



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ROGÉRIO RÉGIS MACHADO MELO FILHO

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO FINO COM CAL E CINZA VOLANTE PARA USO EM
PAVIMENTO**

CRATEÚS/CE

2023

ROGÉRIO RÉGIS MACHADO MELO FILHO

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO FINO COM CAL E CINZA VOLANTE PARA USO EM
PAVIMENTO**

Trabalho de conclusão do curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção Grau de Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Marcio Avelino de Medeiros

Coorientadora: Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa

CRATEÚS/CE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M486e Melo Filho, Rogério Régis Machado.
Estabilização de solo fino com cal e cinza volante para uso em pavimento / Rogério Régis Machado
Melo Filho. – 2023.
40 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2023.

Orientação: Prof. Me. Marcio Avelino de Medeiros.
Coorientação: Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa.

1. Estabilização. 2. cal. 3. cinza volante. 4. Solo-cal. 5. ISC. I. Título.

CDD 620

ROGÉRIO RÉGIS MACHADO MELO FILHO

ESTABILIZAÇÃO DE SOLO FINO COM CAL E CINZA VOLANTE PARA USO EM PAVIMENTO.

Trabalho de conclusão do curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção Grau de Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Marcio Avelino de Medeiros

Coorientadora: Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa

Aprovado em: 08/12/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Marcio Avelino de Medeiros (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Heloína Nogueira da Costa (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Daniela Lima Machado da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Matheus Silva Oliveira
Universidade de Brasília (UnB)

Ao meu amado avô, Luiz Deglauci Melo

(In memoriam)

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus por concluir essa etapa da minha vida com saúde, fé e bons amigos que essa fase me proporcionou, pelo conhecimento adquirido que me servirá tanto para minha atuação profissional como para minhas relações interpessoais, pela resiliência adquirida durante esses 5 longos anos, pelo meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Aos meus pais, Rogério Régis Machado Melo e Shenny Florêncio Mendes Lima, meu muitíssimo obrigado pelo apoio incondicional, financiamento e presença durante toda minha jornada acadêmica, ou melhor, durante toda minha vida, que ajudaram a construir a pessoa que eu sou hoje.

À minha irmã Amanda Florêncio Melo, pelo incentivo, apoio e disposição para conversar comigo durante todas minhas inquietações.

Ao meu Tio Tiago Florêncio Mendes Lima, pelo apoio e pelas orientações de sempre buscar me aprimorar na minha área.

Aos meus avôs Sérgio Florêncio e Suelly Mendes que me acolheram em sua casa durante todo o período de curso, me apoiando e incentivando.

À minha avó Francimar Machado (Anita), pelo apoio e incentivo.

Ao meu falecido avô Luiz Deglauci Melo que sempre acreditou no meu potencial, e me proporcionou bons momentos durante vida, me mostrando sempre sua alegria contagiante.

A todos os meus familiares que não pude citar, mas estão presentes no meu coração e também tiveram sua contribuição para minha formação acadêmica e pessoal.

À Michele Cunha Pontes, pelo apoio, incentivo e companhia durante todo o processo de finalização desse curso.

Ao técnico de laboratório da UFC campus Crateús Paulo Rubens por me acompanhar em toda etapa experimental e me auxiliar no desenvolvimento da pesquisa e da escrita desse trabalho.

Aos meus amigos, por sempre estarem juntos compartilhando experiências e alegrias.

Ao Prof. Me. Marcio Avelino, pela orientação e compromisso.

À Prof. Dra. Heloína Costa, pela orientação e compromisso.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar a estabilização de solos finos, tema de extrema importância para projetos de pavimentação, mostrando uma possível alternativa que, se viável e aprovada de acordo com o critério dos projetistas, poderia ser uma solução que possibilitasse aproveitar o solo local da obra, evitando a movimentação do solo e impactando menos o meio ambiente. O trabalho realizou o estudo de um solo fino e sua estabilização com cal e cinzas volantes para utilização como sub-base e base de pavimento, avaliando se as características do solo natural e do solo calcário com aditivo de cinza volante estão dentro dos critérios estabelecidos pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), 4 órgãos de prova foram divididos, SN (solo natural), SC5 (solo natural com 5% de calcário), SC7 (solo natural com 7% de calcário).cal) e SC10 (solo natural com 10% de cal). De acordo com o sistema de classificação TRB, o solo natural comportou-se como uma camada de subleito de pobre a pobre e tinha um IG de 7,5, o que significa que poderia não deve ser usado como uma camada de sub-base. Nos ensaios mecânicos, o SN apresentou ISC igual a 20% e expansão de 0,53%, o SC5 com ISC de 215% e expansão de 0,03%, o SC7 com ISC igual a 239% e expansão de 0,04%, e SC10 apresentou ISC de 256% e uma expansão de 0,05%, todos atendendo aos critérios básicos para pavimento de alto tráfego, com ISC maior ou igual a 80%, demonstrando que de acordo com o aumento de cal e cinzas volantes, o SN, que não poderia ser utilizado como camada de pavimento, agora possui números que lhe permitem atuar como camada base de alta resistência, capaz de suportar tráfego muito intenso.

Palavras-chave: Estabilização; cal; cinza volante; Solo-cal; ISC.

ABSTRACT

This work aims to study the stabilization of thin soils, this topic being of utmost importance for paving projects, showing a possible alternative that, if viable and approved according to the designers' criteria, could be a solution that makes it possible to use the local soil of the work, avoiding a soil movement and impacting the environment less. The work carried out the study of a fine soil and its stabilization with lime and fly ash for use as a pavement layer, evaluating whether the characteristics of the natural soil and the lime soil with fly ash additive are within the criteria established by the DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), 4 test bodies were divided, SN (natural soil), SC5 (natural soil with 5% lime), SC7 (natural soil with 7% lime) and SC10 (natural soil with 10 % lime). According to the TRB classification system, the natural soil behaved as a subgrade layer from poor to poor and had a GI of 7.5, meaning it could not be used as a subbase layer. In the mechanical tests, the SN presented an ISC equal to 20% and an expansion of 0.53%, the SC5 with an ISC of 215% and an expansion of 0.03%, the SC7 with an ISC equal to 239% and an expansion of 0.04%, and SC10 presented an ISC of 256% and an expansion of 0.05%, all meeting the basic criteria for high traffic pavement, with an ISC greater than or equal to 80%, demonstrating that according to the increase in lime and fly ash, the SN, which could not be used as a pavement layer, now presents numbers that allow it to act as a high-resistance base layer, being able to withstand very heavy traffic, depending on other design criteria.

Keywords: Stabilization; lime; fly ash; Soil-lime; ISC

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | – Malha rodoviária brasileira..... | 16 |
| Figura 2 | – Limites de consistência..... | 18 |
| Figura 3 | – Classificação de solos no sistema TRB..... | 19 |
| Figura 4 | – Classificação de solos no sistema SUCS..... | 20 |
| Figura 5 | – Diagrama de plasticidade..... | 21 |
| Figura 6 | – Fluxograma do método investigativo..... | 25 |
| Figura 7 | – Coleta de amostra de jazida/ Coordenadas GPS em UTM..... | 26 |
| Figura 8 | – Nomenclatura das amostras..... | 27 |
| Figura 9 | – Limite de liquidez..... | 29 |
| Figura 10 | – Granulometria solo natural..... | 30 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|--|----|
| Tabela 1 | – Resultado das curvas de compactação..... | 33 |
| Tabela 2 | – Resultado do ISC – SN..... | 34 |
| Tabela 3 | – Resultado do ISC – SC5..... | 35 |
| Tabela 4 | – Resultado do ISC – SC7..... | 36 |
| Tabela 5 | – Resultado do ISC – SC10..... | 37 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | | |
|-----------|----------------------------------|----|
| Gráfico 1 | – Curva de compactação SN..... | 31 |
| Gráfico 2 | – Curva de compactação SC5..... | 31 |
| Gráfico 3 | – Curva de compactação SC7..... | 32 |
| Gráfico 4 | – Curva de compactação SC10..... | 33 |
| Gráfico 5 | – ISC - SN..... | 34 |
| Gráfico 6 | – ISC – SC5 - Corrigido..... | 35 |
| Gráfico 7 | – ISC – SC7 - Corrigido..... | 36 |
| Gráfico 8 | – ISC – SC10 - Corrigido..... | 37 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AASHTO | American Association of State Highway and Transportation Officials |
| CNT | Confederação Nacional de Transporte |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| DNER | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| IG | Índice de grupo |
| IP | Índice de Plasticidade |
| ISC | Índice de Suporte Califórnia |
| LC | Limite de Contração |
| LL | Limite de Liquidez |
| LP | Limite de Plasticidade |
| NBR | Norma Brasileira |
| NP | Não Plástico |
| SM | Areia siltosa |
| SUCS | Sistema Unificado de Classificação de Solos |
| TRB | Transportation Research Board |

SIMBOLOGIA QUIMICA

| | |
|----------------------|---------------------|
| CaCO_3 | Carbonato de Cálcio |
| CaO | Óxido de cálcio |
| CO_2 | Dióxido de Carbono |
| H_2O | Água |
| Ca (OH)_2 | hidróxido de cálcio |

SUMÁRIO

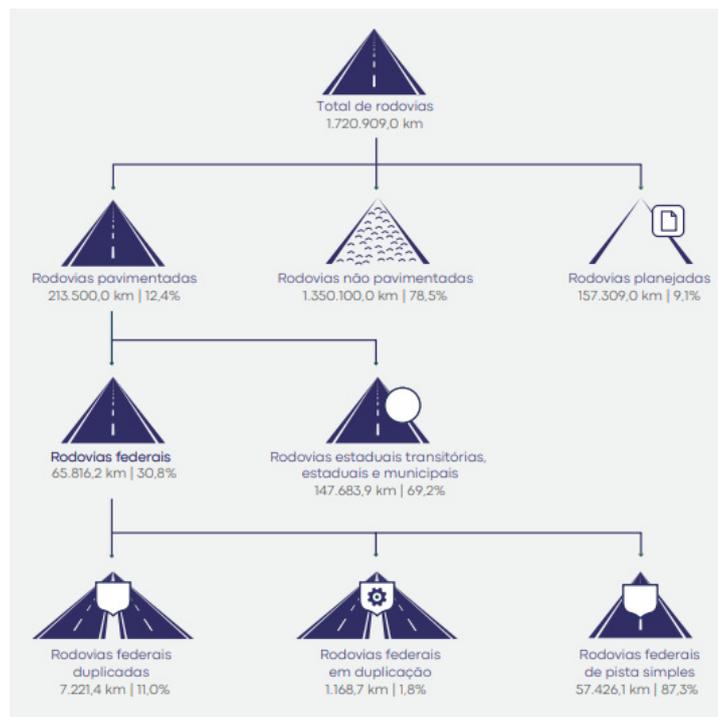
| | | |
|----------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1 | Objetivo geral | 17 |
| 1.2 | Objetivos específicos..... | 17 |
| 1.3 | Relevância e justificativa..... | 17 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 18 |
| 2.1 | Estudo do solo..... | 18 |
| 2.1.1 | <i>Limites de consistência.....</i> | 18 |
| 2.1.2 | <i>Classificação de solos.....</i> | 19 |
| 2.1.2.1 | <i>Sistema de classificação TRB.....</i> | 19 |
| 2.1.2.2 | <i>Sistema de classificação SUCS.....</i> | 20 |
| 2.1.3 | <i>Densidade real e massa específica.....</i> | 21 |
| 2.1.4 | <i>Compactação.....</i> | 21 |
| 2.1.5 | <i>ISC.....</i> | 22 |
| 2.2 | Tratamento de solos..... | 22 |
| 2.2.1 | <i>Definição.....</i> | 22 |
| 2.2.2 | <i>Tipos de estabilização.....</i> | 23 |
| 2.3 | Estabilização com cal hidratada..... | 23 |
| 2.3.1 | <i>Formas de aplicação.....</i> | 24 |
| 3 | MATERIAIS E METODOS..... | 25 |
| 3.1 | Solo..... | 26 |
| 3.1.2 | <i>Localização e escolha da jazida.....</i> | 26 |
| 3.2 | Cal hidratada..... | 26 |
| 3.3 | Cinza volante..... | 27 |
| 3.4 | Solo-cal mais aditivo de cinza volante..... | 27 |
| 3.4.1 | <i>Método de dosagem.....</i> | 27 |
| 3.5 | Caracterização física..... | 27 |
| 3.5.1 | <i>Limites de consistência.....</i> | 27 |
| 3.5.2 | <i>Granulometria.....</i> | 27 |
| 3.5.3 | <i>Densidade real e massa específica.....</i> | 28 |
| 3.6 | Ensaio mecânicos..... | 28 |
| 3.6.1 | <i>Compactação.....</i> | 28 |

| | | |
|-------|--------------------------------------|----|
| 3.6.2 | <i>ISC</i> | 28 |
| 4 | RESULTADOS | 29 |
| 4.1 | Limites de consistência | 29 |
| 4.2 | Granulometria | 30 |
| 4.3 | Compactação | 30 |
| 4.4 | ISC | 34 |
| 5 | CONCLUSÃO | 38 |
| | REFERÊNCIAS | 39 |

1 INTRODUÇÃO

A partir da década de 1950, o governo federal brasileiro aumentou seus investimentos nas redes de estradas, principalmente devido à expansão da indústria automobilística e à mudança da capital do país. Como resultado desses eventos, o transporte rodoviário se destaca em termos de uso e extensão, superando outros meios de transporte. Ele se tornou o principal método para o transporte de mercadorias. De acordo com as informações apresentadas no relatório estatístico de 2023 da Confederação Nacional de Transporte (CNT), a extensão total das estradas no Brasil é de 1.720.909,0 Km, com aproximadamente 12,4% dessas vias sendo pavimentadas, conforme a figura 1.

Figura 1: Malha rodoviária brasileira



Fonte: CNT (2023).

De acordo com o CNT, o sistema de pavimentação flexível é o mais prevalente no Brasil, representando aproximadamente 99% das rodovias construídas. Isso se deve, principalmente, ao custo inicial mais baixo de implantação, sendo o asfalto o componente primordial desse tipo de revestimento.

A fim de mudar esse cenário de 88,5% de rodovias não pavimentadas, é de suma importância o estudo de estabilização do solo com cal e cinza volante como uma possibilidade

dentro dos modelos de projeto de pavimentos flexíveis.

1.1 Objetivo geral

Avaliar a aplicabilidade do solo natural e solo-cal em camadas de pavimentos

1.2 Objetivos específicos

- i. Classificar o solo natural com base nos sistemas SUCS e AASHTO.
- ii. Estudar o comportamento mecânico da mistura solo-cal, em termos de índice de suporte Califórnia e expansão.
- iii. Definir o melhor teor de adição de cal e cinza volante no solo, para o uso em obras de pavimentação.
- iv. Analisar as camadas do pavimento em que o solo natural e/ou as misturas podem ser aplicados.

1.3 Relevância e justificativa

Essa linha de pesquisa é de suma importância para a área de construção de pavimentos, pois a estabilização de solos finos com cal e cinza volante, permitem uma melhora permanente na resistência a ação da água, do ISC (Índice de Suporte Califórnia) e da trabalhabilidade, tornando possível utilizar esses solos em camadas de base e sub-base de pavimentos.

Quando a estabilização de solos finos com cal e cinza volante são implementados em projetos construtivos de pavimento, possibilitando o uso do solo local, haverá uma economia na não substituição do solo existente por outro de melhor qualidade, reduzindo, também, os impactos ambientais decorrentes do transporte e deposição dos solos envolvidos

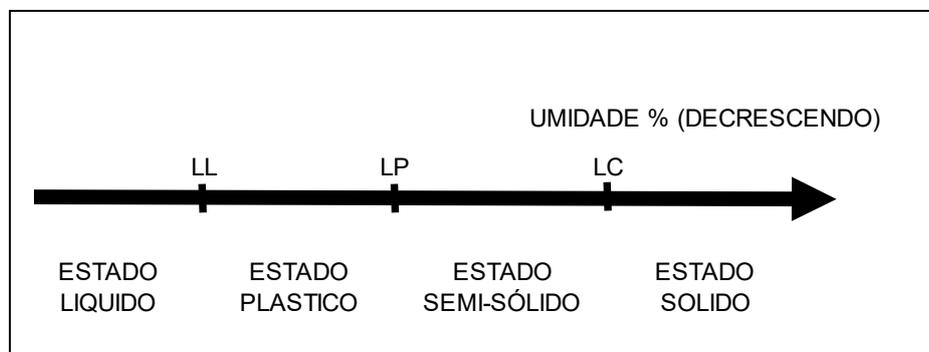
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estudo do solo

2.1.1 Limites de consistência

À medida que a umidade de um solo diminui, seu comportamento transita por diferentes estados físicos, cada um com características distintas. Inicialmente, quando o solo possui alta umidade, ele se assemelha a um fluido denso, assumindo um estado líquido. Conforme a água evapora, o solo começa a endurecer, alcançando o LL (Limite de liquidez), no qual perde sua fluidez, mas ainda pode ser facilmente moldado e manter sua forma, representando o estado plástico. Com a contínua perda de umidade, o estado plástico se dissipa até atingir o LP (Limite de plasticidade), momento em que o solo se desintegra ao ser manipulado, caracterizando o estado semi-sólido. Prosseguindo com a secagem, o solo gradualmente atinge o estado sólido. O ponto de transição entre esses estados é marcado pelo teor de umidade denominado LC (Limite de consistência), representando a fronteira entre o estado semi-sólido e o sólido. Conforme mostra a figura 2.

Figura 2: Limites de consistência



Fonte: Pinto (1988)

O IP (Índice de plasticidade) é calculado como a diferença entre o LL e LP, expresso pela fórmula $IP = LL - LP$. Este índice delimita a faixa na qual um solo se encontra em seu estado plástico. Ele serve como um indicador significativo do caráter do solo, sendo máximo para argilas e mínimo, ou até nulo, para areias. Quanto maior o valor do IP, maior é a plasticidade do solo. Em casos onde o material não apresenta plasticidade, como é o caso das areias, o índice de plasticidade é considerado nulo e representado como $IP = NP$ (Não plástico).

2.1.2 Classificação de solos

De acordo com Pinto (2006) a importância da classificação dos solos é poder estimar o provável comportamento de um determinado solo, ou até, orientar um programa de investigação necessário para permitir a melhor análise de um problema. Há vários métodos de se classificar o solo, seja pela sua origem, pela sua evolução, pela presença ou não de matérias orgânicas, pelo preenchimento de vazios e pela estrutura.

2.1.2.1 Sistema de classificação TRB

Nessa classificação os solos são divididos em grupos e subgrupos, em função da sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. Conforme mostra a figura 3. De acordo com a AASHTO, determina-se o grupo do solo por processo de eliminação da esquerda para a direita, no quadro de classificação.

Figura 3: Classificação de solos no sistema TRB.

| CLASSIFICAÇÃO GERAL | MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200 | | | | | | | MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS | | | |
|--|--|-----------|--|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------------------------|-----------------|---------|---------------------------------|
| | A - 1 | | A - 3 | A - 2 | | | | A - 4 | A - 5 | A - 6 | A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6 |
| CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS | A - 1 - A | A - 1 - B | | A - 2 - 4 | A - 2 - 5 | A - 2 - 6 | A - 2 - 7 | | | | |
| Granulometria - % passando na peneira | | | | | | | | | | | |
| 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.

2.1.2.2 Sistema de classificação SUCS

O Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) utiliza a análise das características de textura e plasticidade do solo para categorizá-los com base em seu desempenho em aplicações como construção de estradas, aeroportos, aterros e fundações.

Para a classificação utilizando esse sistema, os fatores levados em consideração são:

- As percentagens de pedregulhos, areias e finos.
- Forma da curva granulométrica.
- Limites de Consistência.

Tais fatores são analisados e agrupados conforme mostra a figura 4.

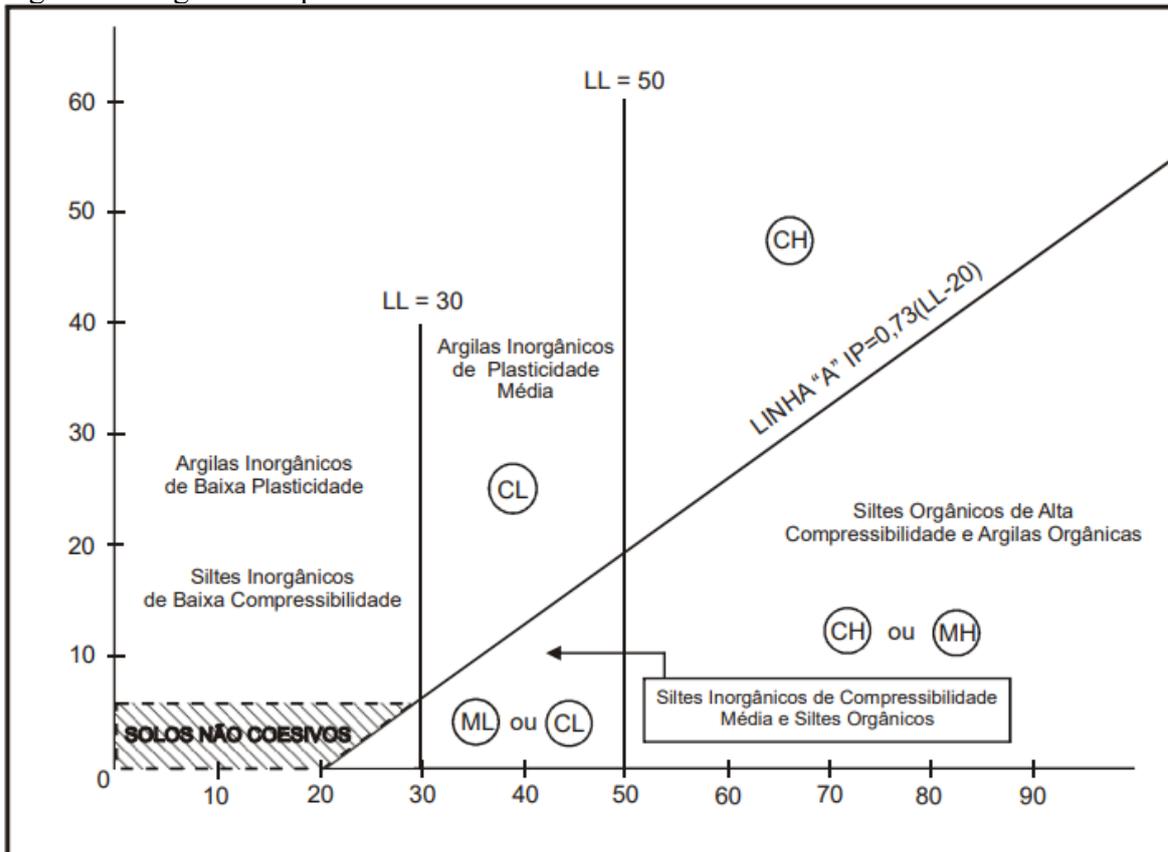
Figura 4: Classificação de solos no sistema SUCS.

| | | | | |
|---|--|----------------------|---|---|
| SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: mais de 50% retido na peneira nº 200 | Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4 | Pedregulho sem finos | GW | Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped.com pouco ou nenhum fino. |
| | | | GP | Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino. |
| | | Pedregulho com finos | GM | Pedregulhos siltosos ou misturas de ped.areia e silte. |
| | | | GC | Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped.areia e argila. |
| | Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4 | Areias sem finos | SW | Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino. |
| | | | SP | Areias mau 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 nº 200 | SILTES e ARGILAS com $LL \leq 50$ | ML | Siltes inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas. | |
| | | CL | Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas. | |
| | | OL | Siltes orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade. | |
| | SILTES e ARGILAS com $LL > 50$ | MH | Siltes - Areias finas ou siltes micáceos - Siltes 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.

Proposto pelo professor Artur Casagrande na década de 30, também há, um diagrama cartesiano, no qual utiliza o LL em abcissas e o IP em ordenadas, para complementar o a classificação desse sistema, conforme mostra a figura 5.

Figura 5: Diagrama de plasticidade



Fonte: DNIT- Manual de pavimentação, 2006 - 3ª edição.

2.1.3 Densidade real e massa específica

O ensaio de densidade real utilizado no solo natural é realizado para determinar a quantidade de matéria sólida presente no solo em relação ao seu volume total, excluindo os vazios.

O ensaio de massa específica utilizado na cal e na cinza volante foram realizados para determinar a quantidade de massa que um determinado volume de material em pó possui.

2.1.4 Compactação

O ensaio de compactação é um procedimento da engenharia geotécnica, utilizado para determinar a Massa específica aparente máxima que um solo pode atingir e a umidade ótima correspondente para alcançá-la.

Os resultados do ensaio fornecem a chamada "massa específica aparente máxima", que representa a densidade máxima que o solo pode alcançar sob determinadas condições de

compactação. Além disso, determina-se a "umidade ótima", o teor de umidade ideal necessário para atingir essa densidade máxima.

2.1.5 ISC

Segundo Pinto (1988) o ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC) é uma ferramenta crucial na avaliação da adequação dos solos para uso como camada de pavimentação. Esse ensaio fornece informações cruciais sobre a expansibilidade e a resistência do solo, parâmetros essenciais na determinação da sua viabilidade para suportar estruturas de pavimento. A expansibilidade do solo oferece uma compreensão abrangente da capacidade do solo de resistir a deformações e alterações dimensionais sob condições de carregamento, já a capacidade de suporte influencia diretamente na capacidade do solo de resistir às cargas do tráfego, impactando a segurança e a vida útil das vias pavimentadas.

2.2 Tratamento de solos

2.2.1 Definição

Conforme Cruz (2008) a expressão "melhoramento de solos" é comumente empregada para descrever uma técnica que envolve a alteração de um solo específico com a finalidade de adaptá-lo a um uso particular. Dependendo da finalidade do melhoramento de solo proposto, o tratamento pode constituir uma técnica de:

- **Melhoria:** uma intervenção que produz resultados praticamente imediatos, visando aperfeiçoar as características geotécnicas do solo. Essa ação proporciona uma melhoria temporária no comportamento dos materiais em resposta a cargas aplicadas.
- **Estabilização:** método empregado para efetuar uma mudança substancial, em uma escala de médio a longo prazo, nas propriedades dos solos, especialmente os argilosos. Isso se manifesta como um processo gradual de endurecimento da mistura após a compactação ao longo do tempo.

De acordo Van Impe (1989), há três grupos de técnicas de melhoramento de solos:

- Melhoramento temporário, ou seja, limitado a um certo período;
- Melhoramento permanente, no qual são aplicadas técnicas de forma a melhorar o solo sem adição de materiais,
- Melhoramento permanente, recorrendo à adição de materiais.

Conforme as definições apresentadas, observa-se que o objetivo do tratamento que esse trabalho se propõe a fazer, está classificado como uma estabilização ou um melhoramento permanente recorrendo à adição de materiais que são a cal e a cinza volante.

2.2.2 *Tipos de estabilização*

De acordo com Guimarães (2002), existem diversas metodologias em aplicação na estabilização de solos, as quais podem ser categorizadas em dois conjuntos distintos:

- Estabilização mecânica envolve aprimorar as propriedades do solo ajustando a sua distribuição de tamanhos de partículas e plasticidade, mediante a adição ou remoção de frações específicas do solo, de modo a alcançar os parâmetros definidos pelas normas.
- Estabilização química implica na alteração duradoura das características físicas e mecânicas do solo por meio da introdução de aditivos como cal, cimento Portland, silicatos de sódio, substâncias asfálticas, resinas, compostos de fósforo, em quantidades que sejam adequadas para promover melhorias significativas nessas propriedades.

A escolha entre diferentes métodos de estabilização é impactada por diversos elementos, incluindo fatores econômicos, o propósito específico da construção, as propriedades dos materiais envolvidos e as características do solo que precisam ser ajustadas.

2.3 **Estabilização com cal hidratada**

A cal utilizada para estabilizar ou melhorar os solos é obtida através da calcinação de rochas carbonatadas a uma temperatura de aproximadamente 1000°C. Essas rochas são compostas principalmente por carbonato de cálcio e/ou carbonato de cálcio e magnésio. Esse processo resulta em óxidos de cálcio (CaO) e cálcio magnésio (CaO – MgO), conhecidos genericamente como cal virgem, cal aérea ou cal viva, de acordo com Guimarães (2002).

As equações 1 e 2 representam, respectivamente, as reações envolvidas na formação da cal virgem e da cal hidratada.



De acordo com Guimarães (1998), ao incorporar cal ao solo, o pH, que geralmente varia entre 4,5 e 6,5, aumenta para 11-12. Isso estabelece condições alcalinas nas quais os minerais

da fração argila e até mesmo o quartzo podem interagir com a cal, resultando na formação de aluminatos, silicatos e aluminossilicatos de cálcio hidratados em quantidades significativas. Todos esses produtos têm um impacto notável no processo de estabilização devido às suas propriedades cimentícias

Segundo Guimarães (1998), a cal é identificada como o principal derivado de calcários, dolomitos e conchas calcárias devido à sua tradição, utilidade diversificada e benefícios econômicos e sociais. Sua obtenção envolve uma reação química simples conhecida como calcinação, mas atingir o padrão de qualidade ideal requer conhecimento e habilidade. O produto destaca-se também pela versatilidade na escala de produção, que vai desde fornos rudimentares de pequena capacidade até fornos altamente tecnológicos e de produção volumosa, tornando-a reconhecida globalmente.

2.3.1 Formas de aplicação

Silva (2010) descreve que, de maneira geral, a administração da cal ao solo ocorre ao dispersar a cal em uma área específica. Em seguida, ocorre a mistura com o solo utilizando um veículo equipado com dispositivo de mistura, e, por último, após um intervalo de espera, é realizada a compactação. No entanto, existem alternativas para a implementação dessa técnica de estabilização:

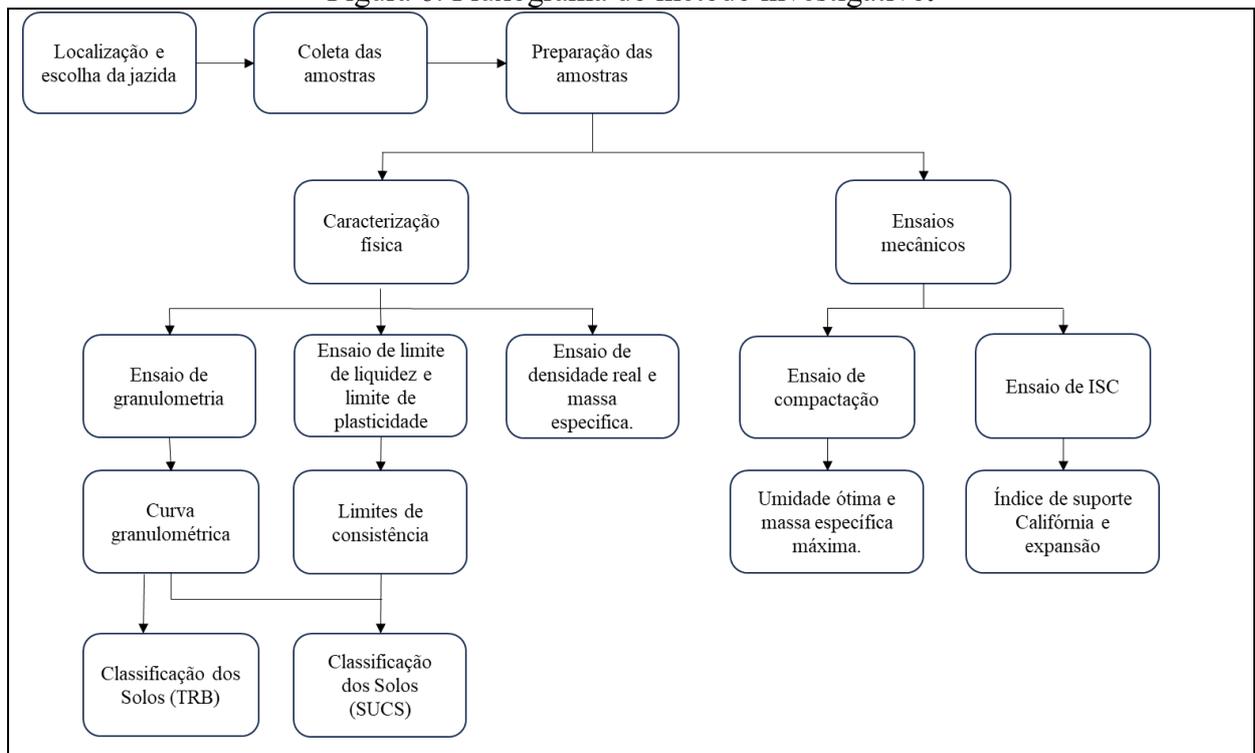
- Utilizando estacas de cal, este método envolve perfurações de pequeno diâmetro que são preenchidas com cal. Essas estacas são empregadas para aprimorar a estabilização de taludes, trazendo como vantagem a capacidade de desidratar o solo ao redor. Contudo, a longo prazo, o solo tende a recuperar seu teor original de água e pressão intersticial, enquanto a estaca permanece revestida por uma fina crosta.
- Por meio do uso de colunas de solo, as quais foram estabilizadas com cal, foram desenvolvidas de maneira específica para aprimorar a capacidade de carga e reduzir o assentamento de argilas moles. Esse método envolve a remodelação do solo no local, combinando-o simultaneamente com cal através do emprego de injetores rotativos equipados com lâminas. A ação conjunta da mistura e da injeção resulta em uma coluna de solo estabilizado. Os produtos mais comumente utilizados são o óxido e o hidróxido de cálcio. A resistência ao corte não drenada do solo estabilizado em comparação com o solo natural é significativamente maior, variando de 10 a 40 vezes, dependendo do valor inicial (VAN IMPE, 1989).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa secção são apresentados os materiais e métodos utilizados na pesquisa, especificando as normas utilizadas. Os ensaios de granulometria, densidade real, compactação, limite de liquidez e plasticidade foram realizados no Laboratório de geotecnia da UFC – Campus Crateús, o ensaio de massa específica foi realizado no Laboratório de Materiais da UFC – Campus Crateús, já o ensaio de ISC foi realizado no Laboratório de geotecnia da UFC – Campus Fortaleza.

A metodologia adotada investigou a caracterização física junto de ensaios mecânicos. Na figura 6, pode-se observar como se deu o sequenciamento da pesquisa.

Figura 6: Fluxograma do método investigativo.



Fonte: Autor (2023).

3.1 Solo

3.1.1 Localização e escolha da jazida

O Critério para a escolha da jazida, foi pela sua aplicação na obra de pavimentação do contorno de Crateús no qual ela foi utilizada como base do pavimento. Conforme mostra a figura 7, a jazida possui coordenadas UTM datum WGS 84, fuso 24M coordenadas: x: 9428471, y: 0313029

Figura 7: Coleta de amostra de jazida/ Coordenadas GPS em UTM.



Fonte: Autor (2023).

3.2 Cal hidratada

Pó seco obtido pela hidratação adequada de cal virgem constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio, com pequena quantidade de impurezas (outros elementos).

A cal utilizada como aditivo foi a CAL CARBOMIL CH-I, a cal CH-I apresenta propriedades distintas que a tornam adequada para uma ampla gama de aplicações na construção civil e em outros setores. Comumente caracterizada por sua alta finura e pureza, essa variedade de cal é especialmente indicada para compor argamassas, estabilizar solos, fabricar tintas e corrigir a acidez do solo na agricultura, entre outras utilidades.

3.3 Cinza volante

A cinza volante é um rejeito industrial com características pozolânicas e proveniente da combustão do carvão vapor pulverizado utilizado em usinas termoeletricas. A cinza da pesquisa foi fornecida pela Usina Termoeletrica Energia Pecém localizada no complexo industrial e portuario do Pecém, situado no município de São Gonçalo do Amarante – Ceará.

3.4 Solo-cal mais aditivo de cinza volante

3.4.1 Método de dosagem

Segundo Vargas (1981), a porcentagem de cal para se alcançar um ISC desejado (por exemplo, 50%), seria de adotar 2% a 5% para solos granulares e entre 5% a 10% para solos plásticos.

Dessa forma, após ser feito o ensaio para determinar o IP e identificar o solo como altamente plástico, foram escolhidas as porcentagens de 5, 7 e 10% para a realização dessa pesquisa. A figura 8 mostra a nomenclatura das amostras e o que elas representam. Foi colocado um aditivo de cinza volante nas misturas de solo com cal com a massa equivalente à metade da massa utilizada de cal na mistura.

Figura 8: Nomenclatura das amostras.

| | |
|------|----------------|
| SN | SOLO NATURAL |
| SC5 | SOLO + CAL 5% |
| SC7 | SOLO + CAL 7% |
| SC10 | SOLO + CAL 10% |

Fonte: Autor (2023).

3.5 Caracterização física

3.5.1 Limites de consistência

Para determinar o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade do solo natural foram utilizados, respectivamente, as normas NBR 6459/2016 e NBR 7180/2016.

3.5.2 Granulometria

A análise granulométrica, realizada conforme as diretrizes da norma NBR 7181/2016, permite identificar as dimensões e a distribuição das partículas em uma amostra de solo

deformada. Esse procedimento é realizado por meio do ensaio de granulometria. Após a etapa de peneiramento, as porcentagens retidas e, por consequência, as porcentagens que passam em cada peneira são conhecidas, o que revela a distribuição e as dimensões das partículas do solo. Esses dados geram a curva granulométrica, em que o eixo horizontal representa o diâmetro dos grãos (correspondente ao diâmetro na peneira) e o eixo vertical mostra as porcentagens que passam nas respectivas peneiras. Essa representação visualiza os intervalos de variação no tamanho das partículas do solo.

3.5.3 Densidade real e massa específica

Para a determinação da densidade real do solo natural foi utilizada a norma DNER 093/1994, na qual foi constatado que na temperatura ambiente de 23°C a densidade do SN é igual a 2,689 gramas.

A determinação da massa específica da cal e da cinza volante seguiu os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 16605/2017. Os resultados revelaram que a massa específica da cinza volante é de 2,18 g/ml, enquanto a massa específica da cal foi determinada em 2,63 g/ml.

3.6 Ensaios mecânicos

3.6.1 Compactação

Para realizar os ensaios de compactação e obter relação entre o teor de umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima, foi utilizado a norma NBR 7182/2016.

3.6.2 ISC

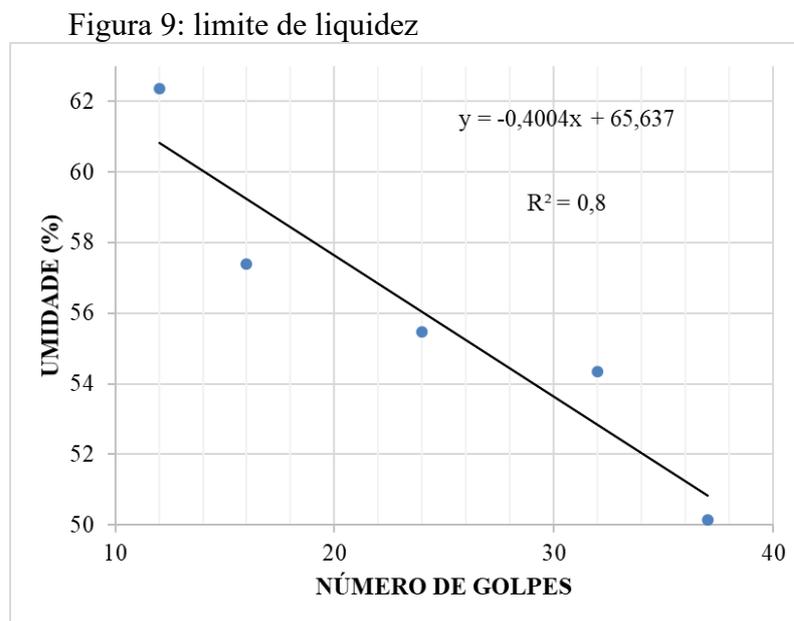
De acordo com Pinto (1988) este ensaio é de grande valor na técnica rodoviária, é a base do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis. O ensaio Proctor normal foi escolhido para essa pesquisa, consiste em moldar o corpo de prova com cinco camadas, cada uma com 12 golpes. Foi utilizado a norma NBR 9895/2016. Calculada conforme a equação 3.

$$ISC = \frac{\text{Pressão Calculada ou Pressão Corrigida}}{\text{Pressão Padrão}} \quad (3)$$

4. RESULTADOS

4.1 Limites de consistência

O limite de liquidez obtido foi de 56%, calculado conforme a fórmula da Figura 9. O limite de plasticidade obtido foi de 32%. Conforme o resultado do LL e do LP. Obtemos o índice de plasticidade, que é a diferença entre as duas, resultando em um IP igual à 24%. Segundo Pinto (1988) o IP maiores que 15%, classifica o solo como altamente plástico, o que confirma a utilização dos percentuais de incorporação de cal adotados na pesquisa.

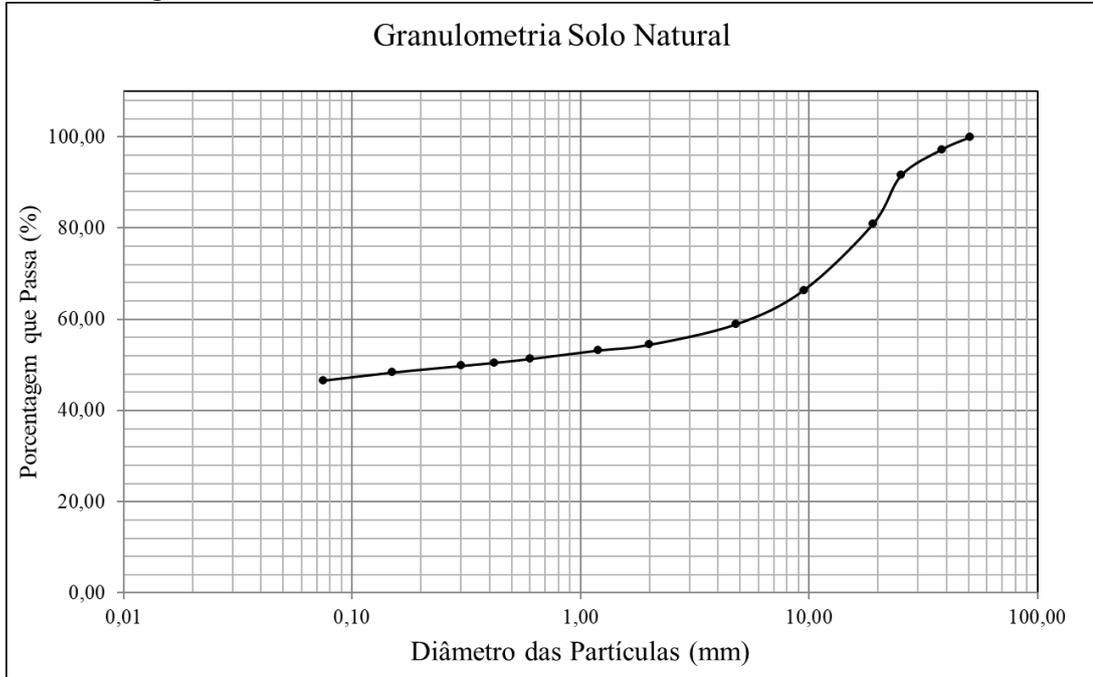


Fonte: Autor (2023).

4.2 Granulometria

O ensaio de granulometria por peneiramento do solo natural resultou a Figura 10.

Figura 10: Granulometria solo natural.



Fonte: Autor (2023).

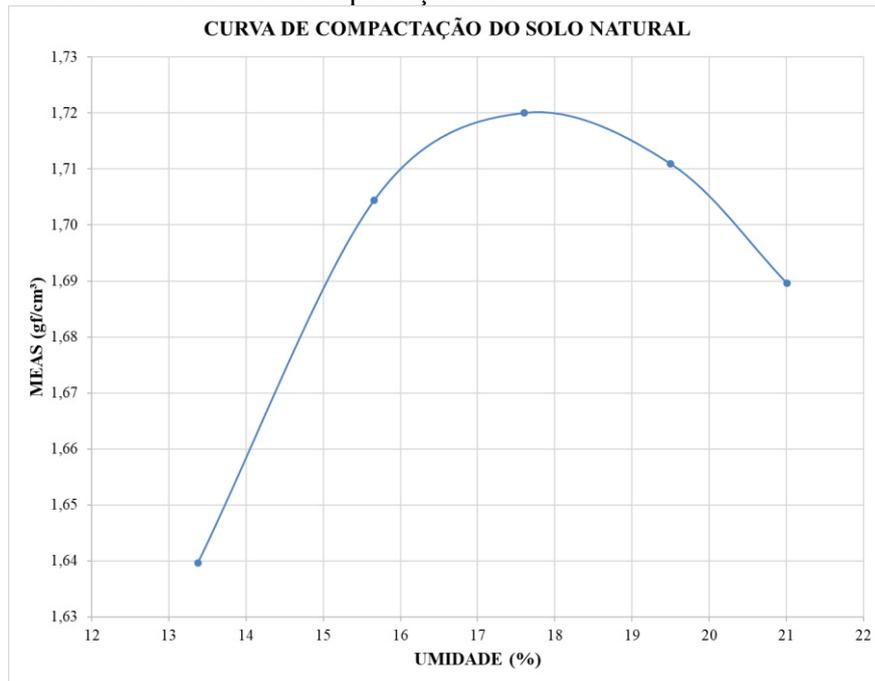
O solo natural é classificado de acordo com o sistema TRB como um solo de material argiloso de classificação de grupo A-7-5, com IG igual à 7,45, demonstrando ser um solo de comportamento como camada de subleito de sofrível a mal.

Já no sistema de classificação da SUCS, ele é classificado como areia siltosa.

4.3 Compactação

Com os ensaios realizados para o SN, foi gerado o gráfico 1, para sua curva de compactação apresentando uma umidade ótima de 17,6% e uma massa específica aparente seca máxima de 1,72 gf/cm³.

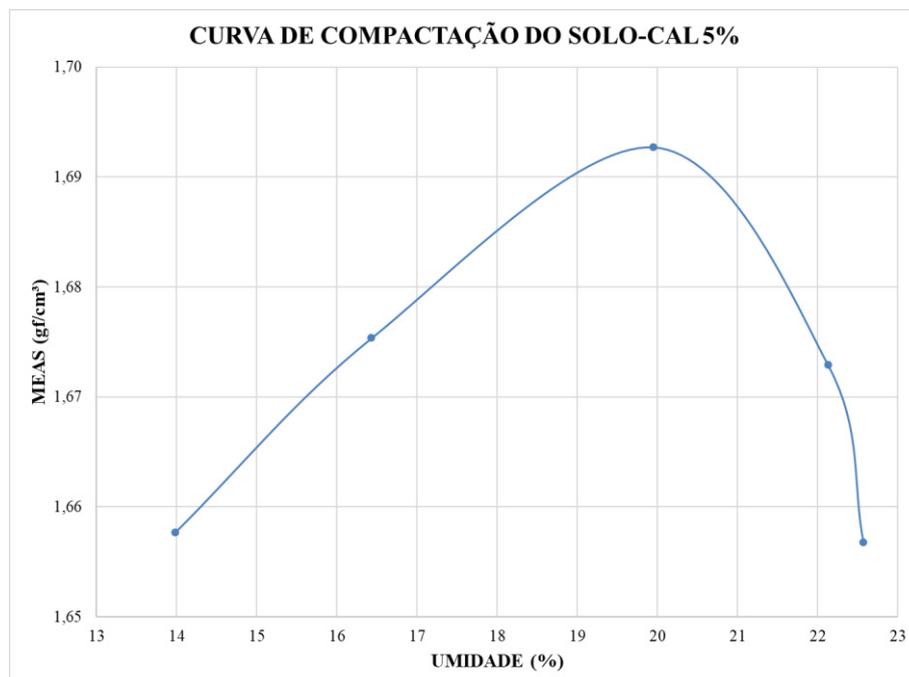
Gráfico 1: Curva de compactação SN



Fonte: Autor (2023).

Para a análise do SC5, foi feito o gráfico 2 da curva de compactação, onde podemos verificar uma umidade ótima de 19,95% e uma massa específica aparente seca máxima de 1,69 gf/cm^3 , essa curva mostra que ao adicionar a cal e a cinza volante ao solo natural a curva de compactação alarga mais para a direita, e diminui de tamanho, apresentando resultados de umidade ótima mais elevados e resultados de MEASM (Massa específica aparente seca máxima) menores.

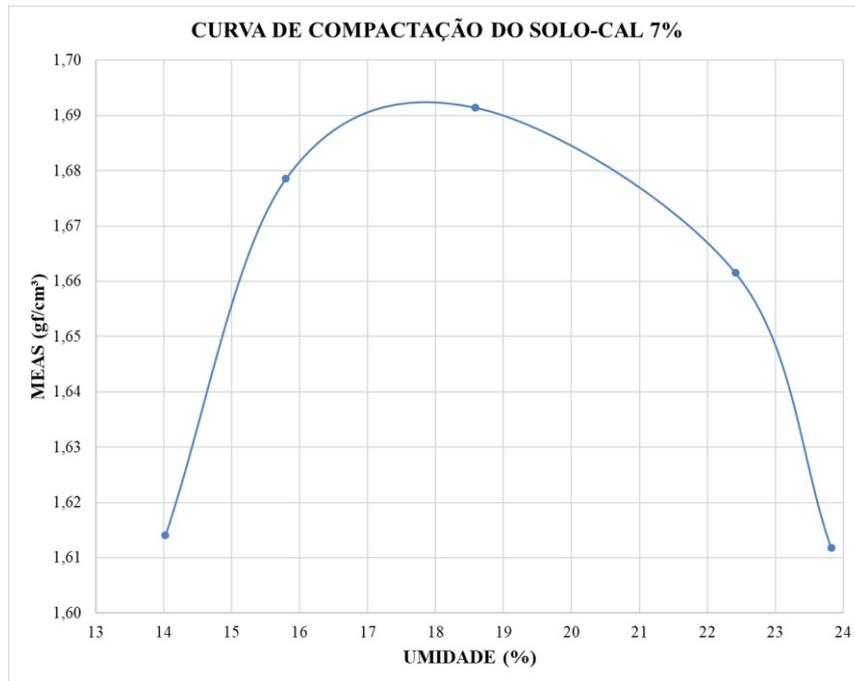
Gráfico 2: Curva de compactação SC5



Fonte: Autor (2023).

A análise dos resultados do ensaio de compactação do SC7 resultou no Gráfico 3, onde temos como umidade ótima alcançada de 18% e a MEASM não sofrendo alteração continuando com 1,69 gf/cm³

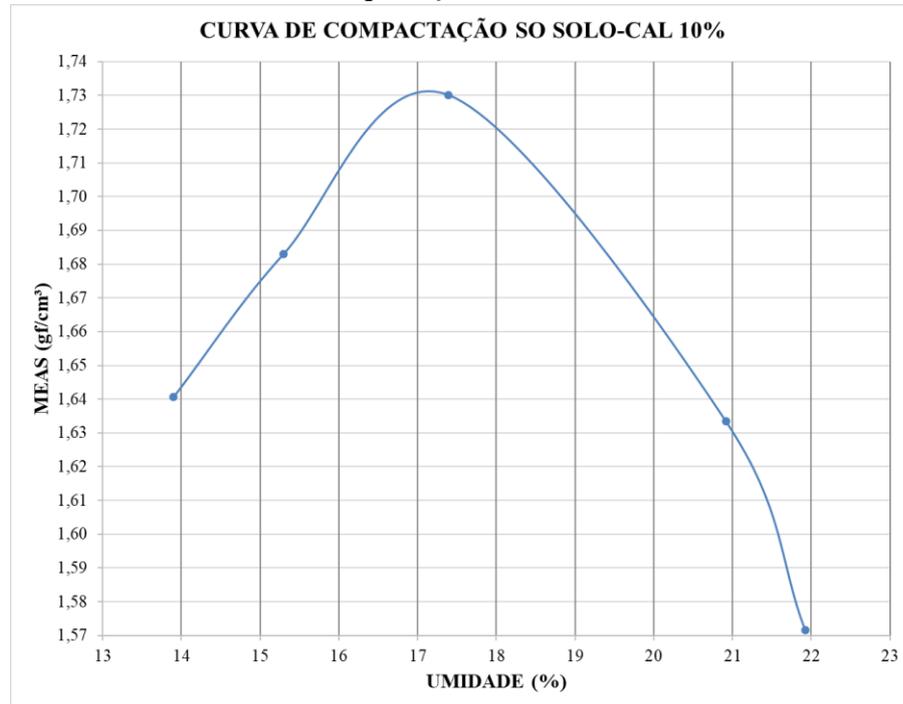
Gráfico 3: Curva de compactação SC7



Fonte: Autor (2023).

Os resultados do ensaio de compactação do SC10, resultou no Gráfico 4 de curva de compactação, onde a umidade ótima mais uma vez reduziu para 17% e a MEASM aumentou para um valor ainda maior quando comparado ao solo natural, resultando em 1,73 gf/cm³.

Gráfico 4: Curva de compactação SC10.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com as leituras dos gráficos de curva de compactação, foi gerada a Tabela 1, na qual mostra a síntese das umidades ótimas e da massa específica aparente seca máxima. Podemos analisar que de acordo com o teor da mistura de cal e cinza volante no solo natural há um aumento da umidade ótima, que conforme o aumento de cal vai reduzindo, mas os valores ainda sim, não apresentaram umidades ótimas abaixo do que foi observado no SN. Já a MEASM apresentou uma redução quando comparado ao solo natural com exceção do SC10 cujo valor foi maior.

Tabela 1: resultados das curvas de compactação.

| | UMIDADE ÓTIMA (%) | MEASM (gf/cm³) |
|------|-------------------|----------------|
| SN | 17,6 | 1,72 |
| SC5 | 19,95 | 1,69 |
| SC7 | 18 | 1,69 |
| SC10 | 17 | 1,73 |

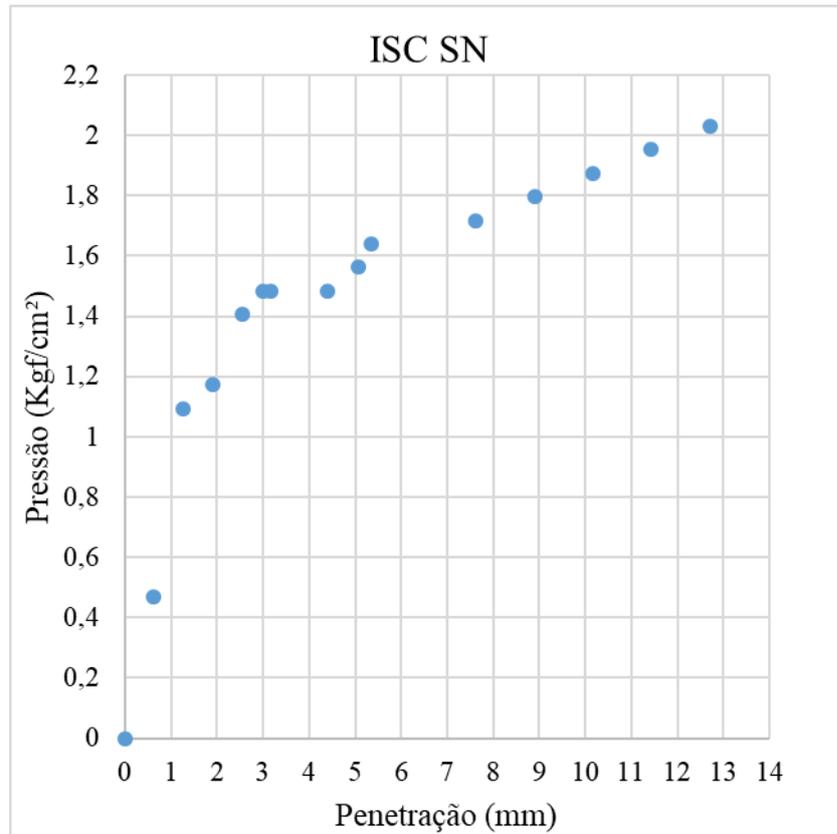
Fonte: Autor (2023).

Aqui se pode observar que conforme eu aumentei o teor, a superfície específica por mais que tenha aumentado, ela funcionou como uma matriz coesa, formando grumos que proporcionam a adesão de uma partícula de solo com outro, o que necessitou de uma menor quantidade de água porem resultou em maior densidade.

4.4 ISC

O gráfico 5 mostra a curva do ensaio do ISC do SN. Já a tabela 2 mostra os resultados obtidos do SN. Observa-se que o SN tem um ISC igual à 20% e uma expansão igual à 0,53%.

Gráfico 5: ISC – SN



Fonte: Autor (2023).

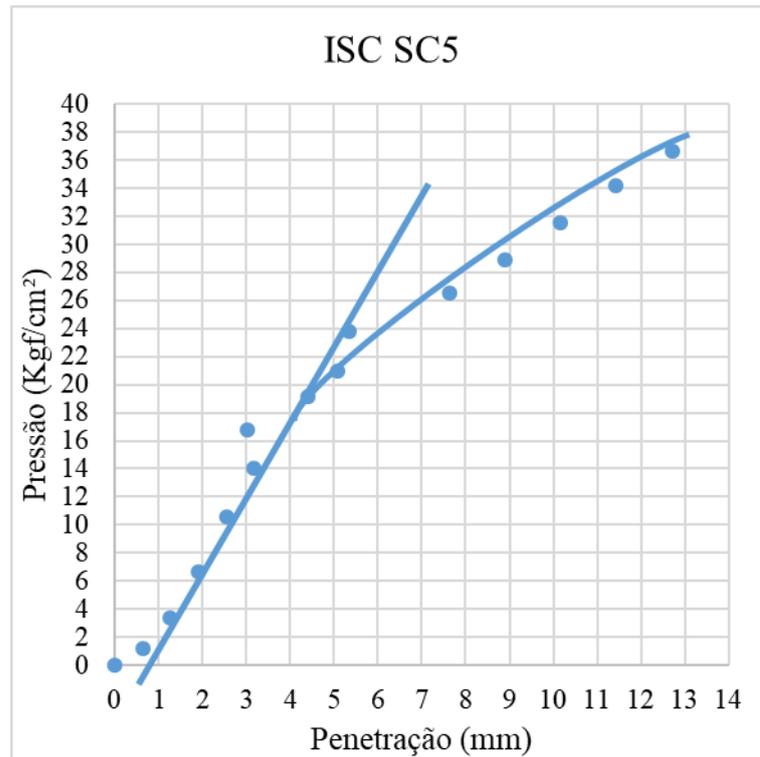
Tabela 2: Resultado do ISC - SN

| SN | | EXPANSÃO(%) | | 0,53 |
|-----------------|-----------|-------------|--------|-------|
| PENETRAÇÃO (mm) | CALCULADA | CORRIGIDA | PADRÃO | ISC % |
| 2,54 | 1,41 | - | 6,9 | 20 |
| 5,08 | 1,56 | - | 10,35 | 15 |

Fonte: Autor (2023).

O gráfico 6 mostra a curva do ensaio do ISC do SC5 corrigido. Já a tabela 3 mostra os resultados obtidos do SC5. Observa-se que o SC5 tem um ISC igual à 215% e uma expansão igual à 0,03%.

Gráfico 6: ISC – SC5 – Corrigido



Fonte: Autor (2023).

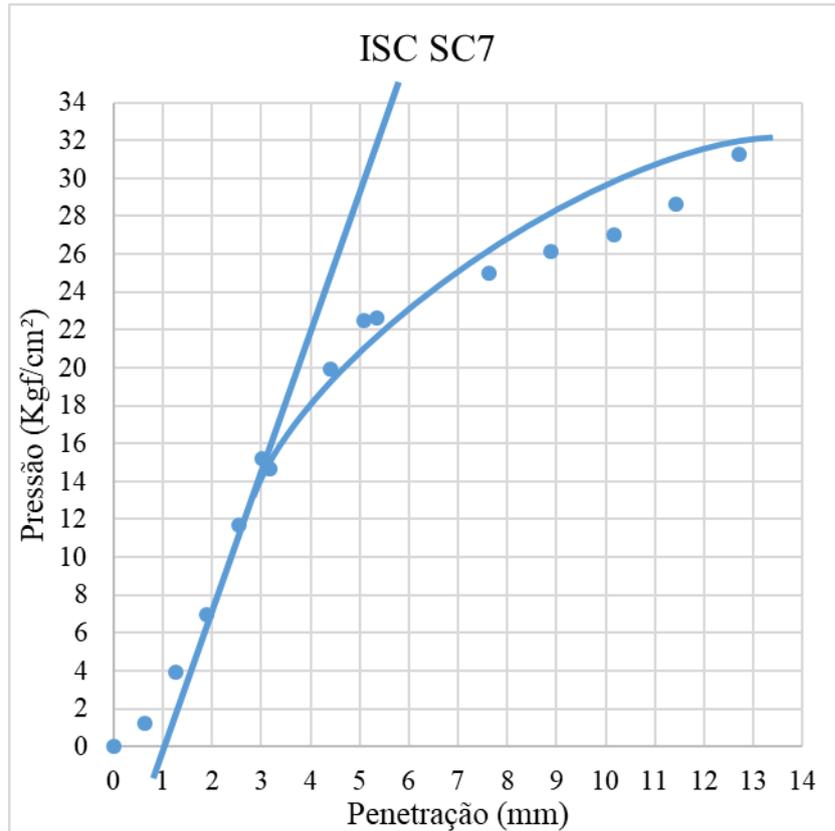
Tabela 3: Resultado do ISC – SC5

| SC5 | | | EXPANSÃO(%) | 0,03 |
|-----------------|-----------|-----------|-------------|-------|
| PENETRAÇÃO (mm) | CALCULADA | CORRIGIDA | PADRÃO | ISC % |
| 2,54 | 10,54 | 13 | 6,9 | 188 |
| 5,08 | 20,93 | 22,3 | 10,35 | 215 |

Fonte: Autor (2023).

O gráfico 7 mostra a curva do ensaio do ISC do SC7 corrigido. Já a tabela 4 mostra os resultados obtidos do SC7. Observa-se que o SC7 tem um ISC igual à 239% e uma expansão igual à 0,04%.

Gráfico 7: ISC – SC7 – Corrigido



Fonte: Autor (2023).

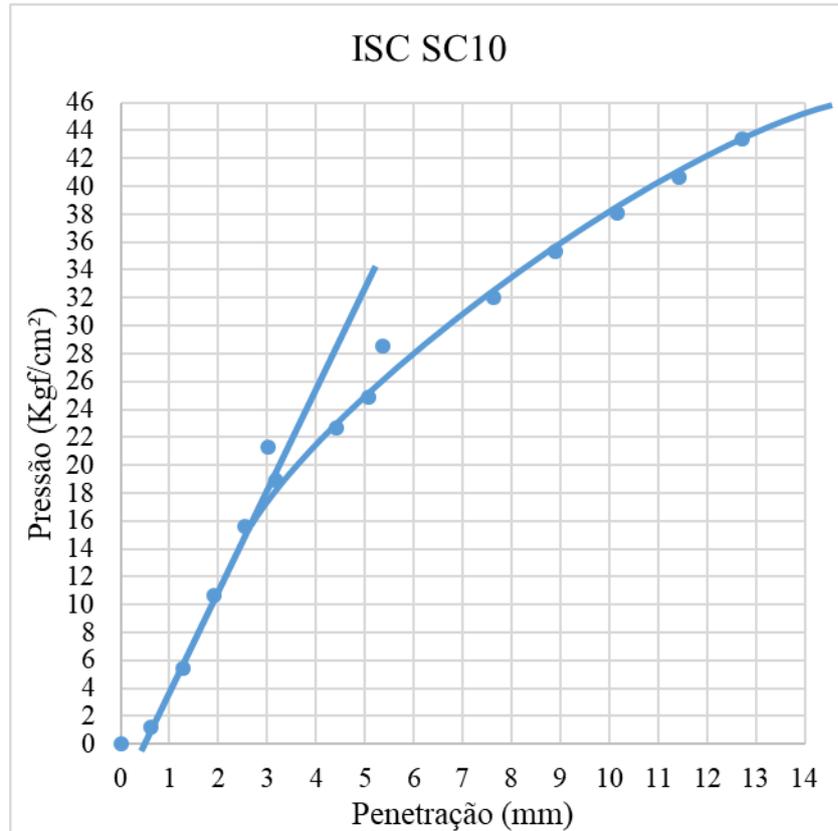
Tabela 4: Resultado do ISC – SC7

| SC7 | | | EXPANSÃO(%) | |
|-----------------|-----------|-----------|-------------|-------|
| PENETRAÇÃO (mm) | CALCULADA | CORRIGIDA | PADRÃO | ISC % |
| 2,54 | 11,72 | 16,5 | 6,9 | 239 |
| 5,08 | 22,49 | 23,5 | 10,35 | 227 |

Fonte – Autor (2023).

O gráfico 8 mostra a curva do ensaio do ISC do SC10 corrigido. Já a tabela 5 mostra os resultados obtidos do SC10. Observa-se que o SC10 tem um ISC igual à 256% e uma expansão igual à 0,05%.

Gráfico 8: ISC – SC10 – Corrigido



Fonte: Autor (2023).

Tabela 5: Resultado do ISC – SC10

| SC10 | | | EXPANSÃO(%) | 0,05 |
|-----------------|-----------|-----------|-------------|-------|
| PENETRAÇÃO (mm) | CALCULADA | CORRIGIDA | PADRÃO | ISC % |
| 2,54 | 15,62 | 17,5 | 6,9 | 254 |
| 5,08 | 24,84 | 26,5 | 10,35 | 256 |

Fonte: Autor (2023).

Nota-se que toda amostra com mistura de cal com cinza volante ao ser comparada com o SN, teve um aumento significativo de ISC e uma redução de expansão, já se comparamos as misturas de solo natural com cal e cinza volante entre elas, nota-se que conforme o aumento de cal ouve um aumento de ISC e de expansão.

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho analisou a estabilização de um solo arenoso siltoso com cal e cinza volante para utilização em camadas de pavimentação. A partir dos resultados, constatou-se que o solo natural, apesar de atingir os critérios de ISC e expansão, para ser utilizado como camada de sub-base de pavimento conforme a norma DNER_MT 667/22, não possui o IG dentro dos critérios, já as misturas de SC5, SC7 e SC10 apresentaram desempenho bom para serem utilizados tanto como sub-base, como base de pavimento. E com isso podemos concluir que:

- i) O SN apresenta ser um solo argiloso de comportamento como camada de subleito de sofrível a mau, de acordo com o sistema de classificação TRB. Já no sistema da SUCS o solo é classificado como um solo composto de areia siltosa. Essas classificações indicam que o solo possui uma quantidade significativa de finos, que geralmente apresentam características mecânicas de baixa resistência e alta expansão, não sendo o tipo de solo mais adequado para ser utilizado como camada de pavimentação.
- ii) Conforme o aumento de cal e cinza volante, nota-se que o ISC aumenta significativamente, já a expansão diminui comparando o SN com a primeira mistura SC5, conforme o aumento de cal e cinza volante, a expansão aumenta, mas sempre se mantendo abaixo da expansão do SN.
- iii) O melhor teor de mistura de solo-cal com cinza volante é o SC5, pois assim como as outras misturas, ele atinge os critérios para ser utilizado como base de tráfego pesado (ISC maior ou igual à 80% e expansão menor ou igual à 0,5%), mas utiliza menos quantidade de cal e cinza volante.
- iv) O SN não pode ser utilizado como camada de sub-base ou base, por não atender os critérios do DNER. Já os demais solos atendem os critérios para serem utilizados como sub-base e base de pavimento de tráfego pesado.

Sendo assim, tanto o objetivo geral como os objetivos específicos foram atendidos, o solo natural que demonstrava ser um solo expansivo e com baixa resistência, já no primeiro momento da pesquisa quando realizada a classificação, foi comprovado pelos ensaios que não atingiu os critérios do DNER para ser utilizado como camada de pavimento, após aplicar a estabilização de melhor teor de mistura SC5, o solo demonstrou uma redução de expansão com um grande ganho de resistência, atendendo os critérios do projeto de pavimentos flexíveis do DNER, podendo ser utilizado com uma base de tráfego pesado.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 16605:2017**. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT. **NBR 6457:2016**. Amostras de solo - Preparação de amostras. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. **NBR 6459:2016**. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. **NBR 7180:2016**. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. **NBR 7181:2016**. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. **NBR 7182:2016**. Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. **NBR 9895:2016**. Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT rodovias 2023: Relatório gerencial**. Brasília. CNT: SEST: SENAT, 2023.
- CRISTELO, Nuno. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. 2001.
- CRUZ, Joana Filipa Sâncio. **Avaliação do estado da arte da aplicação de solos tratados com cal no âmbito das infra-estruturas de transporte**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Coimbra. 2008.
- DNER. **ME 093/094**. Solos – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.
- DNER. **MT 667/22**. Método de projeto de pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, 2022.
- DNIT. **Manual de pavimentação**, 2006, 3ª edição.
- GUIMARÃES, José Epitácio Passos. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.
- NEVES, Jose Carlos Ferreira Maia. **Estabilização de solos com cal. Estudo e aplicações rodoviárias**. Universidade Nova de Lisboa, 1993.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000

PINTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6ª edição. Livros Tecnicos e científicos Editora S.A. Rio de Janeiro.1988

Silva Junior, M. A. M, **Propriedades geotécnicas de expansão de um solo argiloso compactado com e sem adição de cal**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 89 pp. 2010.

VAN IMPE, William F. **Soil improvement techniques and their evolution**. AA Balkema.v Rotterdam, Netherlands. 1989.

VARGAS, Milton. **Introdução à mecânica dos solos**. Mcgraw-Hill, Editora da Universidade de Sao Paulo, 1977.