que engloba solo, cimento Portland e água, devidamente compactada e projetada para atender a requisitos específicos de densidade, durabilidade e resistência. Essa combinação resulta em um material sólido, cimentado e altamente rígido em termos de flexão. O teor de cimento geralmente empregado nesse processo varia entre 6% e 10%.

A preferência por essa técnica em projetos desse gênero é amplamente justificada pela necessidade de empregar grandes volumes de materiais, bem como por diversos fatores que favorecem a utilização do solo local. Entre esses fatores, destaca-se a redução da distância de transporte, o que resulta em economia financeira, menor consumo de energia e preservação das jazidas minerais situadas nas proximidades do local de aplicação.

Em linhas gerais, a estabilização do solo-cimento tem como seu objetivo primordial a melhoria das propriedades físicas e mecânicas do solo, adequando-o às demandas específicas de cada projeto (RDT, 2018). A categoria de pavimento semirrígido é obtida por meio da introdução de pequenas proporções de cimento, geralmente entre 2% e 4%, com a principal finalidade de modificar as propriedades do solo relacionadas à sua plasticidade e resistência à água. Nesse enfoque, não ocorre uma cimentação substancial, mas a flexibilidade do pavimento é preservada (DNIT, 2006).

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais

Para conduzir os ensaios destinados à classificação do comportamento do solo e à avaliação de sua propriedade, conforme as normas vigentes, foram empregados os seguintes materiais:

- Solo argiloso: As amostras de solo argiloso foram coletadas nas instalações da UFERSA, localizadas no campus de Mossoró-RN, próximas ao campo de futebol (conforme figura 7), mais especificamente atrás do bloco que abriga os laboratórios de química, física e matemática, nas coordenadas 5°12'18.4"S 37°19'28.0"W. Através de uma análise visual, nota-se que o solo possui uma coloração avermelhada e possui características de granulação fina (conforme figura 8). Após a coleta, as amostras de solo serão dispostas em bandejas para secagem ao ar e armazenadas nas instalações do Laboratório de Misturas Asfálticas do Centro de Engenharias da UFERSA.

Figura 7 – Vista superior do local de coleta do solo argiloso para análise.



Fonte: Google Earth – dados do mapa @2023 Google

Figura 8— Localização do solo por trás do laboratório de química/física e matemática.



Fonte: autoria própria 2023.

- Aglomerante: O aglomerante selecionado foi o cimento Portland CP V-ARI, adquirido em um estabelecimento de materiais de construção. Este cimento foi armazenado em um recipiente de vidro hermeticamente fechado para evitar qualquer contaminação ou exposição à umidade.

3.2 Métodos

A pesquisa foi conduzida em quatro fases distintas, representadas esquematicamente na Figura 9. Na primeira etapa, realizou-se a coleta de solo, abrangendo informações bibliográficas essenciais para a avaliação da estabilização de solos, juntamente com suas especificações técnicas destinadas à aplicação em camadas de base para pavimentação. Além disso, amostras de campo foram adquiridas para a realização de ensaios, visando a obtenção dos resultados necessários para este estudo.

A segunda fase envolveu a realização de ensaios geotécnicos voltados para a classificação do solo. Isso incluiu a determinação do Limite de Liquidez (LL) de acordo com a norma DNER-ME 122/94 - Solos - Determinação do Limite de Liquidez - Métodos de Referência; a identificação do Limite de Plasticidade (LP) conforme indicado na norma DNER-ME 082/94 - Solos - Determinação do Limite de Plasticidade; e a análise granulométrica

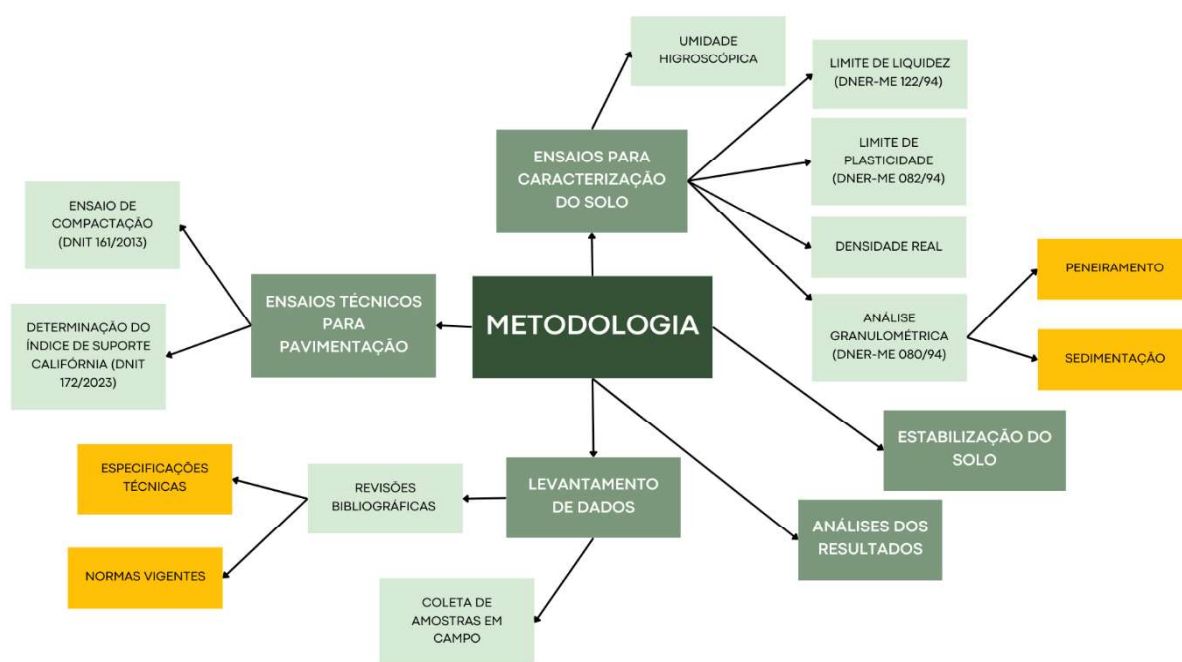
seguindo os procedimentos estabelecidos na norma DNER-ME 080/94 - Solos - Análise Granulométrica por Peneiramento.

Posteriormente, foram realizados ensaios de compactação de acordo com a Norma DNIT 161/2013-ME: Solos - Ensaio de Compactação Utilizando Amostras Não Trabalhadas, e ensaios de CBR (Índice de Suporte Califórnia) conforme a Norma DNIT 172/2023-ME: Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras Não Trabalhadas - Método de Ensaio.

Em seguida, foi realizado a estabilização do solo para alcançar as especificações técnicas do DNIT para uso do solo em obras para pavimentação, sendo considerado cerca de 15% de cimento Portland adicionados a mistura.

Por fim, os resultados obtidos em laboratório foram avaliados para a classificação do solo e sua adequação para uso em camadas de pavimentação.

Figura 9 – Representação esquemática da metodologia.



Fonte: autoria própria (2023).

3.2.1 Preparação de amostras para ensaios de caracterização

O procedimento de preparação das amostras seguiu estritamente as diretrizes estabelecidas na norma DNER-ME 041/94. Após a coleta da amostra de campo, esta foi deixada à temperatura ambiente para secagem ao ar, como recomendado. O processo de preparação das amostras está detalhado no fluxograma apresentado na Figura 10.

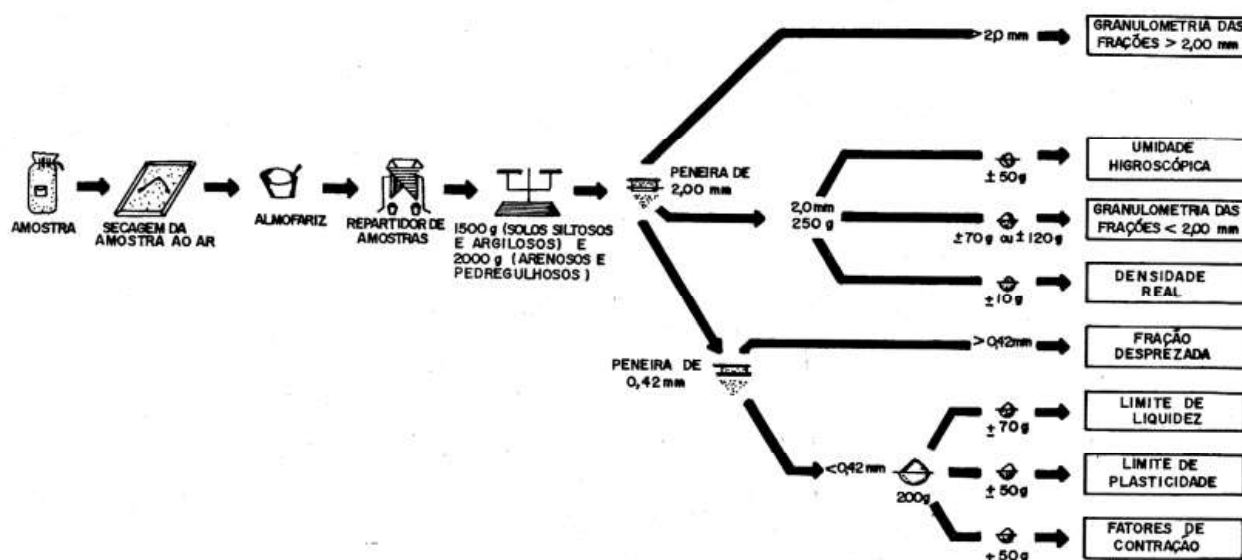
Em um primeiro passo, utilizou-se um almofariz e uma mão de gral revestida de borracha para desagregar os torrões e manter as partículas do solo em seu estado natural, separando-as umas das outras.

Posteriormente, o material preparado foi reduzido com o auxílio de um repartidor de amostras até se obter uma amostra representativa. Utilizando uma balança com capacidade de 2 kg, foi selecionada uma porção de cerca de 1,5 kg como amostra seca ao ar. Essa amostra foi submetida à peneira de 2,00 mm, e o material retido na peneira passou por um processo de lavagem para remover as partículas finas que aderiam às partículas retidas. Após a lavagem, o material retido foi colocado em uma estufa de secagem por 24 horas para a análise granulométrica das frações da amostra com tamanho superior a 2,00 mm.

Das frações que passaram pela peneira de 2,00 mm, aproximadamente três porções de 50g cada foram separadas para o ensaio de determinação da umidade higroscópica, enquanto outras três porções de cerca de 70g cada foram destinadas à análise granulométrica das frações da amostra com tamanho inferior a 2,00 mm. Além disso, três cápsulas, cada uma contendo 10g de solo, foram utilizadas para o ensaio de determinação da densidade real.

Para a determinação dos limites de liquidez e limite de plasticidade, a fração remanescente que passou pela peneira de 2,00 mm foi submetida à peneira de 0,42 mm. A partir da fração que passou pela peneira de 0,42 mm, foram retirados cerca de 70g de solo para o ensaio de determinação do limite de liquidez, e 50g para o ensaio de determinação do limite de plasticidade.

Figura 10 – Fluxograma sobre o preparo de amostra de solos para os ensaios de caracterização.



Fonte: DNER-ME 041/94 – Solos – preparação de amostras para ensaio de caracterização.

Figura 11 –Preparo de amostra de solos para os ensaios de caracterização.



Fonte: autoria própria (2023).

3.2.2 Umidade higroscópica

O procedimento seguiu rigorosamente as diretrizes estabelecidas pela norma DNER-ME 213/94 (Solos – determinação do teor de umidade). Inicialmente, três recipientes, juntamente com suas respectivas tampas, foram pesados, e o valor da massa total foi registrado. Em cada recipiente, uma amostra de 50g do solo úmido foi adicionada, e o valor resultante foi anotado como massa bruta úmida.

Em seguida, as cápsulas contendo as amostras foram colocadas em uma estufa mantida a uma temperatura constante de 110°C, por um período de aproximadamente 24 horas, conforme prescrito pela norma. Após o tempo especificado, os recipientes com as amostras foram transferidos para um dessecador para resfriamento (Figura 12). Posteriormente, os valores da massa das amostras secas foram registrados. Ao término do ensaio, as amostras foram descartadas de acordo com as práticas adequadas.

Figura 12 – Amostras sendo resfriadas no dessecador.



Fonte: autoria própria (2023).

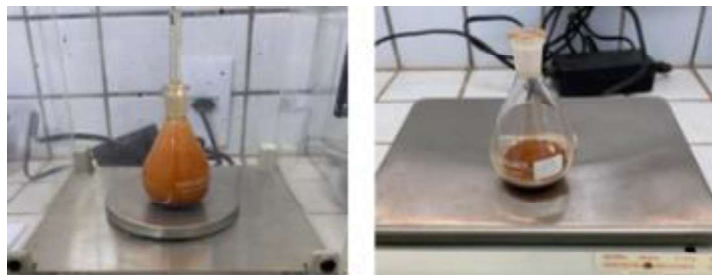
3.2.3 Densidade real

O procedimento estrito de acordo com a norma DNER-ME 093/94 (Solos – determinação da densidade real) foi seguido. Inicialmente, os três picnômetros vazios foram pesados para determinar suas massas. Subsequentemente, adicionou-se uma amostra de 10g de solo em cada um dos três picnômetros, e os valores de massa resultantes foram registrados. Em seguida, água destilada foi acrescentada aos picnômetros, garantindo a completa cobertura da amostra. Os picnômetros foram aquecidos, e um vácuo foi aplicado por 15 minutos utilizando uma bomba supressora para eliminar qualquer ar entre as partículas do solo. Agitações intermitentes dos picnômetros a cada 5 minutos auxiliaram na remoção do ar.

Após essa etapa, cada picnômetro foi completamente preenchido com água destilada à temperatura ambiente, e uma rolha perfurada foi inserida para nivelar a parte superior e assegurar que o recipiente estivesse completamente cheio. Em seguida, os pesos de cada picnômetro foram registrados (Figura 13).

Posteriormente, o conteúdo dos picnômetros foi esvaziado completamente, e eles foram lavados de maneira adequada. Em seguida, foram preenchidos apenas com água destilada para determinar o peso da água juntamente com o picnômetro. Após a conclusão do ensaio, as amostras utilizadas foram descartadas de acordo com os procedimentos adequados.

Figura 13 –Preparação do ensaio de densidade real.



Fonte: autoria própria (2023).

3.2.4 Limite de liquidez

Em uma primeira etapa, a calibração do equipamento Casagrande foi realizada para assegurar resultados de maior precisão, eliminando qualquer desvio lateral do aparelho. A amostra utilizada, conforme descrito no item 3.2.1.1, totalizou 70g de solo.

Após a etapa de calibração, 15ml de água destilada foram inicialmente adicionados à amostra para promover sua homogeneização. Em seguida, a quantidade de água foi incrementada em intervalos de 1ml até que o solo demonstrasse características plásticas, totalizando 17ml para a obtenção do primeiro ponto. A seguir, o material foi transferido para a concha do equipamento Casagrande, cobrindo 2/3 da superfície da concha com uma espessura de 1cm.

Com a amostra de solo na concha, um cinzel foi utilizado para garantir que a espessura da massa na parte central atingisse 1cm, passando o cinzel uma única vez, começando a partir da extremidade da concha. Golpes foram então aplicados à base do aparelho, acionando a manivela automática a uma velocidade de duas voltas por segundo, até que as bordas inferiores se unissem em uma extensão de 1cm. Com o auxílio de uma espátula, foram obtidas três amostras de cada lado da extensão unida, colocadas em recipientes, pesadas e submetidas a 24 horas de secagem em estufa para determinação da umidade.

Posteriormente, a amostra utilizada no primeiro ponto foi retirada da concha, e as mesmas etapas foram repetidas para obter os pontos subsequentes. Isso envolveu a adição de água destilada em incrementos de 1ml até que o solo atingisse a plasticidade, visando obter um número específico de golpes conforme prescrito pela norma, variando entre 25-35, 20-30 e 15-25 golpes. Esse processo foi repetido cinco vezes para obter três amostras em cada um dos pontos.

3.2.5 Limite de plasticidade

Para a realização deste ensaio, a amostra coletada, conforme as diretrizes da norma DNER-ME 041/94 detalhadas na seção 3.2.1.1 deste trabalho, consistiu em cerca de 50g de solo. Inicialmente, essa amostra foi submetida a um processo de homogeneização até adquirir uma consistência plástica, utilizando a mesma quantidade de 17ml de água empregada no ensaio de determinação do limite de liquidez, conforme descrito na seção 3.2.1.4.

A partir da massa resultante, aproximadamente 20g foram moldados em uma forma elipsoidal, sendo transformados em formato cilíndrico ao rolar os dedos sobre a placa de vidro. O número de rolagens ficou dentro do intervalo de 80 a 90 por minuto, considerando uma rolagem como o movimento da mão para a frente e para trás. O cilindro foi moldado até atingir dimensões de 3cm de diâmetro e 10cm de comprimento, observando o aparecimento de deformações (Figura 14).

Uma vez que essas características foram alcançadas, o cilindro foi dividido em três partes para fins de pesagem e, posteriormente, submetido a secagem em estufa. Esse procedimento foi repetido em cinco iterações, resultando em três amostras em cada repetição.

Figura 14 – Molde do solo com 3cm de diâmetro.



Fonte: autoria própria (2023).

3.2.6 Análise granulométrica

Todo o procedimento foi realizado seguindo as etapas descritas na DNER-051/94 – Solos – Análise granulométrica.

3.2.6.1 Peneiramento

O material retido na peneira 2,00mm obtido no item 3.2.1.1, foi passado na peneira de 50 – 38 – 25 – 19 – 95 – 4,8 – 2,0mm e anotados devidamente os seus pesos.

3.2.6.2 Sedimentação

Para avaliar as características de sedimentação da amostra de solo coletada, o procedimento a seguir foi realizado: Em primeiro lugar, um bécher foi empregado para misturar a amostra de solo coletada com 125 ml de uma solução de hexametáfosfato de sódio. Essa mistura foi deixada em repouso por um mínimo de 12 horas para assegurar a completa dispersão das partículas.

Após o período de repouso, a mistura foi cuidadosamente transferida para um copo de dispersão e agitada por cerca de 15 minutos para garantir a homogeneidade da suspensão. A suspensão resultante foi então transferida para uma proveta e complementada com água destilada até atingir o volume de 1000 ml. Para manter as partículas em suspensão, a proveta foi agitada por 1 minuto.

Em seguida, um densímetro foi inserido na proveta, e leituras foram realizadas em intervalos de tempo específicos, a saber: 0 segundos, 30 segundos, 1 minuto e 2 minutos. Esse procedimento foi repetido duas vezes para garantir a precisão dos resultados. Na terceira etapa de leitura, as medições foram estendidas para os seguintes tempos: 0 segundos, 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas e 8 horas.

Após a conclusão das leituras, o material da proveta foi submetido a uma lavagem cuidadosa com água potável através de uma peneira de 0,075 mm. O material retido na peneira foi, então, transferido para uma estufa para secagem. Por fim, o material passou por um processo de peneiramento em diferentes malhas, incluindo 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,30 mm, 0,15 mm e 0,075 mm. Os valores retidos em cada uma dessas peneiras foram registrados para análises posteriores. Esse minucioso processo de sedimentação foi executado com o objetivo de caracterizar de maneira apropriada as propriedades do solo em estudo.

Figura 15 –Ensaio de sedimentação e peneiramento.



Fonte: autoria própria (2023).

3.2.7 Ensaios técnicos para fins de pavimentação

3.2.7.1 Compactação utilizando amostras não trabalhadas

Todo esse procedimento foi conduzido de acordo com a Norma DNIT 164/2013-ME: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio.

A amostra recebida passou por uma série de etapas de preparação. Inicialmente, houve a secagem ao ar, seguida pela desagregação manual em almofariz usando um gral. Posteriormente, a amostra foi homogeneizada e reduzida com o auxílio de um repartidor de amostras até atingir um peso final de 6,00 kg, conforme adequado para solos argilosos.

Em seguida, o material completo foi submetido a uma peneiração usando uma malha de 19 mm. Posteriormente, o processo de moldagem teve início. Inicialmente, um filtro de papel foi colocado na base de cada molde cilíndrico, e o material foi adicionado em cinco camadas sucessivas. A cada camada, foram aplicados 12 golpes utilizando um soquete. Após a conclusão deste processo, o cilindro superior foi removido para nivelar o material compactado com a borda

superior do molde (Figura 16). O peso do solo úmido foi então obtido pela subtração do peso do molde vazio.

Posteriormente, o corpo de prova foi submetido a um extrator de amostras, a partir do qual foram obtidas três amostras entre as camadas 1-2, 2-3 e 4-5 de cada molde. Esse conjunto de procedimentos foi repetido para os cinco moldes cilíndricos, resultando nos dados do ensaio.

Figura 16 –Ensaio de compactação.



Fonte: autoria própria (2023).

3.2.7.2 Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas

Todo esse procedimento foi conduzido em conformidade com a Norma DNIT 172/2016-ME: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio.

A amostra coletada passou por um processo sequencial de preparação meticulosa. Inicialmente, a secagem ao ar foi realizada. Posteriormente, a desagregação manual ocorreu usando um almofariz, seguida pela redução da amostra com a assistência de um repartidor de amostras, resultando na obtenção de uma amostra final com um peso de 6,00 kg, especialmente adequada para solos argilosos.

O material, que havia sido previamente separado, passou por um processo de peneiramento com uma malha de 19 mm e foi homogeneizado com uma umidade ótima de 11%,

determinada por meio do ensaio de compactação mencionado anteriormente. As dimensões de cada molde cilíndrico foram então registradas e os moldes foram montados. Esse processo envolveu a adição de um filtro na base de cada molde, seguida pela deposição do material em cinco camadas, resultando em uma altura média do solo compactado de aproximadamente 12,5 cm. Cada camada foi compactada com 12 golpes do soquete. Entre as camadas 1-2, 2-3 e 4-5, amostras de solo foram coletadas para posterior pesagem e secagem em estufa por 24 horas, com o objetivo de determinar o teor de umidade.

Uma vez concluída a compactação de todo o solo nos moldes, os cilindros foram removidos para nivelar o material compactado com a borda superior do molde cilíndrico, utilizando uma régua rígida. Em seguida, foi medida a massa do material compactado úmido. Esses procedimentos foram repetidos para os moldes 2 e 3.

Após a moldagem dos corpos de prova, os moldes foram retirados e posicionados de cabeça para baixo sobre um prato-base. Em cada molde, inseriu-se uma haste de expansão e aplicaram-se sobrecargas superiores a 4,536 kg, enquanto extensômetros fixos estavam posicionados no tripé na borda superior do cilindro para medir as expansões ocorridas a cada 24 horas. Os corpos de prova permaneceram imersos em água durante 96 horas.

Após as 96 horas, cada molde foi removido e permitiu-se que a água escorresse por 15 minutos antes de prepará-los para o ensaio de penetração. Os corpos de prova foram então submetidos à prensagem com as mesmas sobrecargas usadas no ensaio de expansão realizado anteriormente. No ensaio de penetração, uma força controlada de aproximadamente 45N foi aplicada, com o deslocamento do ponteiro do extensômetro do anel dinamométrico. A prensa foi acionada a uma taxa de cerca de 1,27 mm/min, enquanto as leituras no extensômetro do anel registraram encurtamentos diametrais resultantes da aplicação das cargas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos solos

4.1.1 Umidade higroscópica

Com base nos procedimentos detalhados no item 3.2.1.2 desta pesquisa, foram adquiridos os resultados abaixo, conforme apresentado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Valores obtidos no ensaio de umidade higroscópica

Umidade higroscópica - DNER-ME_213-94			
Cápsula	1	2	3
Massa bruta úmida (g):	54,249	50,565	52,819
Massa bruta seca (g):	54,116	50,442	52,692
Massa da cápsula (g):	26,115	26,569	28,147
Teor de umidade (%):	0,475	0,515	0,517
Teor de umidade médio (%):	0,503		

Fonte: autoria própria (2023).

A umidade higroscópica de 0,56% indica um solo notavelmente seco. Do ponto de vista da pavimentação, é crucial que o solo contenha a quantidade adequada de umidade para garantir uma compactação eficaz e a coesão entre as partículas. Quando o solo está excessivamente seco, surgem desafios significativos na obtenção de uma compactação adequada, o que, por sua vez, pode comprometer substancialmente a qualidade e a durabilidade do pavimento final.

4.1.2 Densidade real

De acordo com os procedimentos descritos no item 3.2.1.3 dessa pesquisa, foram obtidos os seguintes resultados demonstrados na tabela a seguir.

Tabela 3 – Valores obtidos no ensaio de densidade real.

Massa Específica dos Sólidos - DNER-ME_093-94		
Picnômetro	1	2
Peso do picnômetro (g):	40,132	41,658
Peso do picnômetro + solo seco (g)	50,082	51,608
Peso do picnômetro + solo seco + água (g)	98,973	103,697
Peso do picnômetro + água (g)	92,728	97,455
Massa Específica dos sólidos a temperatura T (g/cm³):	2,686	2,683
Média das massas específicas dos sólidos (g/cm³):	2,68	
Temperatura do ensaio (°C):	25	
Fator de Correção K20	0,99884	
Massa Específica dos Sólidos - D20 (g/cm³):	2,68	

Fonte: autoria própria (2023).

A análise da densidade real corrigida do solo, que alcançou um valor de 2,68 g/cm³, é um indicador fundamental da compacidade do solo e de sua capacidade de resistir eficazmente às cargas do tráfego. Esse resultado sugere que o solo atingiu um nível satisfatório de compactação, um elemento essencial na construção de uma base de pavimento robusta e durável. Solos densamente compactados são capazes de suportar as cargas do tráfego sem experimentar deformações excessivas, um aspecto vital para a longevidade e a segurança do pavimento.

No entanto, é relevante destacar que a adequação do solo para pavimentação não se resume apenas à densidade. Outros atributos, como a granulometria e a plasticidade, que serão discutidos posteriormente, também desempenham papéis cruciais nessa avaliação abrangente.

4.1.3 Limite de liquidez

Em prosseguimento das análises, foram também realizados ensaios de limite de liquidez, e os valores obtidos estão apresentados na Tabela 4 a seguir.

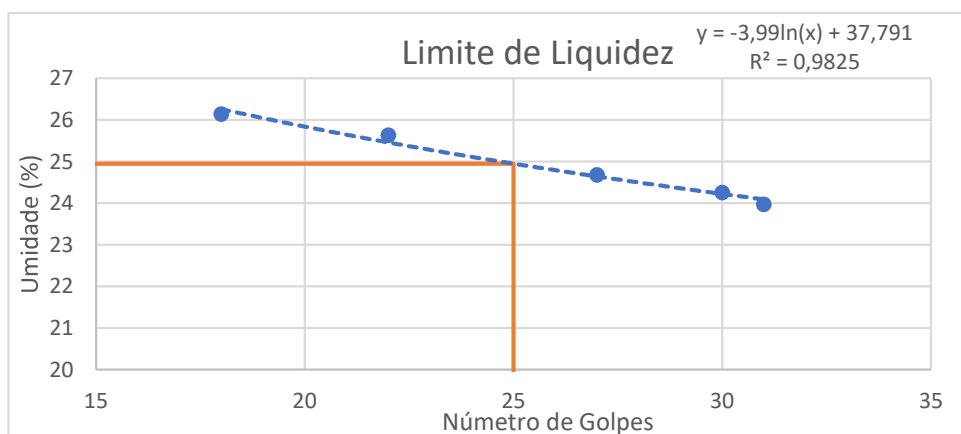
Tabela 4 – Valores obtidos no ensaio de determinação do limite de liquidez

Determinação do limite de liquidez - DNER-ME_122-94					
Cápsula	1	2	3	4	5
Peso da Cápsula (g)	20,020	25,840	25,361	20,773	21,224
Peso Bruto Úmido (g)	22,883	26,275	25,954	21,408	22,029
Peso Bruto Seco (g)	22,311	25,840	25,833	21,274	21,854
Umidade (%)	23,97	24,25	24,68	25,627	26,14
Nº de Golpes	31	30	27	22	18

Fonte: autoria própria (2023).

O resultado do ensaio de limite de liquidez registrou o valor de 24,95%, o que é de grande relevância quando se considera a sua utilização em pavimentos. A seguir, apresentamos a curva de fluidez demonstrada no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Curva de fluidez



Fonte: autoria própria (2023).

4.1.4 Limite de plasticidade

Tabela 5 – Valores obtidos no ensaio de determinação do limite de plasticidade

Determinação do limite de plasticidade - DNER-ME_082-94					
Cápsula	1	2	3	4	5
Peso da Cápsula (g)	18,800	25,840	21,006	20,510	19,564
Peso Bruto Úmido (g)	19,358	26,539	21,423	21,071	20,101
Peso Bruto Seco (g)	19,283	26,450	21,370	21,000	20,029
Umidade (%)	15,5	14,6	14,6	14,5	15,5

Fonte: autoria própria (2023).

Os resultados do ensaio indicam que o solo possui um limite de plasticidade de 14,93% e um índice de plasticidade de 11,21%. A seguir, na Tabela 5, estão expostos os valores obtidos em laboratório, e em seguida, apresentamos o resumo dos ensaios de limite de liquidez e plasticidade na Tabela 6.

A seguir, apresenta-se o resumo dos ensaios de limite de liquidez e plasticidade, conforme demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultado do Índice de plasticidade

Resultados					
Limite de Liquidez:	24,95%	Limite de Plasticidade:	14,93%	Índice de Plasticidade:	11,21%

Fonte: autoria própria (2023).

O limite de plasticidade é um parâmetro relevante que define a umidade crítica na qual um solo argiloso transita do estado plástico para o estado semissólido. O valor de 14,93% sugere que o solo em análise possui uma quantidade significativa de umidade necessária para conferir-lhe plasticidade.

O índice de plasticidade, calculado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, é de 11,21%. Esse índice representa a faixa de umidade na qual o solo mantém sua característica plástica, possibilitando a moldagem e compactação eficazes. Essa propriedade é desejável na construção de pavimentos, pois viabiliza a formação de uma base sólida e uniforme.

4.1.5 Análise granulométrica

Os resultados provenientes da análise granulométrica, conduzida por meio dos ensaios de peneiramento e sedimentação, conforme os critérios estabelecidos na norma DNER-051/94 - Solos - Análise Granulométrica, são apresentados na Tabela 7 subsequente.

Tabela 7 – Resumo da granulometria

Amostra Total Seca		Umidade Higroscópica				Resumo da Granulometria	
Amostra Total Úmida (g)	1500,00	Cap.	1	2	3	Pedregulho (>2,0mm)	17,59%
Retido Acum. N°10 (g)	263,84	P.Cap.	26,115	26,569	28,147	Areia Grossa (0,6 - 2mm)	19,82%
Passado N° 10 Úmida (g)	1236,16	PBU	54,245	50,565	52,819	Areia Média (0,2 - 0,6mm)	24,65%
Peso da Água	6,14	PBS	54,115	50,442	52,692	Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	17,51%
Passado N° 10 Seca	1230,02	w	0,46%	0,52%	0,52%	Silte (0,002- 0,06mm)	12,26%
Amostra Total Seca	1493,86	wmed	0,50%			Argila (<0,002mm)	8,17%

Fonte: autoria própria (2023).

Seguindo os procedimentos delineados no item 3.2.1.6.1, os resultados correspondentes estão apresentados na tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Resultado por peneiramento da amostra total

Peneiramento da Amostra Total					
Peneira	Peneira (mm)	Massa Retida (g)	Percentual Retido	Percentual Retido Acumulado	Percentual que Passa
3"	75,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
2.1/2"	63,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
2"	50,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1.1/2"	38,10	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1.1/4"	31,50	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1"	25,40	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
7/8"	22,40	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,10	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
5/8"	16,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1/2"	12,50	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
3/8"	9,50	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1/4"	6,30	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
N° 4	4,80	15,57	1,04%	1,04%	98,96%
N° 8	2,38	0,00	0,00%	1,04%	98,96%
N° 10	2,00	248,27	16,55%	17,59%	82,41%

Fonte: autoria própria (2023).

Após a etapa de peneiramento para amostras com tamanho superior a 2,00 mm, os resultados da análise por sedimentação são apresentados a seguir.

Tabela 9 – Resultado da análise granulométrica por sedimentação.

Sedimentação									
Massa Específica Real (g/cm³)		2,68	Calibração do Densímetro: A+B.r(H)			A=	-227,27	B=	248,73
Tempo		Leitura Densímetro	Temperat. (°C)	Correção à Temperatura	Leitura Corrigida	Viscosidade (10 ⁻⁴ Pa.s)	Altura de Queda (cm)	Diâmetro (mm)	% da Amostra
mim	seg								
0,50	30,00	1,013	27,00	0,0009	1,0139	8,7234	18,79	0,0645	20,43%
1,00	60,00	1,013	27,00	0,0009	1,0139	8,7234	18,79	0,0541	20,43%
2,00	120,00	1,012	27,00	0,0009	1,0129	8,7234	19,02	0,0385	18,55%
4,00	240,00	1,011	27,00	0,0009	1,0119	8,7234	18,76	0,0270	16,66%
8,00	480,00	1,011	27,00	0,0009	1,0119	8,7234	18,76	0,0191	16,66%
15,00	900,00	1,011	27,00	0,0009	1,0119	8,7234	18,76	0,0140	16,66%
30,00	1800,00	1,009	27,00	0,0009	1,0099	8,7234	19,21	0,0100	12,88%
60,00	3600,00	1,008	26,00	0,0007	1,0087	8,9225	19,49	0,0072	10,07%
120,00	7200,00	1,008	26,00	0,0007	1,0087	8,9225	19,49	0,0051	10,07%
240,00	14400,00	1,007	27,00	0,0009	1,0079	8,7234	19,67	0,0036	9,11%
480,00	28800,00	1,007	27,00	0,0009	1,0079	8,7234	19,67	0,0025	9,11%
1440,00	86400,00	1,006	27,00	0,0009	1,0069	8,7234	19,89	0,0015	7,22%

Fonte: autoria própria (2023).

Após o ensaio de sedimentação, as amostras foram submetidas à secagem em estufa e, em seguida, peneiradas de acordo com a sequência descrita na Tabela 10.

Tabela 10 – Peneiramento parcial da sedimentação.

Peneiramento da Amostra Parcial					
Peso Amostra Parcial Úmida (g):		70,00		Amostra Parcial Seca (g):	69,65
Peneira	Peneira (mm)	Massa Retida (g)	Percentual Retido	Percentual Retido Acumulado	Percentual que Passa Total
16	1,200	5,57000	8,00%	8,00%	75,82%
20	0,850	0,00000	0,00%	8,00%	75,82%
30	0,600	11,18000	16,05%	24,05%	62,59%
40	0,420	8,93000	12,82%	36,87%	52,03%
50	0,300	4,92000	7,06%	43,93%	46,21%
100	0,150	10,47000	15,03%	58,96%	33,82%
115	0,115	0,00000	0,00%	58,96%	33,82%
200	0,074	4,36000	6,26%	65,22%	28,66%

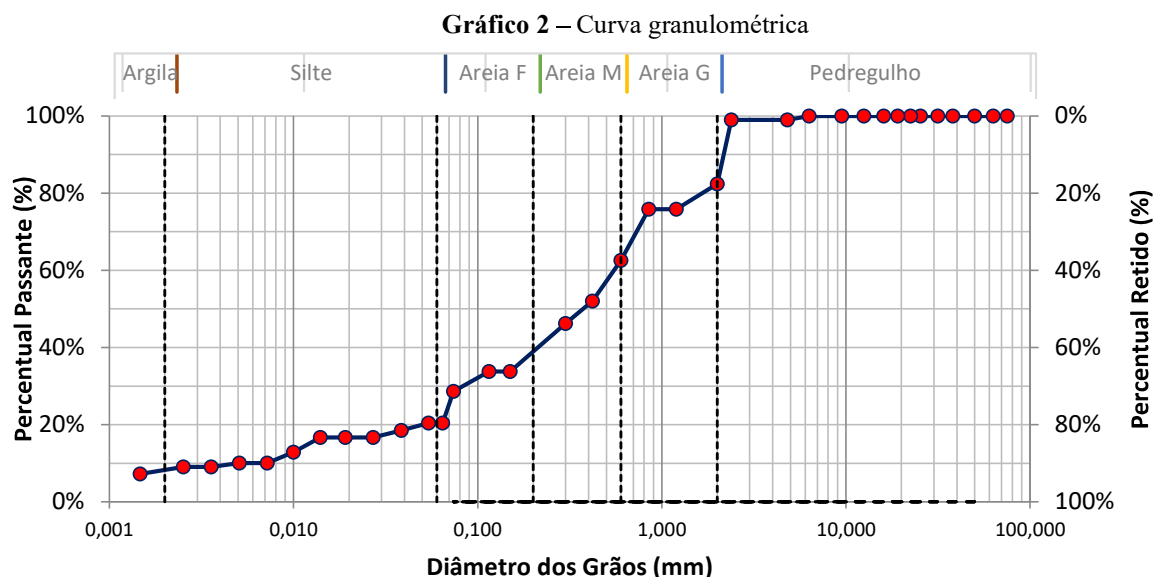
Fonte: autoria própria (2023).

O gráfico apresentado a seguir é uma representação visual dos resultados obtidos na análise granulométrica realizada. A análise granulométrica é uma parte essencial da caracterização de solos, pois fornece informações detalhadas sobre o tamanho das partículas que compõem uma amostra de solo.

Neste gráfico, os resultados estão organizados de forma a demonstrar a distribuição das partículas de solo em diferentes faixas de tamanho. No eixo horizontal, temos a faixa de tamanho

das partículas, que vai das maiores (à esquerda) para as menores (à direita). O eixo vertical representa a porcentagem acumulada de partículas em relação ao tamanho.

Através desse gráfico, é possível identificar facilmente a predominância de partículas de solo argiloso e silteoso.



4.2 Resultado do Ensaio de Compactação

4.2.1 Solo natural

Primeiramente foi realizado o ensaio de compactação somente com o solo natural executado através da energia normal (5 camadas de 12 golpes cada uma), gerando os respectivos pesos e densidades do material como demonstrado na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11 – Levantamento dos pontos no ensaio de compactação do solo natural.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO (DNER-162/94)					
PONTOS	1	2	3	4	5
V _{CIL} (cm ³)	1539,93	1539,93	1539,93	1539,93	1539,93
P _{CIL} (g)	4900	4900	4900	4900	4900
P _{CIL} + P _{ÚMIDO} (g)	9300	9750	9950	9900	9800
P _{ÚMIDO} (g)	4400	4850	5050	5000	4900
DENS. ÚMIDA	2,8573	3,1495	3,2794	3,2469	3,1820
DENS. SECA	2,6568	2,8818	2,9657	2,8925	2,8037

Fonte: autoria própria (2023).

Em cada um dos pontos de coleta, foram obtidas três amostras, conforme apresentado na tabela a seguir, com o intuito de calcular a umidade média.

Tabela 12 – Resultados obtidos do ensaio de compactação solo natural.

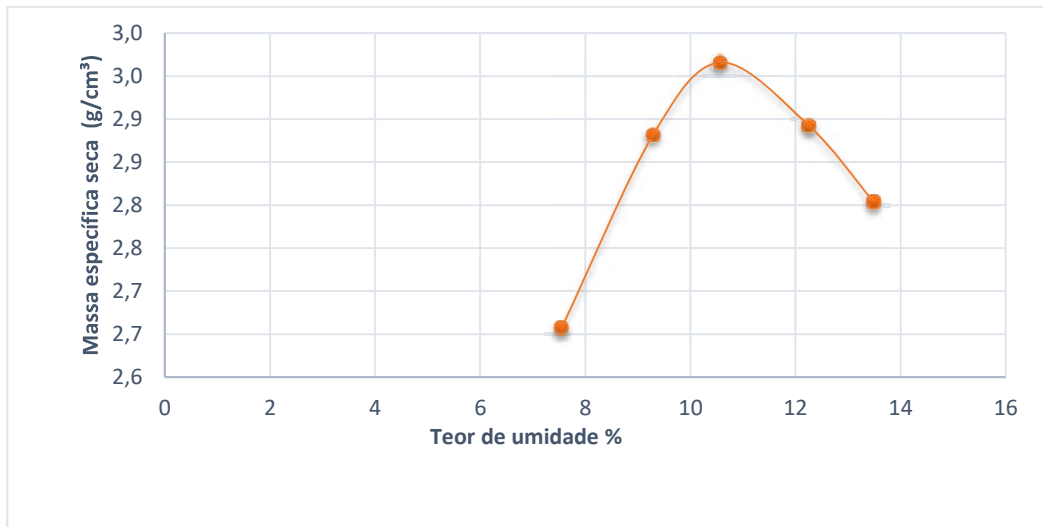
PONTOS	Nº CAPS	P_{CAPS}	P_{CAPS} + P_{ÚMID}	P_{CAPS}+ P_{SECO}	MÁGUA	M_{SECA}	UMIDADE	MÉDIA (%)
1	C17	19,564	73,912	69,987	3,925	50,423	0,078	7,546
	C12	24,285	81,646	77,671	3,975	53,386	0,074	
	C11	28,908	115,143	109,196	5,947	80,288	0,074	
2	C18	21,224	76,83	72,149	4,681	50,925	0,092	9,291
	C10	25,361	88,292	82,922	5,37	57,561	0,093	
	C05	18,71	71,765	67,228	4,537	48,518	0,094	
3	C6	18,8	101,301	93,456	7,845	74,656	0,105	10,575
	C15	19,645	102,765	94,69	8,075	75,045	0,108	
	C7	25,84	115,893	107,368	8,525	81,528	0,105	
4	C13	28,898	97,65	89,947	7,703	61,049	0,126	12,251
	C4	20,02	86,286	78,983	7,303	58,963	0,124	
	C9	20,51	73,355	67,799	5,556	47,289	0,117	
5	C14	20,773	60,348	55,622	4,726	34,849	0,136	13,490
	C8	21,083	73,272	66,997	6,275	45,914	0,137	
	C16	21,006	77,052	70,498	6,554	49,492	0,132	

Fonte: autoria própria (2023).

Por meio da realização deste ensaio, foi possível gerar uma curva de compactação que permitiu a determinação da umidade ótima necessária para os experimentos desta pesquisa. A umidade ótima estabelecida foi de 10,97%, utilizando a energia normal de compactação. Este valor representa a quantidade ideal de umidade a ser incorporada ao solo para alcançar a máxima densidade durante o processo de compactação, sendo um dado fundamental para a continuação do ensaio CBR. Além disso, a massa específica aparente seca máxima, que atingiu 2,987 g/cm³ no ensaio, reflete a densidade do solo após a compactação e a remoção da umidade excessiva. A alta densidade aparente seca é um fator desejável em pavimentação, indicando que o solo está bem compactado e apto para suportar eficazmente as cargas do tráfego.

Com base na umidade determinada, procedeu-se à moldagem de três corpos de prova para o ensaio CBR, visando a obtenção de seu valor de resistência à penetração. A seguir, apresentamos a curva de compactação com os valores de umidade e densidade seca referentes aos cinco corpos de prova moldados (Gráfico 2).

Gráfico 3 – Curva de compactação do solo natural



Fonte: autoria própria (2023).

Tabela 13 – Resumo do ensaio de compactação solo natural.

Resumo do Ensaio					
Massa Espec. Aparente Seca Máxima (g/cm³):	2,987	Umidade Ótima (%):	10,947	Energia:	Normal

Fonte: autoria própria (2023).

4.1.1 Solo-cimento

Para a estabilização do solo, foi incorporado um teor de 15% de cimento CP-V-ARI, resultando nos seguintes desempenhos no ensaio de compactação.

Tabela 14 – Levantamento dos pontos no ensaio de compactação do solo-cimento.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO (DNER-162/94)					
PONTOS	1	2	3	4	5
VCIL (cm3)	1523,29	1523,29	1523,29	1523,29	1523,29
PCIL (g)	4900	4900	4900	4900	4900
PCIL + PÚMIDO (g)	9600	9750	9800	9700	9650
PÚMIDO (g)	4700	4850	4900	4800	4750
DENS. ÚMIDA	3,0854	3,1839	3,2167	3,1511	3,1183
DENS. SECA	2,7583	2,8072	2,8018	2,7024	2,6365

Fonte: autoria própria (2023).

Na Tabela 15 a seguir são apresentadas as características das cápsulas recolhidas com solo úmido e posteriormente secas na estufa.

Tabela 15 – Resultados obtidos no ensaio de compactação solo-cimento.

PONTOS	Nº CAPS	PCAPS	PCAPS + PÚMID	PCAPS+ PSECO	MÁGUA	MSECA	UMIDADE	MÉDIA (%)
1	C4	20,02	43,361	40,91	2,451	20,89	0,117	11,859
	C5	18,71	62,474	57,862	4,612	39,152	0,118	
	C6	18,8	63,587	58,765	4,822	39,965	0,121	
2	C7	25,84	89,611	82,207	7,404	56,367	0,131	13,420
	C8	21,083	51,434	47,809	3,625	26,726	0,136	
	C9	20,51	47,643	44,403	3,24	23,893	0,136	
3	C10	25,361	68,679	63,042	5,637	37,681	0,150	14,808
	C11	28,908	68,8	63,597	5,203	34,689	0,150	
	C12	24,285	58,567	54,235	4,332	29,95	0,145	
4	C13	28,898	74,212	67,95	6,262	39,052	0,160	16,604
	C14	20,773	65,711	59,393	6,318	38,62	0,164	
	C15	19,645	56,438	50,98	5,458	31,335	0,174	
5	C16	21,006	55,993	50,575	5,418	29,569	0,183	18,270
	C17	19,564	71,09	63,139	7,951	43,575	0,182	
	C18	21,224	72,368	64,478	7,89	43,254	0,182	

Fonte: autoria própria (2023).

Por meio do processo de estabilização do solo, que incluiu a adição de aproximadamente 15% de cimento CP-V-ARI, conseguimos atingir uma umidade ótima de 13,91% e uma massa específica aparente seca máxima de 2,787 g/cm³, conforme evidenciado na tabela 16 abaixo. Esses valores servirão como base para a confecção dos corpos de prova destinados à análise do Índice de Suporte Califórnia em etapa subsequente.

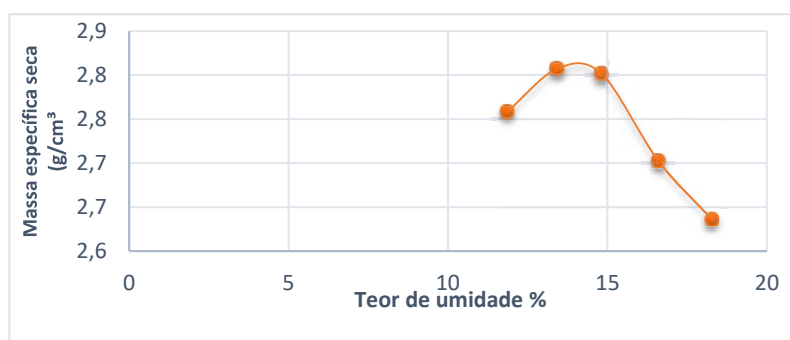
Tabela 16 - Resumo do ensaio de compactação solo-cimento.

Resumo do Ensaio					
Massa Espec. Aparente Seca Máxima (g/cm³):	2,787	Umidade Ótima (%):	13,910	Energia:	Normal

Fonte: autoria própria (2023).

Logo abaixo está a curva de compactação do solo-cimento com a estabilização de 15%:

Gráfico 4 – Curva de compactação solo-cimento



Fonte: autoria própria (2023).

4.3 Resultado do Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

4.3.1 Solo natural

O ensaio foi conduzido empregando a umidade ótima previamente determinada por meio do ensaio de compactação, que resultou em 10,97% de umidade para o solo natural, conforme mencionado anteriormente. Após a moldagem, os corpos de prova foram imersos em água por um período de 96 horas, registrando uma expansão máxima de apenas 0,03%. No total, foram confeccionados três cilindros, pesando 9900g, 9950g e 9900g, respectivamente, utilizando solo úmido, com um teor médio de umidade de 10,4%, e alcançando uma massa específica aparente seca de 2,95 g/cm³.

Tabela 17 - Resultados do ensaio de CBR solo-natural.

Peso do Cilindro + Solo Úmido (g):	9900,0	9950	9900	Umidade Ótima (%):
Peso do Solo Úmido (g):	5000,00	5050,00	5000,00	10,97%
Massa Específica Aparente Úmida (g/cm ³):	3,28	3,32	3,28	Massa Espec. Seca Máxima (g/cm ³):
Cápsula:	C9	C15	C7	2,987
Peso da Cápsula (g):	20,510	19,645	25,840	Umidade higroscópica da amostra (%):
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	63,632	78,062	89,428	4,68%
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	59,482	72,425	83,691	Massa de solo úmido a pesar (g):
Teor de Umidade (%):	10,65	10,68	9,92	6000,00
Teor de Umidade Médio (%)	10,4			Volume de água a adicionar (ml):
Massa Específica Aparente Seca (g/cm ³):	2,97			360,30
Índice de Vazios	0,00			Energia de compactação:
Porosidade (%)	0,48%			Normal

Fonte: autoria própria (2023).

Após o período de 96 horas em que os moldes permaneceram submersos, procedeu-se ao ensaio de penetração, no qual a maior carga aplicada atingiu uma média de 3007,30N (Tabela 18).

Tabela 18 - Ensaio de penetração do solo-natural

Tempo (min)	Penetração (mm)	Leitura (μm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0,50	0,63	150,00	1479,00	0,77
1,00	1,27	225,00	2218,50	1,15
1,50	1,9	237,00	2336,82	1,21
2,00	2,54	260,00	2563,60	1,33
2,50	3,17	276,00	2721,36	1,41
3,00	3,81	282,00	2780,52	1,44
3,50	4,44	290,00	2859,40	1,48
4,00	5,08	305,00	3007,30	1,56

Fonte: autoria própria (2023).

Com base na correção da constante média do anel dinamométrico realizada no equipamento de ensaio, o valor do CBR do material ensaiado deve ser selecionado como o maior entre os obtidos nas penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm, que corresponde a 18,29% (Tabela 19).

Tabela 19 - Penetração do solo-natural corrigida

Penetração (mm)	Pressão (MPa)			ISC (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão	
2,54	1,429	1,114	6,90	16,14
5,08	1,806	1,893	10,35	18,29

Fonte: autoria própria (2023).

4.3.2 Solo-cimento

O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento anterior para o solo natural, no entanto, a umidade ótima foi previamente determinada por meio do ensaio de compactação do solo-cimento, estabelecida em 13,91%, conforme apresentado na tabela subsequente. No total, três cilindros foram fabricados, pesando 9600g, 9700g e 9700g, respectivamente, utilizando solo úmido, com uma umidade média de 13,6%, alcançando uma massa específica aparente seca de 2,72 g/cm³

Tabela 20 - Resumo do ensaio de CBR solo-cimento

Peso do Cilindro + Solo Úmido (g):	9600,0	9700	9700	Umidade Ótima (%):
Peso do Solo Úmido (g):	4700,00	4800,00	4800,00	13,91%
Massa Específica Aparente Úmida (g/cm ³):	3,09	3,15	3,15	Massa Espec. Seca Máxima (g/cm ³):
Cápsula:	C11	C10	C5	2,787
Peso da Cápsula (g):	28,908	25,361	18,710	Umidade higroscópica da amostra (%):
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	67,040	62,570	54,340	4,68%
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	62,677	58,029	49,996	Massa de solo úmido a pesar (g):
Teor de Umidade (%):	12,92	13,90	13,88	6000,00
Teor de Umidade Médio (%)	13,6			Volume de água a adicionar (ml):
Massa Específica Aparente Seca (g/cm ³):	2,72			528,80
Índice de Vazios	0,03			Energia de compactação:
Porosidade (%)	2,52%			Normal

Fonte: autoria própria (2023).

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia foi conduzido utilizando um corpo de prova moldado com a umidade ótima de 13,91%, obtida por meio do ensaio de compactação com energia de compactação normal. Após deixar o corpo de prova submerso por 4 dias, registrou-se

uma expansão máxima de 0,25%. Para o CBR do material ensaiado, adotou-se o valor maior entre as penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm, que corresponde a 94,94%.

Conforme afirmado pelo DNIT (2016), é possível categorizar o pavimento no qual o solo estabilizado se encaixaria como sendo um pavimento semirrígido, que se destaca pela presença de uma base cimentada. As descrições das propriedades do material investigado neste estudo possibilitam sua classificação para emprego em camadas de base destinadas a rodovias com elevado volume de tráfego. Nesse contexto, são estabelecidos critérios que incluem uma resistência ao cisalhamento (CBR) superior a 80%, uma expansão limitada a menos de 0,5%, e um limite de liquidez não excedendo 25%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos em laboratório, podemos tirar as seguintes conclusões:

No que se refere à relação entre a variação da tensão e os níveis de umidade, observa-se que a proporção de água/cimento exerce uma influência significativa no aumento da resistência das amostras de teste neste estudo. Os resultados indicam que os maiores valores de CBR foram alcançados quando uma taxa de cimento de 15% foi empregada, resultando em uma umidade de 13,91% (umidade ótima) e ISC de 94,94%. No entanto, ao utilizar apenas o solo natural, obteve-se uma umidade ótima de 10,97% com ISC de 18%, o que não atende aos requisitos de pavimentação utilização do solo em nenhuma camada de pavimentação. Porém, os requisitos de estabilização do solo classificam-no para ser utilizados em pavimentos semirrígidos na camada de base, como discutidos anteriormente.

Uma possível explicação para essa influência da umidade na mistura de solo-cimento está relacionada à distribuição granulométrica do solo, ou seja, à quantidade relativa de partículas finas, médias e grossas. Além disso, a quantidade de água exerce um impacto direto na estrutura durante o processo de compactação do solo-cimento, levando a uma maior hidratação do cimento e, como resultado, uma cimentação mais eficaz da mistura. Esse fenômeno resulta em ganhos significativos de resistência.

Após a análise dos ensaios de caracterização e classificação, pode-se afirmar com segurança que o material em questão atende aos requisitos satisfatórios estabelecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para solos utilizados na construção de bases de estradas de solo-cimento.

Portanto, é razoável concluir que, ao projetar pavimentos de solo-cimento para vias de alto tráfego em camadas de base, o teor de umidade incorporado na mistura deve levar em consideração não apenas os resultados do ensaio de compactação, mas também as perdas de umidade devido à evaporação e hidratação durante o período entre a homogeneização, espalhamento e compactação final. Isso garante a compensação adequada dessas perdas de umidade.

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

- Realizar um dimensionamento com o material estabilizado, comparando com uma estrutura dimensionada com o material natural;
- Aplicar diferentes tipos de energia de compactação ao mesmo solo em estudo;

- Realizar a análise com um menor teor de solo-cimento considerando também outros tipos do aglomerante, levando em conta a sua viabilidade financeira.

6 REFERÊNCIAS

ABCP.: **Associação Brasileira de Cimento Portland, 2023.** Guia básico de utilização do cimento Portland. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2023. Disponível em: < <https://abcp.org.br/cimento/> <https://abcp.org.br/cimento/tipos/> > Acesso em: 05 de setembro de 2023.

BATALIONE, Giovane. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedreira de uma rocha granítica.** 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

BRASIL. DNER-ME 035, de 22 de junho de 1995. **Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem,** Disponível em: < https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dner_me_035_95.pdf >. Acesso em: 08 de setembro de 2023.

BRASIL. DNER-ME 041, de 25 de abril de 1994. **Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem,** Disponível em: < https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner_me_041_94-1.pdf >. Acesso em: 08 de setembro de 2023.

BRASIL. DNER-ME 093, de 25 de abril de 1994. **Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem,** Disponível em: < https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner_me_093_94.pdf >. Acesso em: 08 de setembro de 2023.

BRASIL. DNER-ME 213, de 25 de abril de 1994. **Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem,** Disponível em: < https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner_me_213_94.pdf >. Acesso em: 08 de setembro de 2023.

CANEPPELE, J. W. **Estabilização de um solo residual com adição de cimento Portland**. 2016. 72 f. Dissertação em Engenharia Civil – Centro Universitário Univates, Lajeado. 2016

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 6. Ed, volume 1. 234 p. Disponível em: < <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/05/mecanica-solos-fundamentos-vol1-6ed-caputo.pdf> >. Acesso em: 05 de setembro de 2023.

DAS Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2016. p. 63 a 140. Tradução: EZ2Translate.

FRANÇA, Fabrício Carlos. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”**. 2003. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2003. Disponível em: < <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/9669> > Acesso em: 05 de setembro de 2023.

LIMA, D. A. S. **Efeito da adição de cimento Portland e rap na estabilização de solo argiloso da formação Guabirotuba**. 2020. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. Rio de Janeiro, 2007. LTC Editores, 3. Ed. 391 p. Disponível em: < https://www.academia.edu/36533342/Livro_Introdu%C3%A7%C3%A3o_a_Mec%C3%A2nica_dos_Solos > Acesso em: 05 de setembro de 2023.

RDT. **Recursos para o Desenvolvimento Tecnológico (RDT): Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Estabilizados Quimicamente no Estado de Mato Grosso do Sul BR-163/MS**. Mato Grosso do Sul, 2018. Disponível em: < <https://portal.antt.gov.br/documents/20122/0/Estudo+do+Comportamento+Mec%C3%A2nico+de+Solos+Estabilizados+Quimicamente+no+Estado+do+MS%2C+Desenvolvido+pela+Concession%C3%A1.pdf/b281aa2b-d996-2683-6b94-24383aa630cf?t=1650988771054> > Acesso em: 05 de setembro de 2023.