**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – UNIDADE ARAXÁ**
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**
**MESTRADO PROFISSIONAL**

**DAYANE BARBOSA PACHECO DE MATOS**

# AVALIAÇÃO DE ADIÇÃO DE REJEITO DE MAGNETITA COMO ALTERNATIVA DE MATERIAL DE REFORÇO DE CAMADA GRANULAR DE PAVIMENTO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ARAXÁ – MINAS GERAIS**
**2024**

**DAYANE BARBOSA PACHECO DE MATOS**

# AVALIAÇÃO DE ADIÇÃO DE REJEITO DE MAGNETITA COMO ALTERNATIVA DE MATERIAL DE REFORÇO DE CAMADA GRANULAR DE PAVIMENTO

Dissertação apresentada ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET – MG, Unidade Araxá, como requisito do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas - Mestrado Profissional, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Domingos Sávio de Resende.

**ARAXÁ – MINAS GERAIS**

**2024**

Matos, Dayane Barbosa Pacheco de
M433a Avaliação de adição de rejeito de magnetita como alternativa de material de reforço de camada granular de pavimento / Dayane Barbosa Pacheco de Matos. – 2024.
81 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2024.
Bibliografia.

1. Rejeitos de Minérios – Teses. 2. Magnetita – Rejeitos – Teses. 3. Solos – Classificação – Teses. 4. Pavimentação Rodoviária – Teses. I. Resende, Domingos Sávio de. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDU 622’17

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus* Araxá – CEFET-MG
Bibliotecária: Gleisa Mara Alves CRB-6/1713

**DAYANE BARBOSA PACHECO DE MATOS**

# AVALIAÇÃO DE ADIÇÃO DE REJEITO DE MAGNETITA COMO ALTERNATIVA DE MATERIAL DE REFORÇO DE CAMADA GRANULAR DE PAVIMENTO

Dissertação apresentada ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET – MG, Unidade Araxá, como requisito do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas - Mestrado Profissional, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Domingos Sávio de Resende.

APROVADA: 25 de outubro de 2024.

---

DR. Dayana Keitty Carmo Gonçalves

(CEFET-MG)

---

DR. Lucas Martins Guimarães

(UFV)

---

DR. Thiago Bomjardim Porto

(CEFET-MG)

---

DR. Domingos Sávio de Resende

(Orientador)

(CEFET-MG)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, unidade Araxá, pelos conhecimentos adquiridos com renomados professores e pela disponibilização da estrutura e da instalação física do laboratório de solos.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, unidade Belo Horizonte, pelo apoio em ensaios laboratoriais no material estudado.

À empresa Fagundes pela prontidão e pela disponibilização do material solo utilizado na pesquisa conforme necessidade.

À Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) pela disponibilização do material utilizado na pesquisa conforme demanda e necessidade.

À empresa Solocap, que se prontificou e que apoiou na realização de ensaios complementares, possibilitando a finalização da pesquisa.

Ao Dr. Domingos Sávio de Resende pela orientação em todas as atividades, pelas horas dedicadas nesta pesquisa e por acreditar em minha capacidade.

Ao Dr. Thiago Bomjardim Porto pelo incentivo e pelo auxílio nas atividades iniciais do projeto.

Ao Sr. João Bosco Moreira do Carmo pela confiança e pelo apoio na finalização deste projeto.

À minha família, que esteve ao meu lado durante toda a jornada de desenvolvimento da pesquisa, zelando por minha saúde e meu bem-estar, apoiando e incentivando a conclusão dos trabalhos.

## RESUMO

Visando à integração da produção mineral sustentável à necessidade de melhoria na infraestrutura do sistema viário brasileiro, este trabalho foi desenvolvido para avaliar a utilização do rejeito magnetita (obtido após o beneficiamento industrial de minério) como material para reforço de camada granular, subleito e sub-base de pavimentos. A pesquisa foi dividida em seleção e coleta de amostras de materiais (solo, rejeito e brita), realização de caracterização física dos materiais, realização ensaios de Índice de Suporte Califórnia, Expansividade e Módulo de resiliência nas misturas confeccionadas com rejeito de magnetita em proporções de 20%, 30% e 40% e brita nº 0 em 10% adicionados ao solo coletado e por fim, avaliação dos resultados obtidos dos ensaios. Na análise dos resultados obtidos das misturas 1 a 6, observou-se que, em relação à granulometria, a variação percentual de material granular nas misturas 4, 5 e 6, em comparação às misturas 1, 2 e 3, é proporcional ao percentual de brita nº 0 inserido em substituição ao solo. A mistura 6 apresentou maior valor de densidade em comparação com as demais misturas e em comparação com o solo coletado, que apresentou 1,715 g/cm³, aumento de 35%. Pôde-se verificar também a alteração na classificação TRB do material, cujo solo coletado era A-6 (solos argilosos com comportamento sofrível a mau) e, com os resultados das misturas, passou a ser A-4 (solos siltosos com comportamento sofrível a mau). Com relação aos resultados de ISC e expansão, em comparação com o solo coletado (ISC = 23,10% e expansão de 0,15%), a mistura 6 apresentou aumento de 44% no valor de ISC, chegando a 51,60% e, em compensação, redução de expansão de 73%, com valor igual a 0,04%. No que tange ao módulo de resiliência, destacam-se as misturas 3 e 6, que obtiveram: valores de Mr igual a 1072,4 kgf/cm² e 0,01 mm de deslocamento permanente; e valores de Mr igual a 952,87 kgf/cm² e 0,02 mm de deslocamento permanente, respectivamente. Através de interrelação do módulo de resiliência e a classificação MCT, classificou-se as misturas 3 e 6, com características de solos laterítico arenosos (LA') e as misturas 1, 2, 4 e 5, com características de solos não laterítico argilosos (NG'). Diante dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que a mistura que trouxe resultados mais significativos para camada de reforço de subleito e sub-base é a mistura 6, embora necessite de melhoria da curva granulométrica para obtenção de faixa bem graduada.



**Palavras-chave**: subleito; sub-base; magnetita; brita; solos; reforço; mineração; rejeito; pavimento; Índice de Suporte Califórnia; expansividade.

## ABSTRACT

Aiming to integrate sustainable mineral production with the need to improve the Brazilian road infrastructure system, this study was developed to evaluate the use of magnetite tailings (obtained after industrial ore beneficiation) as a material for reinforcing granular layers, subgrade, and sub-base of pavements. The research was divided into sample selection and collection of materials (soil, tailings, and crushed stone), physical characterization of materials, California Bearing Ratio (CBR) tests, Expansion and Resilient Modulus tests on mixtures made with magnetite tailings in proportions of 20%, 30%, and 40%, combined with 10% of crushed stone nº 0, added to the collected soil, and finally, evaluation of the test results obtained. Analyzing the results from mixtures 1 to 6, it was observed that regarding granulometry, the percentage variation of granular material in mixtures 4, 5, and 6, compared to mixtures 1, 2, and 3, is proportional to the percentage of crushed stone nº 0 replacing the soil. Mixture 6 demonstrated the highest density value compared to the other mixtures and the collected soil, which presented a density of 1.715 g/cm³, an increase of 35%. Additionally, a change in the TRB classification of the material was noted, the collected soil, initially classified as A-6 (clayey soils with poor to very poor performance), was reclassified as A-4 (silty soils with poor to very poor performance) in the mixtures. Regarding CBR and expansion results, compared to the collected soil (CBR = 23.10% and expansion = 0.15%), mixture 6 exhibited a 44% increase in CBR, reaching 51.60%, and a 73% reduction in expansion, achieving a value of 0.04%. With respect to the resilient modulus, mixtures 3 and 6 stood out, obtaining: Mr with values of 1072.4 kgf/cm² and 0.01 mm of permanent displacement, and Mr with values of 952.87 kgf/cm² and 0.02 mm of permanent displacement, respectively. Through the interrelation of the Resilient Modulus and MCT classification, mixtures 3 and 6 were classified as sandy lateritic soils (LA'), while mixtures 1, 2, 4, and 5 were classified as non-lateritic clayey soils (NG'). Based on the results obtained in this study, it can be concluded that mixture 6 produced the most significant results for reinforcing subgrade and subbase layers, although its granulometric curve needs improvement to achieve a well-graded range.



Keywords: subgrade; subbase; magnetite; crushed stone; soils; reinforcement; mining; tailings; pavement; California Bearing Ratio; expansion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Malha rodoviária brasileira ..... 15
Figura 2 – Análise conjunta das características dos pavimentos no Brasil em 2022 ..... 15
Figura 3 – Esquema da seção transversal do pavimento ..... 17
Figura 4 – Representação da distribuição das cargas nos pavimentos ..... 18
Figura 5 – Escala granulométrica de solos conforme normas técnicas aplicáveis ..... 20
Figura 6 – TRB – Transportation Research Board ..... 21
Figura 7 – SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos ..... 22
Figura 8 – Ábaco de classificação MCT ..... 23
Figura 9 – Tabela de classificação MCT ..... 24
Figura 10 – Classificação resiliente de solos granulares ..... 26
Figura 11 – Classificação resiliente de solos finos ..... 27
Figura 12 – Subdivisão dos solos-agregados em relação a finura e interação dos grãos ..... 29
Figura 13 – Estrutura física da partícula de magnetita. ..... 30
Figura 14 – Propriedades da magnetita. ..... 30
Figura 15 – Fluxograma geral das atividades realizadas no projeto de pesquisa ..... 32
Figura 16 – Localização da empresa fornecedora do rejeito magnetita ..... 33
Figura 17 – Localização da empresa fornecedora do solo ..... 34
Figura 18 – Rejeito de magnetita coletado e preparado para fornecimento ..... 35
Figura 19 – Rejeito de magnetita entregue pela empresa mineradora ..... 35
Figura 20 – Pontos de coleta do solo ..... 36
Figura 21 – Coleta de solo por meio de abertura de trincheiras e cravação de cilindros. ..... 36
Figura 22 – Brita nº0 coletada no depósito de material de construção. ..... 37
Figura 23 – Preparação do solo coletado para realização dos ensaios de caracterização ..... 38
Figura 24 – Ensaio de peneiramento do solo ..... 39
Figura 25 – Ensaio de sedimentação do solo ..... 40
Figura 26 – Ensaio de determinação massa específica dos grãos do solo ..... 40
Figura 27 – Ensaio de Limite de liquidez do solo ..... 41
Figura 28 – Ensaio de Limite de plasticidade do solo ..... 41
Figura 29 – Ensaio de Expansividade do solo. ..... 42
Figura 30 – Ensaio de Índice de Suporte Califórnia do solo ..... 43
Figura 31 – Tipos de faixas granulométricas conforme graduação das partículas. ..... 44
Figura 32 – Ensaio de granulometria nas misturas ..... 47

Figura 33 – Ensaio de limite de liquidez nas misturas ..... 47
Figura 34 – Ensaio CBR nas misturas ..... 47
Figura 35 – Ensaio de expansividade nas misturas ..... 48
Figura 36 – Ensaio triaxial para obtenção de módulo de resiliência nas misturas ..... 48
Figura 37 – Classificação do solo em função da curva granulométrica ..... 56
Figura 38 – Gráfico índice de plasticidade x limite de liquidez das misturas e solo coletado. 60
Figura 39 – Classificação resiliente de solos finos ..... 68

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição granulométrica do rejeito magnetita ..... 49
Gráfico 2 –Curva granulométrica obtida do solo coletado ..... 50
Gráfico 3 – Curva de compactação - massa específica do solo ..... 51
Gráfico 4 – Limite de liquidez do solo ..... 51
Gráfico 5 – Resultado percentual de Expansão do solo coletado ..... 53
Gráfico 6 – Resultado Índice de Suporte Califórnia do solo coletado. ..... 54
Gráfico 7 – Curva granulométrica das misturas ..... 55
Gráfico 8 – Curva de compactação da mistura 1. ..... 57
Gráfico 9 – Curva de compactação da mistura 2. ..... 58
Gráfico 10 – Curva de compactação da mistura 3. ..... 58
Gráfico 11 – Curva de compactação da mistura 4. ..... 58
Gráfico 12 – Curva de compactação da mistura 5. ..... 58
Gráfico 13 – Curva de compactação da mistura 6. ..... 59
Gráfico 14 – Curva de ISC da mistura 1. ..... 61
Gráfico 15 – Curva de ISC da mistura 2. ..... 61
Gráfico 16 – Curva de ISC da mistura 3. ..... 62
Gráfico 17 – Curva de ISC da mistura 4. ..... 62
Gráfico 18 – Curva de ISC da mistura 5. ..... 62
Gráfico 19 – Curva de ISC da mistura 6. ..... 62
Gráfico 20 –Expansão da mistura 1. ..... 63
Gráfico 21 – Expansão da mistura 2. ..... 63
Gráfico 22 – Expansão da mistura 3. ..... 63
Gráfico 23 – Expansão da mistura 4. ..... 64
Gráfico 24 – Expansão da mistura 5. ..... 64
Gráfico 25 – Expansão da mistura 6. ..... 64
Gráfico 26 – Módulo de resiliência x Tensão desvio da mistura 1. ..... 65
Gráfico 27 – Módulo de resiliência x Tensão desvio da mistura 2. ..... 65
Gráfico 28 – Módulo de resiliência x Tensão desvio da mistura 3. ..... 66
Gráfico 29 – Módulo de resiliência x Tensão desvio da mistura 4. ..... 66
Gráfico 30 – Módulo de resiliência x Tensão desvio da mistura 5. ..... 66
Gráfico 31 – Módulo de resiliência x Tensão desvio da mistura 6. ..... 66

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de solos finos quanto ao tipo de comportamento resiliente, pelo método indireto ..... 27
Tabela 2 – Critérios para concepção de estabilização granulométrica em camadas de pavimentos ..... 28
Tabela 3 – Relação de normas utilizadas no desenvolvimento da pesquisa ..... 38
Tabela 4 – Classificação de solos finos quanto ao tipo de comportamento resiliente pelo método indireto ..... 43
Tabela 5 – Proporção percentual de mistura de materiais para correção granulométrica do solo ..... 46
Tabela 6 – Resultado Limite de plasticidade do solo ..... 52
Tabela 7 – Classificação de solos finos quanto ao tipo de comportamento resiliente, pelo método indireto ..... 54
Tabela 8 – Resultados de CBR e expansão do solo coletado ..... 55
Tabela 9 – Granulometria obtida das misturas. ..... 56
Tabela 10 – Massa específica aparente seca máxima das misturas ..... 57
Tabela 11 – Índices físicos das misturas ..... 59
Tabela 12 – CBR e expansão das misturas. ..... 61
Tabela 13 – Sequência de tensões para fase de condicionamento ..... 65
Tabela 14 – Módulo de resiliência médio, tensões e deslocamentos permanentes das misturas ..... 67
Tabela 15 – Interrelação entre a classificação MCT e a resiliente. ..... 68
Tabela 16 – Resultados gerais da caracterização dos materiais trabalhados ..... 69

## LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIAÇÕES

A.A.S.H.O. – American Association of State Highway

A.S.T.M. – American Society for Testing Materials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CBR – Califórnia Bearing Ratio

Cc – Coeficiente de Curvatura

CNT – Confederação Nacional de transportes

Cu – Coeficiente de Uniformidade

DER-MG – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

D10 – diâmetro tal que 10% do solo, em peso, tem diâmetros menores que ele (mm)

D30 – diâmetro tal que 30% do solo, em peso, tem diâmetros menores que ele (mm)

D60 – diâmetro tal que 60% do solo, em peso, tem diâmetros menores que ele (mm)

HRB – Highway Research Board

IG – Índice de grupo

IP – Índice de Plasticidade

ISC – Índice de Suporte Califórnia

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MCT – Miniatura Compactado Tropical

MPa – Mega Pascal

Mr – Módulo de Resiliência

NBR – Norma Brasileira Registrada

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

TRB – Transportation Research Board

$\sigma d$ – Tensão desvio

$\sigma\varepsilon$ – Tensão confinante

$\varepsilon r$ – Deformação vertical recuperável ou resiliente

**SUMÁRIO**


**1. INTRODUÇÃO ..... 11**
1.1 Contextualização e justificativa do tema ..... 11
1.2 Objetivos da pesquisa ..... 12
1.2.1 Objetivo geral ..... 12
1.2.2 Objetivos específicos ..... 12
1.3 Estrutura da dissertação ..... 13
**2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA ..... 14**
2.1 Contexto histórico da pavimentação ..... 14
2.2 Bibliografia sobre pavimentos ..... 16
2.2.1 Estrutura dos pavimentos ..... 16
2.2.2 Materiais para pavimentação ..... 18
2.2.3 Classificação dos solos. ..... 19
2.2.3.1 Propriedades físicas ..... 20
2.2.3.2 Propriedades mecânicas ..... 24
2.2.4 Reforço de camada de pavimento ..... 28
2.3 Rejeito de magnetita ..... 29
**3 MATERIAIS E METODOLOGIA ..... 31**
3.1 Seleção, coleta e caracterização dos materiais. ..... 32
3.1.1 Seleção dos materiais ..... 32
3.1.2 Coleta dos materiais ..... 34
3.1.3 Caracterização dos materiais coletados. ..... 37
3.2 Confecção de misturas de solo, rejeito e brita e realização de ensaios de caracterização das misturas ..... 43
3.2.1 Confecção das misturas ..... 44
3.2.2 Caracterização das misturas ..... 46
**4 RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 49**
4.1 Materiais coletados. ..... 49
4.2 Misturas confeccionadas. ..... 55
**5 CONCLUSÃO ..... 70**
5.1 Trabalhos futuros. ..... 71
**6 REFERÊNCIAS ..... 73**
**7 ANEXOS** ..... 76

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização e justificativa do tema

A infraestrutura é um dos eixos econômicos de maior impacto no desenvolvimento de um país, em especial o setor de transportes. No Brasil os modais de transporte são utilizados para comercialização de produtos, tanto no escoamento da produção em território nacional quanto para importação e exportação. Conforme dados apresentados pela Confederação Nacional de transportes (CNT) em 2009, no país, dentre os modais utilizados no transporte de cargas, o rodoviário representava cerca de 61%, seguido do ferroviário, com 21%, e do aquaviário, com 14%. Apesar de o sistema de transporte rodoviário ser o mais utilizado hoje e estar em constante crescimento, os investimentos no setor não acompanham a demanda logística. De acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias, realizada no ano de 2022, entre os anos de 1980 e 2010 houve um aumento de 31,3% da malha rodoviária federal pavimentada, que representa um crescimento médio de 0,9% ao ano. Entretanto, entre os anos de 2011 e 2021, foi observado um crescimento de 5,3% da malha rodoviária pavimentada, que corresponde a apenas 0,5% ao ano. Ainda, de acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias, 35,3% de toda a malha rodoviária pavimentada apresenta patologias como trincas, afundamentos e ondulações, características estas ligadas a problemas de resistência das camadas do pavimento. Em decorrência das más condições atuais dos pavimentos, observa-se uma necessidade maior de investimentos na manutenção das estradas existentes frente à necessidade de investimentos na construção de novos trechos. Para iniciarmos uma mudança nesse cenário, são de suma importância tanto a execução de melhorias nas camadas do pavimento das rodovias existentes quanto a construção de estradas com maior qualidade e resistência, proporcionando durabilidade a elas. Para isso, deve-se conhecer o material a ser utilizado na camada responsável por resistir às cargas oriundas do tráfego e, conforme as propriedades físicas do material, executar o reforço dessa camada, sendo estes os objetos de estudo deste trabalho: reforço de subleito e sub-base de pavimento.

Em contraponto ao exposto, na outra vertente da problemática, a atividade de mineração encontra-se em um cenário promissor e de constante crescimento e investimento no Brasil. O crescimento da extração mineral e do processo de beneficiamento de solos reflete no aumento da produção de rejeitos oriundos desse processo. Os rejeitos produzidos ocupam extensas áreas para seu armazenamento, e, devido à ocorrência de acidentes com a ruptura das estruturas de armazenamento desses rejeitos, é imprescindível que avaliemos esse cenário na busca de

alternativas para a mitigação dos impactos ambientais e econômicos para a sociedade advindos dessa atividade econômica. Entre as alternativas de redução de impactos da mineração no meio, a redução da quantidade de resíduo de rejeito armazenado vem ao encontro da solução proposta neste trabalho.

A necessidade de reforço na pavimentação, juntamente com a redução de armazenamento de rejeito de minério, trouxe luz ao objeto de estudo desta pesquisa: a utilização do rejeito de Magnetita como alternativa de material de reforço de camada granular de pavimento em conjunto com a outros materiais granulares comumente utilizados para essa finalidade (neste estudo optou-se pela brita 0).

Essa escolha tem como embasamento o fato de a magnetita ser um mineral comumente encontrado em rochas ígneas e metamórficas e em rochas sedimentares, de origem similar à dos materiais granulares usados nas camadas de reforço do pavimento. De maneira geral, os materiais de pavimentação compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura (BERNUCCI *et al.*, 2008). O rejeito de magnetita e os materiais granulares, com características de materiais inertes de alta resistência mecânica e granulometrias variadas, podem vir a apresentar capacidade de melhoria na qualidade e na resistência de pavimentos.

## 1.2 Objetivos da pesquisa

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a utilização do rejeito de Magnetita como alternativa de material de reforço de camada granular de pavimento em conjunto a outros materiais granulares para obtenção de melhoria na qualidade e na resistência de pavimentos.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho é coletar e caracterizar em laboratório o solo a ser utilizado em camada granular de pavimento e de acordo com suas características físicas, determinar variações percentuais de adição de rejeito de Magnetita em conjunto a outro material granular comumente utilizado, a brita. Confeccionar misturas compostas de solo, magnetita e brita, caracterizá-las em laboratório, obter os Índices de Suporte California, Expansividade do solo e Módulo de Resiliência e analisar os resultados obtidos nos ensaios em comparação às

características iniciais do solo, correlacionando-as ao que preconiza o DNIT IPR 719 – *Manual de pavimentação* (2006).

Estruturado em uma tipologia descritiva, de natureza aplicada, com abordagem qualitativa, o trabalho apresentará pontos relevantes na literatura atual sobre o tema, descrevendo a metodologia de desenvolvimento do projeto, além de apresentar e analisar os resultados obtidos.

## 1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho foi subdividido em cinco capítulos, sendo o capítulo 1 o que apresenta o contexto e a situação-problema em que se justifica o tema, bem como os objetivos da pesquisa.

O capítulo 2 foi dedicado à fundamentação teórica, abordando o contexto histórico da pavimentação no Brasil, além da bibliografia acerca de materiais e estruturas dos pavimentos.

O capítulo 3 apresenta a metodologia e a sequência utilizadas no desenvolvimento da pesquisa, bem como conceitos, definições, normas, ferramentas e procedimentos para obtenção de resultados de parâmetros previamente levantados, tais como: granulometria, densidade, limites de liquidez e plasticidade, índice de suporte e expansividade dos solos.

No capítulo 4 foram apresentados os resultados obtidos com base na aplicação da metodologia apresentada, além das análises dos valores obtidos nas misturas confeccionadas em comparação ao material inicial e ao que as normas vigentes aplicáveis preconizam para camadas de subleito e sub-base de pavimentos.

O capítulo 5 apresenta a conclusão da utilização de rejeito magnetita ao solo em camada de granular de pavimento, em reforço de subleito e sub-base.

Ao fim, constam as referências consultadas que embasaram e nortearam a pesquisa realizada.

# 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

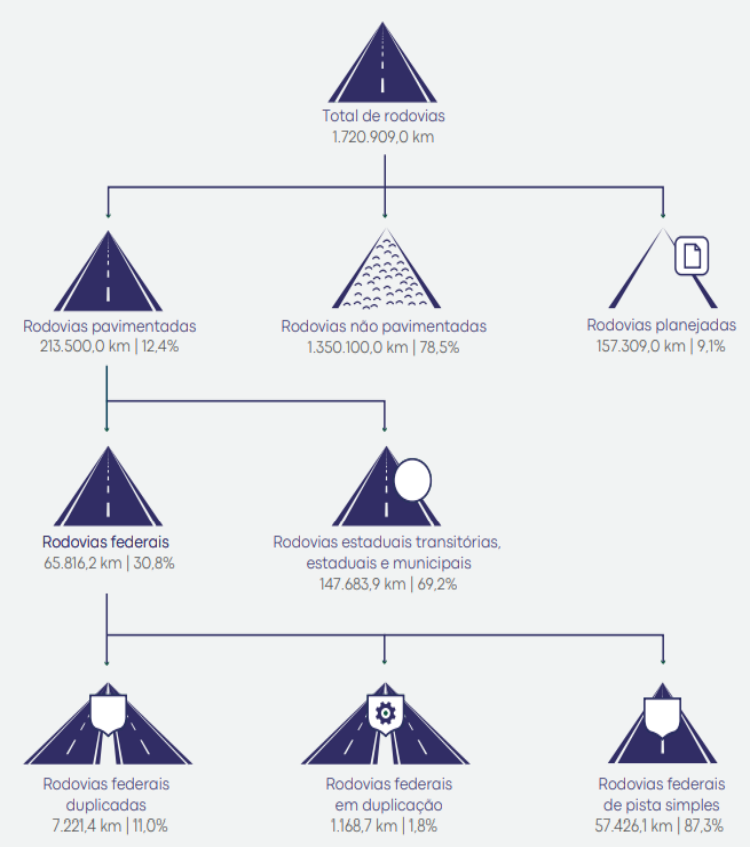
## 2.1 Contexto histórico da pavimentação

A pavimentação no Brasil, mais especificamente, a pavimentação rodoviária, iniciou sua expansão no governo Vargas, que, no ano de 1932, criou o Departamento Nacional De Estradas e Rodagem (DNER), subordinado ao Ministério de Viação e Obras Públicas com a função de coordenar e gerenciar todo o sistema rodoviário brasileiro, possibilitando um avanço na metodologia de construção de estradas e em processos de pavimentação. Posteriormente, durante a 2ª Guerra Mundial, em 1942, o Brasil obteve conhecimento, pela interação com engenheiros norte-americanos, sobre novas tecnologias de execução de pavimentação a partir do ensaio *California Bearing Ratio* (CBR) ou do Índice de Suporte Califórnia (ISC).

A construção rodoviária avançou, principalmente durante o Governo de Juscelino Kubitschek, com a construção de Brasília e a implementação da fábrica de asfalto da Refinaria Presidente Bernardes da Petrobras. Em 2001, após a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre, o DNER foi extinto, criando-se, em seu lugar, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). O Brasil saltou do ano de 1942, com 1.300 km de rodovias pavimentadas, para o ano de 2017 com 213.452,8 km de rodovias pavimentadas.

De acordo com Bernucci *et al*. (2008, p. 18), “no início do século XX, havia no país 500 km de estradas com revestimento de macadame hidráulico”. Em 2020, já se somavam 213.500 km de estradas pavimentadas. Esse acréscimo representa uma média de execução de rodovias pavimentadas de 3,5% ao ano, em contraponto a um crescimento médio da malha viária de 28,21% ao ano (comparando a extensão da malha viária em 2020, com 1.720.909 km, aos 500 km existentes em meados do século XX). A extensão e a situação atual da malha rodoviária brasileira avaliada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) pode ser vista na figura 1.

Figura 1 – Malha rodoviária brasileira




Fonte: CNT – Confederação Nacional do Transporte, 2022.

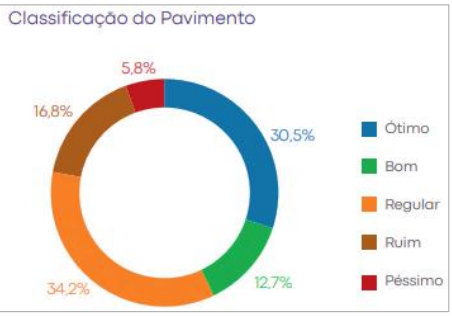
A Confederação Nacional do Transporte, na avaliação em 111.502 km de extensão de rodovias (aproximadamente 52% de toda a malha viária pavimentada), cita:

> [...] o Pavimento das rodovias avaliadas apresenta algum tipo de problema em 56,8% (63.307 quilômetros) da extensão total, sendo que 34,2% (38.206 quilômetros) encontram-se em estado Regular; 16,8% (18.686 quilômetros), Ruim; e 5,8% (6.415 quilômetros), Péssimo. Em 34.087 quilômetros (30,5%), o Pavimento foi classificado como Ótimo e, em 14.108 quilômetros (12,7%), como Bom.

Figura 2 – Análise conjunta das características dos pavimentos no Brasil em 2022

Classificação do Pavimento

| Pavimento | Extensão total | |
|---|---|---|
| | km | % |
| Ótimo | 34.087 | 30,5 |
| Bom | 14.108 | 12,7 |
| Regular | 38.206 | 34,2 |
| Ruim | 18.686 | 16,8 |
| Péssimo | 6.415 | 5,8 |
| **Total** | **111.502** | **100,0** |




Fonte: CNT – Confederação Nacional do Transporte, 2022.

Esse cenário atual demonstra grande necessidade de reparo, reforma ou restauração de vias já pavimentadas, além da execução de pavimentos de qualidade que venham a ser duradouros. Para obtenção da melhoria na qualidade dos pavimentos é preciso não somente rever cálculos aplicados em projetos de rodovias, mas avaliar o material que está sendo utilizado nas camadas do pavimento e, principalmente, analisar a camada de suporte de cargas do pavimento, que impacta significativamente nas demais camadas superiores, além de avaliar e aplicar reforço ao material das camadas, conforme necessidade do projeto em função da característica do solo.

## 2.2 Bibliografia sobre pavimentos

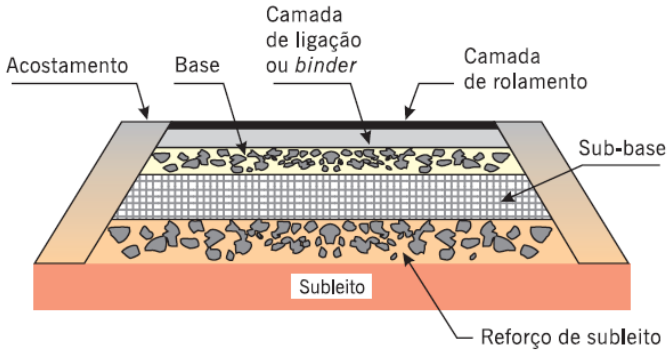
### 2.2.1 Estrutura dos pavimentos

Conforme citado na NBR 7207/82 – *Terminologia e classificação de pavimentação*, o pavimento é uma estrutura construída após a execução da terraplanagem, destinada a resistir aos esforços horizontais que atuam nela, proporcionando maior durabilidade à superfície de rolamento, resistir e redistribuir ao subleito os esforços verticais gerados pelos veículos e melhorar a qualidade do rolamento em relação à segurança e comodidade dos usuários. Conforme demonstrado na seção transversal da figura 3, as camadas constituintes do pavimento são:

- **subleito:** camada de fundação do pavimento;
- **regularização:** material acima do subleito, com a finalidade de conformá-lo transversal e longitudinalmente, não constituindo assim uma camada propriamente dita. Pode ser reduzida a uma sobreposição ao subleito ou ao corte dele, com espessura variada;
- **reforço de subleito:** camada de espessura constante, executada acima da regularização, com características geotécnicas melhores que as do material usado no subleito;
- **sub-base:** camada que antecede a base, executada quando não for aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização, por circunstâncias técnico-econômicas;
- **base:** camada com a função de resistir aos esforços gerados pelo tráfego e distribuí-los, sobre a qual é construído o revestimento;

- **revestimento:** camada de rolamento, impermeável, conforme projeto, que recebe de forma direta das ações do rolamento dos veículos, com função de melhorar a comodidade e a segurança dos usuários, resistindo ao desgaste.

Figura 3 – Esquema da seção transversal do pavimento

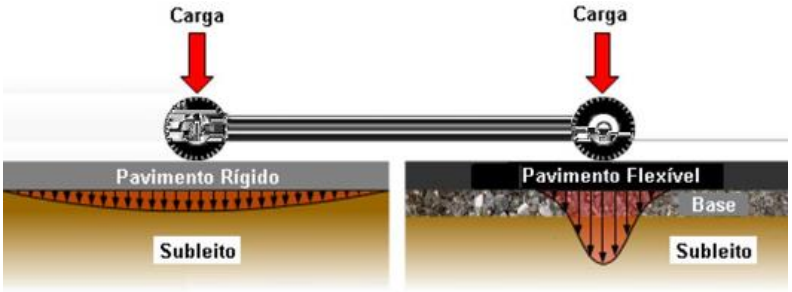



Fonte: BERNUCCI *et al*., 2008, p. 11.

Dentro da composição do pavimento, conforme os cálculos de carregamentos incidentes e características dos materiais utilizados, o mesmo poderá não possuir camada de sub-base ou de reforço, entretanto para que a estrutura seja denominada como pavimento, é necessário que exista a camada de revestimento (cascalhamento, agulhamento, etc.) para absorver e transmitir os esforços e camada de fundação (subleito) para resistir às cargas atuantes recebidas.

Os carregamentos atuantes nos pavimentos, oriundos do tráfego, são absorvidos e distribuídos de acordo com o tipo de revestimento e camada adjacente empregada. Desse modo são classificados em “flexíveis”, “semirrígidos” e “rígidos”. Os pavimentos semirrígidos possuem uma base cimentada com aglutinante contendo propriedades cimentícias e são revestidos por uma camada asfáltica. Os pavimentos rígidos possuem o revestimento com uma elevada rigidez com relação às demais camadas subjacentes, absorvendo, desse modo, todas as tensões provenientes da carga incidente. Nos pavimentos flexíveis, todas as camadas sob o carregamento incidente da pista de rolamento sofrem deformação elástica significativa, distribuídas entre si de forma equivalente, necessitando de resistência elevada para absorver e redistribuir os carregamentos aplicados, conforme figura 4.

Figura 4 – Representação da distribuição das cargas nos pavimentos




Fonte: Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento.[1]

Em relação ao comportamento do pavimento, segundo BERNUCCI *et. al*. (2008, p. 403),

> o desempenho adequado do conjunto de camadas e do subleito relaciona-se à capacidade de suporte e à durabilidade compatível com o padrão da obra e o tipo de tráfego, bem como o conforto ao rolamento e a segurança dos usuários. O desafio de projetar um pavimento reside no fato, portanto, de conceber uma obra de engenharia que cumpra as demandas estruturais e funcionais.

Desse modo, a camada de fundação deverá resistir aos esforços solicitados. Em atendimento às demandas estruturais e à capacidade de suporte do material constituinte do pavimento, são feitos estudos geotécnicos com a realização dos ensaios de granulometria por peneiramento, limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica, ISC ou CBR, Expansividade do material frente à presença de água e Módulo de resiliência, para obtenção de parâmetros para dimensionamento das camadas de pavimento. Caso os resultados obtidos não satisfaçam ao preconizado pelo *Manual de pavimentação* do DNIT (2006), faz-se necessária a execução de camada de reforço desse solo ou camada de sub-base.

### 2.2.2 Materiais para pavimentação

Conhecer a origem e as propriedades dos materiais a ser empregados nos pavimentos é fundamental, tanto do ponto de vista da análise dos materiais como da análise de projetos, segundo Balbo (2007),

> [...] pode-se dizer que as cargas externas geram esforços solicitantes verticais e horizontais. Os esforços verticais podem ser reduzidos a solicitações de compressão e de cisalhamento; os esforços horizontais podem inclusive solicitar certos materiais à tração ou simplesmente atuar confinando outros materiais. (BALBO,2007, p. 45)

[1] Disponível em: www.nucleodoconhecimento.com.br. Acesso em: 2016.

Neste sentido, o desempenho e comportamento do pavimento está diretamente relacionado aos materiais empregados, às suas características físicas e mecânicas. Bernucci *et al*. (2008, p. 339), corrobora do mesmo entendimento em sua citação,

> as estruturas de pavimento são projetadas para resistirem a numerosas solicitações de carga, dentro do período de projeto, sem que ocorram danos estruturais fora do aceitável e previsto. [...] Para se dimensionar adequadamente uma estrutura de pavimento, deve-se conhecer bem as propriedades dos materiais que a compõem, sua resistência à ruptura, permeabilidade e deformabilidade, frente à repetição de carga e ao efeito do clima.

De modo geral, nos projetos de pavimentação no Brasil, os materiais utilizados classificam-se em "terrosos" e "pétreos" e demais materiais utilizados são classificados como "diversos". No âmbito da pavimentação, o solo constitui os materiais terrosos, de variáveis composições, de acordo com Balbo, (2007, p. 87),

> Solo é qualquer depósito solto ou fofo, resultante da ação do intemperismo ou da degradação de rochas, ou ainda, da decomposição de vegetais. Incluem-se assim, na categoria dos solos, diversos materiais não consolidados, como sedimentos (pedregulhos, areias, siltes ou argilas), turfas, depósitos calcários como as areias [...], os depósitos piroclásticos resultantes de erupções e lavas (cinzas vulcânicas), bem como os solos residuais jovens ou maduros.

Sobre os materiais pétreos, segundo o *Manual de pavimentação* (2006, p. 78),

> [...] normalmente conhecidos sob a denominação genérica de agregados, podem ser naturais ou artificiais. Os primeiros, são aqueles utilizados como se encontram na natureza, como o pedregulho, os seixos rolados etc., ao passo que os segundos compreendem os que necessitam uma transformação física e química do material natural para sua utilização, como a escória e a argila expandida.

Os materiais que não estão compreendidos entre os terrosos e pétreos compõem os materiais diversos. Estes geralmente são materiais utilizados em correções químicas do solo para obtenção de parâmetros que resultem em melhoria de características hidráulicas, de resistência e de durabilidade. Como exemplo, podem ser citados a cal hidráulica, o cimento Portland, a pozolana, a cinza volante, entre outros.

### 2.2.3 Classificação dos solos.

O conhecimento das características dos solos e sua classificação constituem em um dos primeiros passos para prever o comportamento do pavimento frente às solicitações de

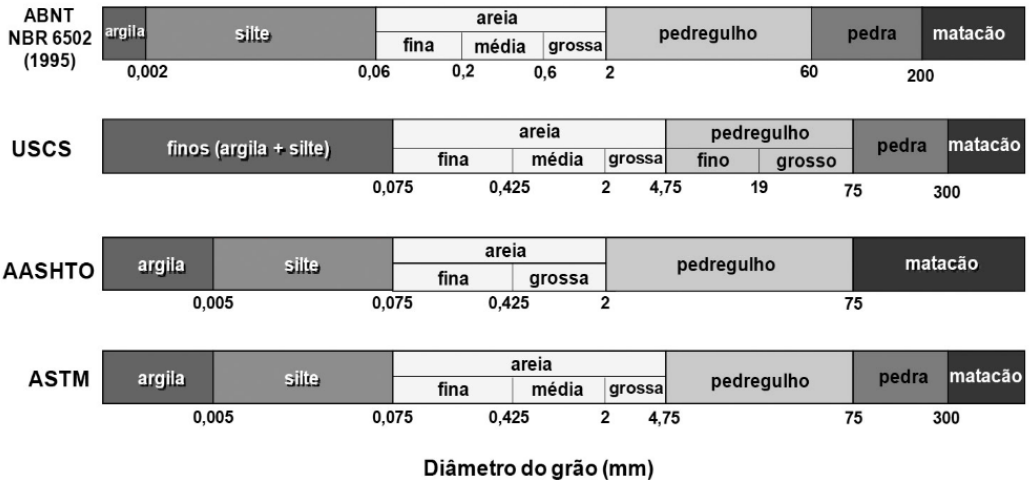
carregamento do tráfego e direciona os projetos no sentido de se utilizar material adequado na construção dos pavimentos. Para isso o material é classificado conforme suas propriedades físicas e mecânicas e sua aplicação dentro do projeto de pavimentação.

Uma classificação ideal de solos seria aquela que busca relacionar o potencial de um solo quanto a uma dada aplicação em camada de pavimento, o que depende não somente de testes de suas propriedades físicas, mas também de suas correlações com o comportamento observado em obras quando empregado (BALBO, 2007, p. 98).

### 2.2.3.1 Propriedades físicas

Dentre as propriedades físicas do solo, pode-se classificá-lo quanto a sua escala granulométrica, em que são utilizadas normas técnicas nacionais e internacionais, tais como A.S.T.M (*American Society for Testing Materials*), A.A.S.H.T.O. (*American Association for State Highway and Transportation Officials*), ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos). Suas diferenças podem ser vistas na figura 5.

Figura 5 – Escala granulométrica de solos conforme normas técnicas aplicáveis




Fonte: Suporte Solos.[2]

O Sistema de classificação HRB, de 1945, constitui um aperfeiçoamento do antigo sistema da *Public Roads Administration* (da A.A.S.H.T.O), proposto em 1929. No HRB, considera-se a granulometria, o limite de liquidez, o índice de plasticidade e o índice de grupo.

[2] Disponível em: https://www.suportesolos.com.br/blog/analise-granulometrica-do-solo-ensaios-geotecnicos-o-objetivo-e-as-fracoes-de-solo/71/. Acesso em: julho, 2023.

No que diz respeito à granulometria do material, conforme suas frações dentro da amostra, o mesmo poderá ser denominado argiloso, siltoso, arenoso ou pedregulhoso, todavia, materiais caracterizados somente através de sua granulometria podem apresentar comportamentos de materiais diferentes da classificação adotada, como exemplifica Balbo (2007, p. 87),

> [...] um solo arenoso fino laterítico, muitas vezes classificado A-2-4, pode ter fração fina mais argilosa, com comportamento quanto à retração típico de argila durante a secagem após a compactação.

Sendo assim, é correlacionado à granulometria, outros parâmetros tais como, o limite de liquidez, índice de plasticidade e índice de grupo, que em conjunto, traz uma previsibilidade maior do comportamento esperado do material estudado para utilização em camadas de pavimento, tais como plasticidade e permeabilidade, podendo ser estas camadas: subleito, sub-bases e bases. Esta correlação é aplicada utilizando-se os dados dos materiais, obtidos em laboratório e aplicados na tabela da figura 6.

Figura 6 – TRB – *Transportation Research Board*

| 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<br>A - 7 - 5<br>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 min. | | | | | | | | |
| Nº 200 | 15 máx. | 25 máx. | 10 máx. | 35 máx. | 35 máx. | 35 máx. | 35 máx. | 36 min. | 36 min. | 36 min. | 36 min. |
| Características da fração passando na peneira Nº 40: | | | | | | | | | | | |
| Limite de Liquidez | | | | 40 máx. | 41 min. | 40 máx. | 41 min. | 40 máx. | 41 min. | 40 máx. | 41 min. |
| Índice de Plasticidade | 6 máx. | 6 máx. | NP | 10 máx. | 10 máx. | 11 min. | 11 min. | 10 máx. | 10 máx. | 11 min. | 11 min.* |
| Índice de Grupo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 máx. | 4 max. | 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 | | | |

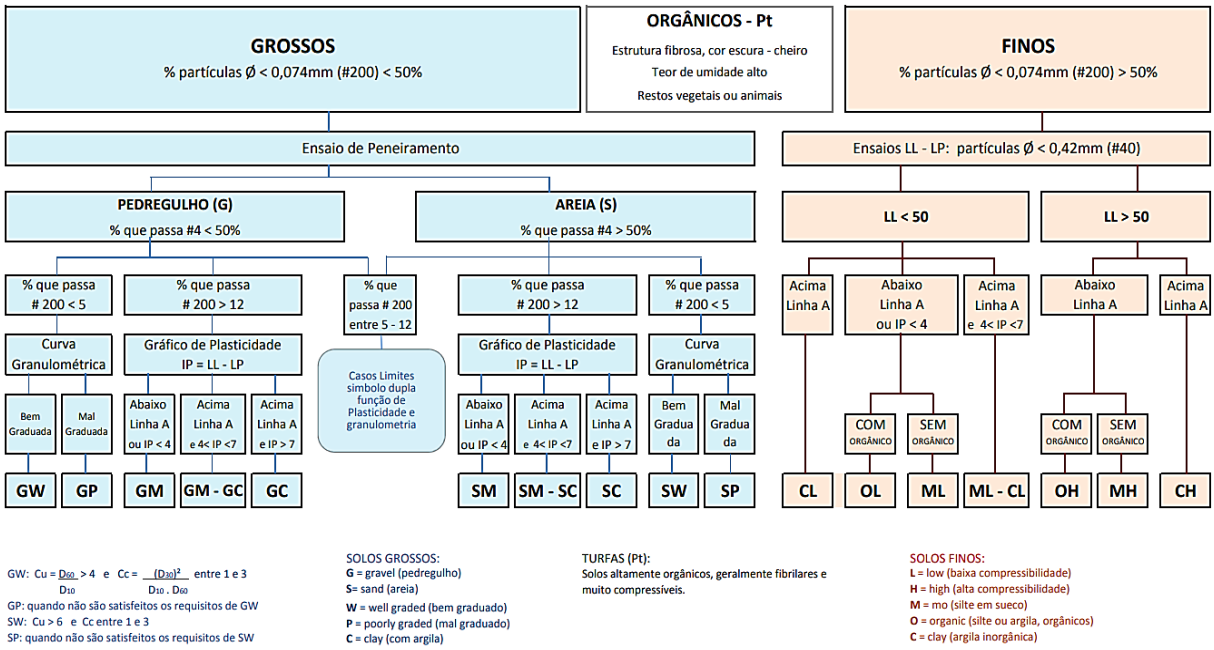
* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: *Manual de pavimentação* – DNIT, 2006, p. 56.

O sistema de classificação SUCS, é resultante de um trabalho conjunto do *Bureau of Reclamation* e do *Corps of Engineers*, assistido pelo professor Arthur Casagrande, da

Universidade de Harvard e foi publicado em 1953, pelo *Waterways Experiment Station*, como aperfeiçoamento e ampliação do sistema elaborado por Casagrande para aeroportos, em 1943. Esse sistema de classificação, assim como o HRB, identifica os solos conforme sua granulometria, entretanto os limites percentuais de finos (material passante na peneira nº 200) do sistema SUCS é maior que do HRB (50% e 35%, respectivamente). Este sistema também utiliza os dados de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade e a partir destes, são calculados o coeficiente de uniformidade (Cu) e o coeficiente de curvatura (Cc) em que ambos indicam a variação da curva granulométrica do solo entretanto, o primeiro indica a a variação granulométrica do solo entre os diâmetros mais finos (D10 e D60), e o coeficiente de curvatura (Cc) indica a graduação do solo a partir da distribuição dos diâmetros dos grãos dentro do volume total (D10, D30 e D60). Na figura 7 está demonstrado o sistema de classificação para pavimentação SUCS.

Figura 7 – SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos




Fonte: UDESC – Universidade do estado de Santa Catarina. CCT – Centro de Ciências Tecnológicas. DEC – Departamento de Engenharia Civil. Laboratório de Geotecnia e Pavimentação, 2017.

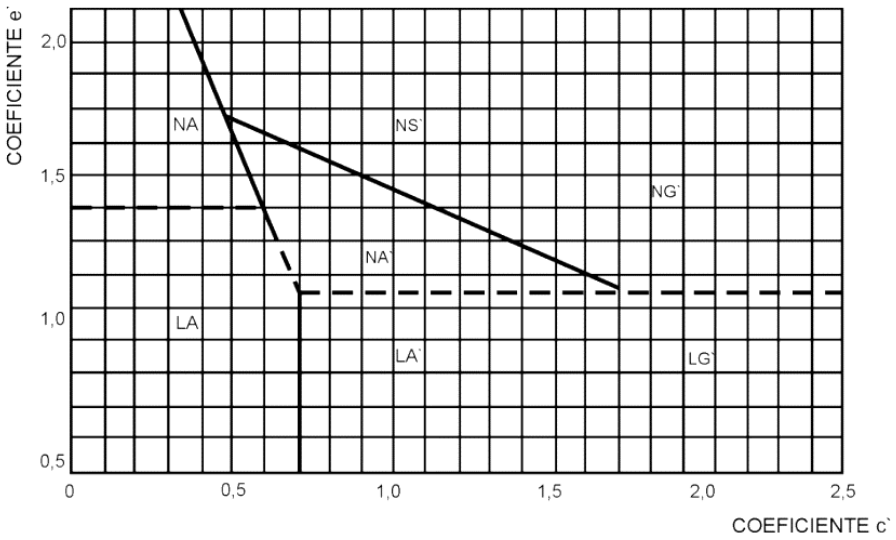
Outro sistema de classificação, desenvolvido por Nogami e Villibor, é a classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical). Esse sistema foi criado para caracterização de solos de regiões tropicais, predominantemente característicos do Brasil, tendo em vista que as demais classificações foram originadas de solos de regiões temperadas, cuja gênese se diferencia da dos solos tropicais, apresentando características bem distintas quando comparados entre si.

> Deve-se estar atento [...] sobre as classificações tradicionais frente às características dos solos tropicais, considerando que, na maioria das vezes, seu emprego conduz à subutilização do material do ponto de vista de suas potencialidades, como material para reforços, bases e sub-bases de pavimentos, devendo o engenheiro, sempre que possível, tomar partido de suas características favoráveis, empregando os critérios de análise desenvolvidos no Brasil. (BALBO, 2007, p. 98).

Ainda, segundo Balbo (2007), no sistema MCT, os solos são classificados em dois grupos maiores, em função do comportamento que podem apresentar, sendo eles: lateríticos e não lateríticos. Solos de comportamento laterítico apresentam horizontes de solos residuais maduros ou solos transportados intemperizados, são finos em termos granulométricos e muito estáveis (do ponto de vista de suscetibilidade à água e às condições climáticas em geral). Solos de comportamento não laterítico apresentam semelhança com os solos residuais jovens ou saprolíticos, contêm grande quantidade de minerais instáveis, sujeitos então a alterações frente às condições climáticas, inclusive não drenando de forma eficiente a água presente, perdendo sua resistência em condições de saturação.

Para a classificação MCT dos solos, é utilizado o ábaco apresentado na figura 8, conforme o coeficiente c’ e o índice e’. Esses dados são obtidos após a execução dos ensaios de Mini-MCV e de perda de massa por Imersão, descritos nas normas DNER – ME 258/94 e DNER-ME 256/94, respectivamente.

Figura 8 – Ábaco de classificação MCT




Fonte: *Manual de pavimentação*-DNIT, 2006, p. 68.

De posse dos resultados dos ensaios e da classificação dentro dos subgrupos, o solo é avaliado quanto a sua aplicabilidade em pavimentos, por meio da análise de parâmetros, como mostra a tabela na figura 9.

Figura 9 – Tabela de classificação MCT

| CLASSES | | | | N - SOLOS DE COMPORTAMENTO "NÃO LATERÍTICO" | | | | L - SOLOS DE COMPORTAMENTO "LATERÍTICO" | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GRUPOS | | | | NA AREIAS | NA' ARENOSOS | NS' SILTOSOS | NG' ARGILOSOS | LA AREIAS | LA' ARENOSOS | LG' ARGILOSOS |
| GRANULOMETRIA TÍPICA (MINERAIS)(1) | | | | areias, areias siltosas, siltes (q) | areias siltosas, areias argilosas | silte (k, m), siltes arenosos e argilosos | argilas, argilas arenosas, argilas siltosas | areias com pouca argila | areias argilosas, argilas arenosas | argilas, argilas arensas |
| CAPACIDADE DE SUPORTE (2) | MINI CBR sem imersão (%) | Muito alto | > 30 | Alto a médio | Alto | Médio a alto | Alto | Alto | Alto a muito alto | Alto |
| | | Alto | 12-30 | | | | | | | |
| | | Média | 4-12 | | | | | | | |
| | | Baixo | < 4 | | | | | | | |
| | Perda de Suporte por imersão (%) | Alta | > 70 | Média a baixa | Baixa | alta | alta | Baixa | Baixa | Baixa |
| | | Média | 40-70 | | | | | | | |
| | | Baixa | < 40 | | | | | | | |
| EXPANSÃO | (%) | Alta | > 3 | Baixa | Baixa | alta | alta e média | Baixa | Baixa | Baixa |
| | (2) | Média | 0,5-3 | | | | | | | |
| CONTRAÇÃO | (%) | Média | 0,5-3 | Baixa a Média | Baixa a Média | Média | alta e média | Baixa | Baixa a média | média a alta |
| | (2) | Baixa | < 0,5 | | | | | | | |
| PERMEABILIDADE log (k(cm/s)) | (2) | Alta | > (-3) | Média a alta | Baixa | Média a baixa | Baixa a média | Média a baixa | baixa | baixa |
| | | Média | (-3) a (-6) | | | | | | | |
| | | Baixo | < (-6) | | | | | | | |
| PLASTICIDADE | (%) | IP | LL | Baixa a NP | Média a NP | Média a alta | alta | NP a baixa | Baixa a média | média a alta |
| | Alto | > 30 | > 70 | | | | | | | |
| | Média | jul/30 | 30-70 | | | | | | | |
| | Baixo | < 7 | < 30 | | | | | | | |

PROPRIEDADES TÍPICAS DOS GRUPOS DOS SOLOS

(1)q = quartzo, m = micas, k = caulinita;

(2) Corpos-de-provas compactados na umidade ótima da energia "normal", com sobrecarga padrão quando pertinente, sem fração retida na peneira de 2mm de abertura.

Fonte: *Manual de pavimentação* – DNIT, 2006, p.69.

### 2.2.3.2 Propriedades mecânicas

Dentre as propriedades mecânicas do solo, as mais utilizadas na pavimentação são a capacidade de suporte de carga e o módulo de resiliência. A capacidade de suporte de carga do solo é obtida através de ensaios CBR (California Bearing Radio) ou ISC (Índice de Suporte Califórnia), aplicado para solos temperados e ensaio mini-CBR (mesmo princípio básico do CBR com dimensões reduzidas), aplicado para solos tropicais.

O ensaio de CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada. O valor dessa relação, expressa em percentagem, permite determinar, por meio de equações empíricas, a espessura de pavimento flexível necessária, em função do tráfego (Manual de Pavimentação, 2006, p. 37).

Valores percentuais maiores de CBR indicam solos com maior capacidade de suporte de carga, sendo adequados para pavimentação com menor espessura e valores percentuais baixos indicam necessidade de tratamento ou reforço do solo.

Os valores de CBR representam a capacidade de suporte de carga dos pavimentos em termos de ruptura plástica sob carregamento estático, ou seja, sob a incidência de carga o material sofre uma deformação irreversível.

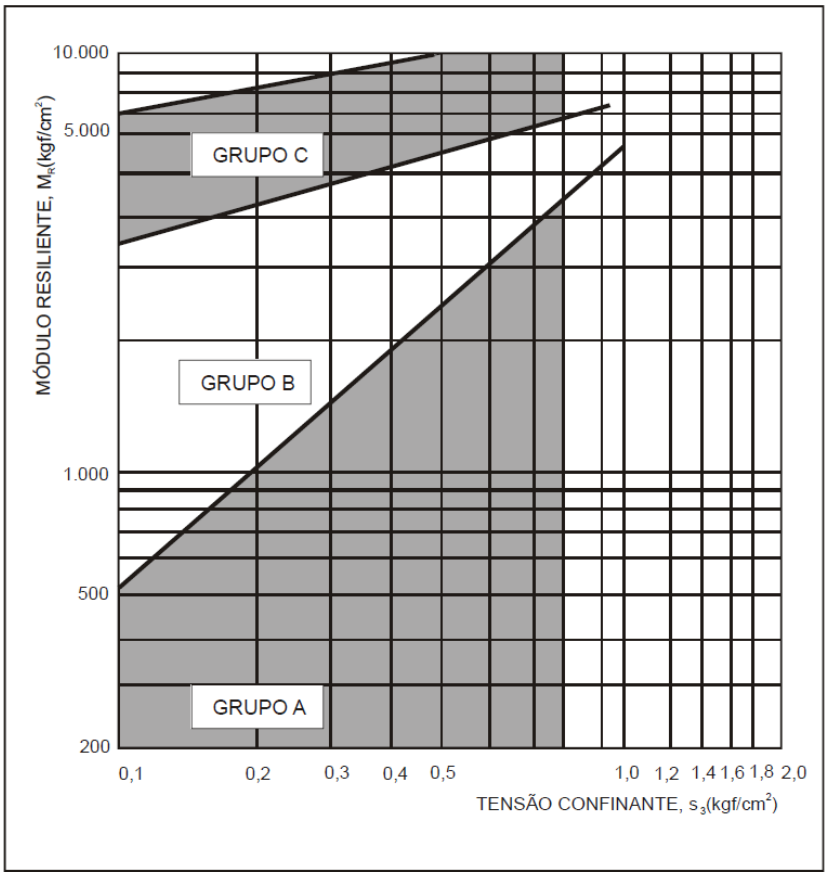
Entretanto, estudos demonstram que o solo frente a carregamentos cíclicos, pode sofrer deformações e retornar ao seu estado inicial assim que cessa a aplicação da carga, denominado como comportamento elástico. MARQUES (2002) cita que a maior parte dos solos utilizados em pavimentação não apresentam comportamento elástico linear, cujas deformações retornam parcialmente ao estado inicial assim que cessa a aplicação de carga.

Devido à ação da passagem rápida das cargas das rodas do veículo sob o pavimento, provocando deslocamentos verticais repetidos, ocorre uma parcela permanente, plástica (não recuperável), e uma parcela resiliente, elástica (recuperável), a qual é utilizada na determinação do módulo de resiliência (SANTANNA, 2002).

O módulo de resiliência ($M_R$), desenvolvido por Pinto e Preussler, é a relação entre a tensão-desvio (σd) aplicada repetidamente em uma amostra de solo e a correspondente deformação vertical recuperável ou resiliente (εr) obtida. Estes parâmetros são obtidos em laboratório, mediante o ensaio triaxial de carga repetida, preconizado pela norma DNIT 134/18-ME. Resumidamente, é possível analisar de forma mecanística-empírica o comportamento do solo frente à aplicação repetida de tensão desvio e à sua deformabilidade elástica obtida.

Nesse sistema de classificação, os solos granulares são divididos nos grupos A, B e C (figura 10). Solos do grupo A correspondem a solos com elevado grau de resiliência e, portanto, não são utilizados em estruturas de pavimentos, Solos do grupo B correspondem a solos com grau de resiliência intermediária, podendo ser utilizados em estruturas de pavimentos como sub-bases, bases e reforços de subleitos, porém conforme condições em que $K2 \leq 0{,}50$ (bom comportamento) e $K2 > 0{,}50$ (o comportamento depende da espessura da camada e da qualidade do subleito). Solos do grupo C correspondem a solos com grau de resiliência baixo que podem ser aplicados em qualquer camada de pavimento.

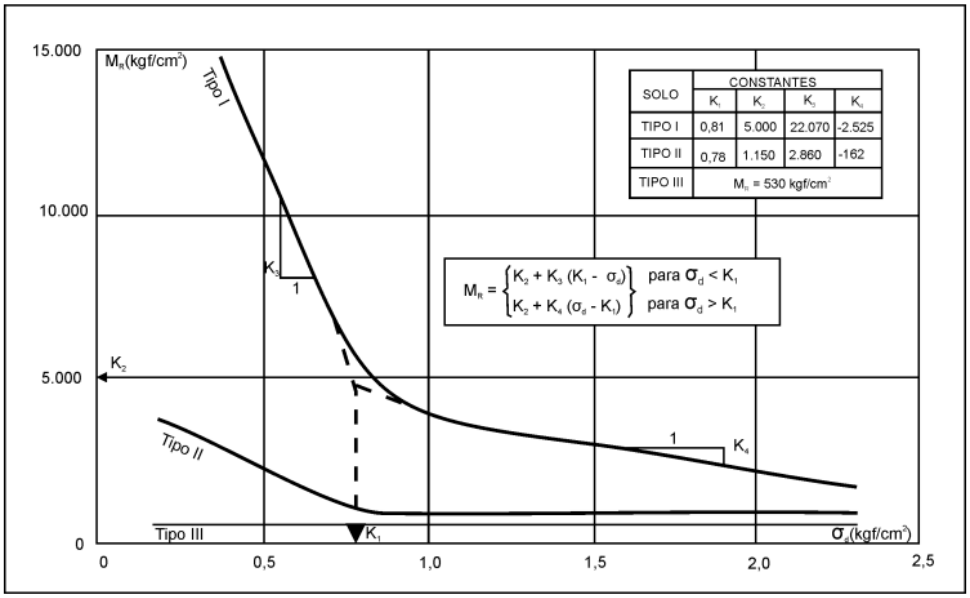
Figura 10 – Classificação resiliente de solos granulares




Fonte: *Manual de pavimentação* – DNIT, 2006, p. 70.

Para os solos finos (os que apresentam mais de 35% em peso de material passando na peneira nº 200 ou 0,075 mm), seu comportamento frente ao módulo de resiliência é dividido em: solos Tipo I, que correspondem a solos de bom comportamento, podendo ser utilizados como subleito, reforço de subleito ou sub-base; solos do Tipo II, que correspondem a solos de comportamento regular, podendo ser utilizados como subleito e reforço de subleito; e solos Tipo III, que correspondem a solos de comportamento ruim, portanto não sendo recomendada sua utilização em camadas de pavimento, porém podendo ser empregado em subleito com estudos especiais (figura 11).

Figura 11 – Classificação resiliente de solos finos




Fonte: *Manual de pavimentação* – DNIT, 2006, p. 73.

Caso não seja possível determinar os valores do módulo de resiliência (Mr), este pode ser estimado de forma indireta a partir da porcentagem de silte que passa na peneira de nº 200 (0,075 mm) e do valor de CBR do solo, como pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1 – Classificação de solos finos quanto ao tipo de comportamento resiliente, pelo método indireto

| CBR | S% (fração de silte que passa na peneira de nº200) | | |
|---|---|---|---|
| | ≤ 35 | 35 - 65 | ≥ 65 |
| ≤ 5 | III | III | III |
| 6 - 9 | II | II | III |
| ≥ 10 | I | II | III |

Fonte: adaptado de *Manual de pavimentação* – DNIT, 2006.

De acordo com estudos de Nogami e Villibor, há certa dificuldade em correlacionar as classificações HRB, SUCS e MCT. Diante dessa observação, este trabalho foi realizado com foco na obtenção da classificação física do material de pavimento, pelos métodos HRB e SUCS, e obtenção da classificação mecânica pelo método MCT, embora os ensaios para este, tenham sido realizados no método CBR, além da realização de ensaios triaxial de carga repetida para obtenção do Módulo de resiliência

### 2.2.4 Reforço de camada de pavimento

O Reforço do subleito é camada de material inserida acima da camada de regularização de pavimento ou subleito existente, e que possui características geotécnicas melhores que o material do subleito. Por outro lado, a sub-base é a camada que antecede a base e pode ser empregada como camada de reforço quando não se pode executar o reforço de subleito, devido a questões técnico-econômicas.

Na execução do reforço, seja para camadas de subleito, sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, pode ser aplicado as estabilizações mecânica, granulométrica e química, sendo o objeto de estudo deste trabalho a estabilização granulométrica.

> A estabilização granulométrica é o processo de melhoria da capacidade resistente de materiais "in natura" ou mistura de materiais, mediante emprego de energia de compactação adequada, de forma a se obter um produto com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade (DNIT 139/2010, p. 2).

De acordo com o *Manual de pavimentação* do DNIT (2006), os materiais a ser utilizados na estabilização granulométrica, precisam atender a determinados critérios de acordo com a camada que se pretende reforçar, como pode ser visto na tabela 2.

Tabela 2 – Critérios para concepção de estabilização granulométrica em camadas de pavimentos

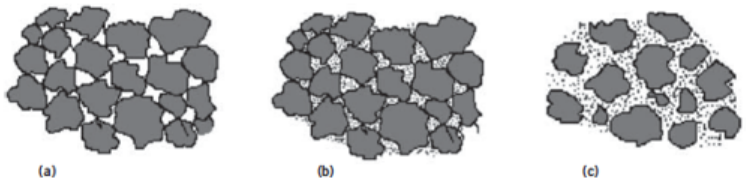
| | CBR (%) | Expansão (%) | Índice de Grupo (IG) | Limite Liquidez (LL) | Índice de Plasticidade (IP) | Equivalente de Areia (AR) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| REFORÇO SUBLEITO | > Subleito existente | ≤ 1% | - | - | - | - |
| SUB-BASE | 3 ≥ 20 | - | 0 | - | - | - |
| BASE | - | - | - | ≤ 25% | ≤ 6% | ≥ 30% |
| BASE | ≥ 80% | ≤ 0,5% | - | > 25% | > 6% | > 30% |

Fonte: adaptado de *Manual de pavimentação* – DNIT, 2006.

Os fatores que influenciam no comportamento da composição granulométrica são: (i) a natureza da partícula, pois a mesma deve apresentar resistência suficiente e não sofrer alterações indesejáveis e, (ii) a estabilização da composição deve ser levada a densificação ótima, que pode ser entendida como o melhor arranjo das partículas aprimorando a distribuição dos esforços. (ARRIVABENI, 2017).

Desta forma, busca-se neste estudo, que se obtenha um material com melhores características de arranjo estrutural, conforme indicado na letra "b" da figura 12.

Figura 12 – Subdivisão dos solos-agregados em relação a finura e interação dos grãos




a) contato grão-grão; baixa densidade; permeável; não suscetível a mudanças com a umidade ou com o congelamento; compactação em geral difícil;
b) finos preenchem os vazios, proporcionando alta densidade; permeabilidade mais baixa que o do tipo "a"; contato grão-grão mais resistente em geral que o do tipo "a"; menor deformabilidade; moderadamente difícil de compactar;
c) matriz de finos; baixo contato grão-grão devido ao excesso de finos; densidade mais baixa em geral que a do tipo "b"; permeabilidade inferior à do tipo "b", podendo ser impermeável dependendo da natureza dos finos; a mistura é afetada por variações de umidade; facilidade na compactação.

Fonte: adaptado de BERNUCCI, *et al*., 2008.

## 2.3 Rejeito de magnetita

O rejeito, ou lama, na mineração, é produzido após o beneficiamento do material que possui minerais, em que se utiliza de água no processo para separar o minério (produto com valor monetário) do material estéril (sem valor monetário). Para o beneficiamento de sistema de particulados, no entendimento dos autores Schneider *et al.* (2016, p. 257),

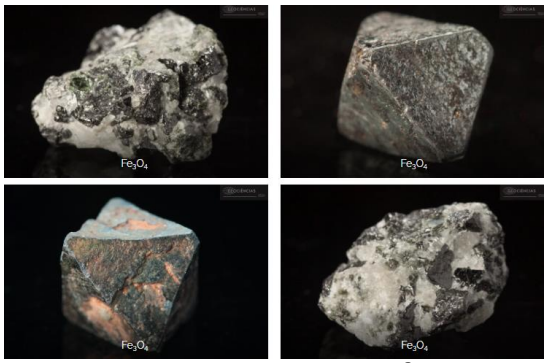
> [...] dentre os processos envolvidos destacam-se aqueles relativos à cominuição (desmonte, britagem e peneiramento, moagem e classificação), os processos de concentração (flotação, gravíticos e magnéticos) e as etapas de separação sólido-líquido.

O minério é um composto formado por um conjunto de minerais (fragmentos de rocha), incorporados em variados percentuais dentro do solo, que possuem potencial econômico em sua exploração e seu beneficiamento, sendo o minério de ferro o mais rentável atualmente. Como produto do processo de beneficiamento do minério, ou seja, da extração do elemento químico de interesse a partir do solo, é produzido o resíduo rejeito. Sua composição dependerá de diversos fatores, entre eles, o tipo de processo de beneficiamento do minério e o tipo de

elemento que se deseja extrair do solo. Neste trabalho em específico, a composição do rejeito escolhido é a magnetita.

A magnetita é obtida a partir do beneficiamento de minério de ferro, mais precisamente na etapa de separação magnética dos finos após a etapa de flotação. É um elemento químico formado por óxido de ferro ($Fe_2O_3$) e apresenta forma isométrica cristalina, mais comumente na forma octaédrica. Suas propriedades podem ser vistas na tabela da figura 14.

Figura 13 – Estrutura física da partícula de magnetita.




Fonte: Geociências USP.[3]

Figura 14 – Propriedades da magnetita.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Classificação | Óxido | Fórmula Química | $Fe_3O_4$ |
| Dureza | 6 | Brilho | Metálico |
| Cor | Preto do ferro. | Composição | $Fe_3O_4$ ou $FeFe_2O_4$. Fe 72,4%, O 27,6. Pode conter alguma proporção de Mg, $Mn^{2+}$, Al, Cr, $Mn^{3+}$. |
| Cristalografia | Isométrico | Classe | 4/m ¯3 2/m |
| Hábito | Cristais octaédricos. Maciça granular, de granulação grossa a fina. | Clivagem | Partição octaédrica. |
| Fratura | | Densidade relativa | 5,18 |
| Propriedades Ópticas | Isotropo | Propriedades Diagnósticas | Magnetismo forte, cor e dureza. |
| Associação | Ao corindon e corpos titaníferos. | Ocorrência | Mineral acessório em muitas rochas magmáticas. Pode-se tornar principal constituinte de rochas altamente titaníferas por segregação magmática. Também ocorre em rochas metamórficas cristalinas, rochas de composição básica, e como lentes incluídos em rochas metamórficas antigas. |
| Usos | Importante minério de ferro. | Traço | Preto |

Fonte: Geociências USP[4].

Entre as propriedades que a magnetita possui e que se assemelham às propriedades da brita (já utilizada em reforços de subleitos e em sub-bases), as quais também a viabilizam inicialmente como material de reforço na correção granulométrica, estão sua dureza, sua curva

[3] Disponível em: https://didatico.igc.usp.br/minerais/oxidos-hidroxidos/magnetita/. Acesso em: agosto de 2023.
[4] Disponível em: https://didatico.igc.usp.br/minerais/oxidos-hidroxidos/magnetita/. Acesso em: agosto de 2023.

de granulometria e seu comportamento inerte quando adicionada a solos, sendo esta última característica evidenciada na própria mistura da “lama” de rejeito.

## 3 MATERIAIS E METODOLOGIA

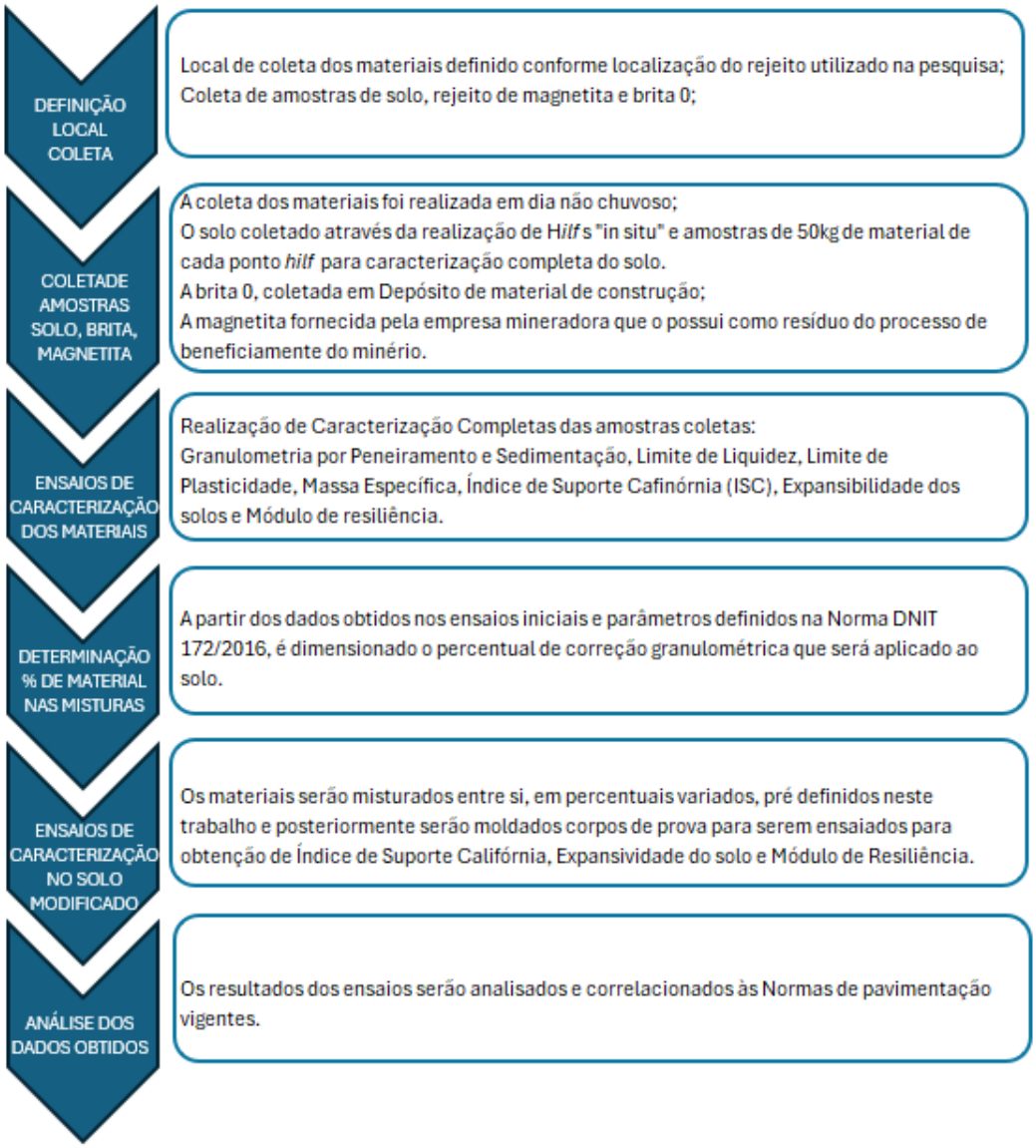
Os materiais selecionados para este estudo foram coletados na cidade de Araxá, no estado de Minas Gerais, próximo à localização da empresa mineradora que forneceu o rejeito.

O estudo foi desenvolvido com rigor tecnológico, seguindo as normas pertinentes vigentes, e de forma sequenciada:

1) Seleção e coleta de amostras de materiais (solo, rejeito e brita) e realização de caracterização física do material coletado, por meio de ensaios laboratoriais normatizados;
2) Realização de ensaios de Índice de Suporte Califórnia e expansividade das misturas de solo + brita, solo + rejeito e solo + brita + rejeito, além do ensaio de Módulo de resiliência;
3) Análise dos resultados obtidos dos ensaios realizados inicialmente no solo coletado e posteriormente nas misturas de solo, brita e rejeito, em comparação aos valores preconizados nas normas pertinentes.

Na figura 15 pode ser visualizado de forma sucinta o fluxo de atividades desenvolvidas na pesquisa.

Figura 15 – Fluxograma geral das atividades realizadas no projeto de pesquisa




Fonte: a autora.

## 3.1 Seleção, coleta e caracterização dos materiais.

### 3.1.1 Seleção dos materiais

O rejeito de magnetita foi fornecido por uma empresa mineradora, localizada em Minas Gerais, na região do Alto Paranaíba (ver localização na figura 16), que possui, como resultado do processo de beneficiamento do minério, o rejeito composto predominantemente por magnetita.

Figura 16 – Localização da empresa fornecedora do rejeito magnetita

Fonte: adaptado do Google Maps pela autora.

A amostra de solo foi cedida por uma empresa de serviços de terraplanagem e mineração, localizada na cidade de Araxá/MG, que possui uma área de intenso fluxo de equipamentos e veículos de carga e transporte, cuja previsão futura é de ser pavimentada (ver localização na figura 17).

Figura 17 – Localização da empresa fornecedora do solo

Fonte: adaptado do Google Maps pela autora.

A brita utilizada nos ensaios foi adquirida em uma casa de material de construção, também na cidade de Araxá, cuja produção tem origem nas proximidades da cidade em que foi coletado o solo.

### 3.1.2 Coleta dos materiais

A amostra de rejeito foi coletada pela empresa mineradora, preparada (quarteado[5]), acondicionada em sacos plásticos e entregue em caixas devidamente identificadas (ver figuras 18 e 19). A empresa foi responsável pela realização dos ensaios de caracterização granulométrica do rejeito e pelo fornecimento dos resultados obtidos nos ensaios para sua utilização nos estudos.

[5] Quarteado = quarteamento: processo em que a amostra global do material é reduzida em amostras menores e representativas, obtidas por meio do processo de divisão em frações homogêneas até a porção que se deseja.

Figura 18 – Rejeito de magnetita coletado e preparado para fornecimento

Fonte: a autora.

Figura 19 – Rejeito de magnetita entregue pela empresa mineradora

Fonte: a autora.

Conforme indicado no *Manual de pavimentação* do DNIT, o estudo de subleito e sub-base é realizado em duas fases: sondagem para coleta do material e realização de ensaios. No manual, são especificados procedimentos voltados para a coleta e a realização de ensaios no material em áreas de execução de estradas, porém, como o local previsto para ser pavimentado, onde foram coletadas as amostras, trata-se de uma área de tráfego e guarda de equipamentos e veículos e não de uma estrada propriamente dita, adotou-se e seguiu-se procedimentos de normas distintas. Para a realização de coleta de solo, no que tange à definição e ao posicionamento dos pontos de coletas utilizou-se o *Manual de pavimentação* do DNIT e no que se refere à coleta do material, foi utilizada a norma NBR 6457/17 – Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade.

Foram selecionados seis pontos de coleta, posicionados nos bordos do acesso principal da área prevista para pavimentação, distanciados do eixo a em média 3,50 metros e distanciados entre si, no sentido longitudinal, a no máximo 50 metros, como ilustrado na figura 20.

Figura 20 – Pontos de coleta do solo

Fonte: adaptado do Google Maps pela autora.

Nos locais definidos dos pontos, foram abertas trincheiras com profundidade a partir de 0,60 metros e realizado a coleta de 50 kg de material, em cada trincheira aberta, acondicionados em sacos plásticos, devidamente nomeados. Posteriormente, o solo coletado foi encaminhado ao laboratório no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais na unidade de Araxá, para realização dos ensaios iniciais de caracterização. Na figura 21 pode ser visualizada a etapa da coleta do material.

Figura 21 – Coleta de solo por meio de abertura de trincheiras e cravação de cilindros.

Fonte: a autora.

Para a escolha do agregado, foram avaliadas a granulometria e a interação esperada do rejeito de magnetita disponibilizado em comparação aos materiais comumente utilizados na correção granulométrica, resultando na escolha do material comercializado como brita nº 0 (figura 22), com granulometria variando entre 4,8mm a 9,5mm. As amostras foram coletadas no depósito de material de construção e acondicionadas em sacos plásticos, devidamente nomeadas para serem encaminhadas ao laboratório.

Figura 22 – Brita nº0 coletada no depósito de material de construção.

Fonte: a autora.

### 3.1.3 Caracterização dos materiais coletados.

Para a caracterização física dos materiais coletados, seguiram-se as normas pertinentes e vigentes conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Relação de normas utilizadas no desenvolvimento da pesquisa

| NORMAS | ENSAIOS |
|---|---|
| NBR 6457/17 | Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização |
| NBR 6458/17 | Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm - Determinação da massa específica, massa específica aparente e da absorção de água. |
| NBR 6459/17 | Solo - Determinação do Limite de Liquidez |
| NBR 7180/16 | Solo - Determinação do Limite de Plasticidade |
| NBR 7181/19 | Solo - Análise Granulométrica |
| NBR 7182/16 | Solo - Ensaio de compactação |
| NBR 9813/16 | Solo - Determinação da massa específica aparente in situ com emprego de cilindro de cravação |
| NBR 9895/17 | Solo - Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio |
| DNIT 134/18-ME | Solos - Determinação do Módulo de Resiliência |
| DNIT 137/10-ME | Pavimentação - Regularização do subleito - Especificações de serviço |
| DNIT 172/16-ME | Solo - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas - Método de ensaio |
| DNIT 160/12-ME | Determinação da Expansividade |

Fonte: a autora.

As amostras de solo foram preparadas antes da realização dos ensaios, conforme a norma NBR 6457/17. O material foi seco até a umidade higroscópica, em estufa a 105 °C, por, no mínimo, 24 horas. Posteriormente o material foi destorroado com a utilização de almofariz, para evitar a quebra dos grãos, e em seguida o volume foi homogeneizado e quarteado para obtenção de amostras reduzidas e representativas do todo (figura 23).

Figura 23 – Preparação do solo coletado para realização dos ensaios de caracterização

Fonte: a autora.

Os dados a serem obtidos dos materiais coletados, para sua caracterização são a Granulometria ou distribuição granulométrica, Massa específica dos grãos, Limite de liquidez, Limite de plasticidade, Expansividade do solo, Índice de suporte Califórnia e Módulo de resiliência.

A distribuição granulométrica e a curva granulométrica do rejeito magnetita foram fornecidos juntamente com o material.

Para obtenção da caracterização granulométrica do solo, foi realizado ensaios em laboratório, de acordo com a norma NBR 7181/19. Após a preparação do material conforme a norma NBR 6457/17, a amostra foi passada na peneira de 2 mm. O material retido nessa peneira foi lavado, de modo que somente o material com granulometria maior que a malha da peneira utilizada, permanecesse retido. Em seguida esse material foi passado pelas peneiras de 50 mm, 37,5 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,75 mm, com auxílio de agitador mecânico, como pode ser visto na figura 24.

Figura 24 – Ensaio de peneiramento do solo

Fonte: a autora.

Em seguida, para conhecimento da curva granulométrica do material fino, sucedeu-se o ensaio de sedimentação conforme preconiza a norma, tendo sido realizada a leitura do densímetro em solução, após a mistura do solo com defloculante (hexametafosfato de sódio) em um béquer. (figura 25).

Figura 25 – Ensaio de sedimentação do solo

Fonte: a autora.

Após a realização dos ensaios de peneiramento e sedimentação do solo coletado, para caracterização e obtenção da curva granulométrica, foi realizado o ensaio para a obtenção da massa específica dos grãos, conforme NBR 6458/17, com utilização de picnômetro (ver figura 26).

Figura 26 – Ensaio de determinação massa específica dos grãos do solo

Fonte: a autora.

Para a obtenção do limite de liquidez do solo foi realizado o ensaio no aparelho de “Casagrande”, conforme a norma NBR 6459/17. A amostra foi preparada conforme a norma NBR 6457/17, tendo sido anotado o número de golpes recebidos pela concha do aparelho. ( figura 27).

Figura 27 – Ensaio de Limite de liquidez do solo

Fonte: a autora.

O Limite de plasticidade do solo foi obtido através do ensaio realizado conforme a norma NBR 7180/16. A amostra foi preparada conforme a norma NBR 6457/17, e moldada com as palmas das mãos, formando sobre uma placa de vidro um cilindro de solo com espessura de 3 mm e comprimento de 100 mm, conforme gabarito, até que ele apresentasse pequenas fissuras. (figura 28).

Figura 28 – Ensaio de Limite de plasticidade do solo

Fonte: a autora.

O percentual de Expansividade do solo é aferido através do ensaio descrito na norma DNIT 172/16-ME. A amostra de solo coletada (nesse ensaio é recomendada a utilização de 50 kg de material) foi preparada conforme a norma NBR 6457/17.

Procede-se a compactação do material em camadas dentro do cilindro de CBR, empregando a energia de compactação normal (12 golpes de soquete por camada), para avaliar primeiramente a utilização do material como camada de subleito. Para determinação da umidade, retirou-se uma porção excedente de material do processo de moldagem e compactação do solo no cilindro e pesou-se esse material, que foi então levado à estufa conforme a norma NBR 6457/17. Esse procedimento foi realizado cinco vezes para obtenção da curva de compactação do solo.

Após as moldagens dos corpos de prova, seguindo o normativo, foi inserida a haste do relógio comparador (deflectômetro) colocado na borda superior do cilindro, realizada a leitura inicial do relógio e, posteriormente, feita a submersão de cada corpo de prova em um tanque com água, permanecendo no mínimo por quatro dias, efetuando-se a leitura a cada 24 horas. O percentual de expansão é a relação da diferença de leitura final e inicial do deflectômetro pela altura inicial do corpo de prova.

Passado o período determinado em norma, retiram-se os corpos de prova do tanque e deixa-se escoar a água durante 15 minutos, para posteriormente se iniciar o ensaio de penetração para determinação do ISC (figura 29).

Figura 29 – Ensaio de Expansividade do solo.

Fonte: a autora.

Para obter o percentual do Índice de Suporte Califórnia, após a realização do ensaio de expansão, retiram-se os corpos de prova do tanque, deixa-se escoar sua água durante 15 minutos e inicia-se o ensaio de penetração, conforme a norma DNIT 172/16-ME.

Na prensa, o cilindro é posicionado sob o pistão de penetração, o relógio comparador (deflectômetro) é zerado, e então aciona-se a prensa com velocidade de penetração de 1,27 mm/min com aplicação de uma carga de aproximadamente 45 Newtons, aferindo-se a leitura

do relógio entre 0,5 minuto e 10 minutos, conforme especificado em norma. Finalizada a penetração, traça-se a curva de pressão-penetração.

Figura 30 – Ensaio de Índice de Suporte Califórnia do solo

Fonte: a autora.

Nessa etapa inicial em que os ensaios são realizados no solo coletado, devido à indisponibilidade de equipamento no laboratório para realização do ensaio triaxial de carga repetida para obtenção do módulo de resiliência, optou-se por estimá-lo de forma indireta, a partir da porcentagem de silte que passa pela peneira de nº 200 (0,075 mm) e do valor de CBR do solo, demonstrados na tabela 4.

Tabela 4 – Classificação de solos finos quanto ao tipo de comportamento resiliente pelo método indireto

| CBR | S% (fração de silte que passa na peneira de nº200) | | |
|---|---|---|---|
| | ≤ 35 | 35 - 65 | ≥ 65 |
| ≤ 5 | III | III | III |
| 6 - 9 | II | II | III |
| ≥ 10 | I | II | III |

Fonte: Adaptado de *Manual de pavimentação* – DNIT, 2006.

## 3.2 Confecção de misturas de solo, rejeito e brita e realização de ensaios de caracterização das misturas

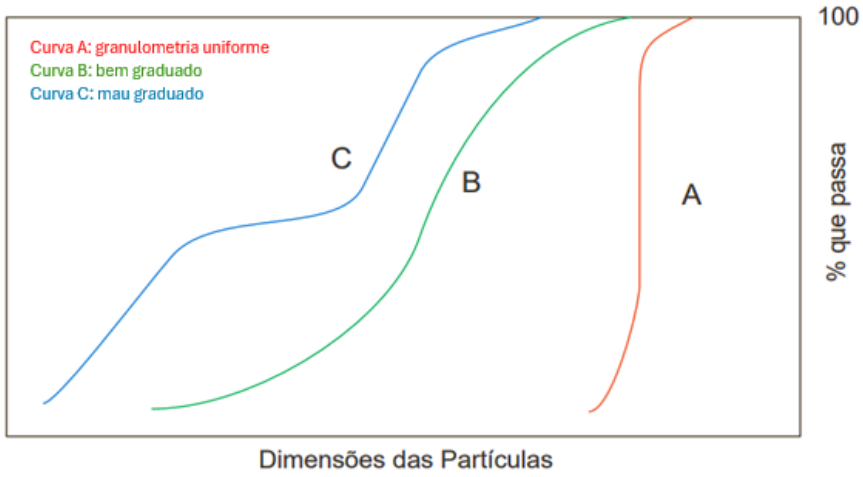
Diante do objetivo geral desta pesquisa em avaliar a utilização do rejeito de Magnetita como alternativa de material de reforço de camada granular de pavimento nas camadas de

subleito e sub-bases (neste estudo em específico), a estabilização granulométrica foi a solução adotada para alcançar a melhoria na resistência a carregamentos incidentes do tráfego, cuja função é inerente à característica destas camadas de pavimentos, a ser avaliada a partir da confecção de misturas de solo, rejeito de Magnetita e brita nº 0.

### 3.2.1 Confecção das misturas

Para a realização da estabilização granulométrica, será adicionado ao solo coletado, material agregado de granulometria maior (adotada a brita nº 0, neste trabalho) que lhe atribuirá maior resistência, e à esta mistura será incorporado material de granulometria fina, a Magnetita, para que esta preencha os vazios presentes proporcionando maior densidade, menor permeabilidade e deformabilidade, resultando assim em uma curva granulométrica bem graduada (figura 31).

Figura 31 – Tipos de faixas granulométricas conforme graduação das partículas.




Fonte: *Manual de pavimentação* – DNIT, 2006.

A determinação dos percentuais de mistura dos materiais (solo, rejeito e magnetita) foi embasada em pesquisas de estabilização granulométrica realizadas com materiais alternativos, tais como resíduo da construção civil, material fresado, escória de ferro níquel e rejeito.

Em seu estudo, Coelho *et al*. (2021), aplicando escória de ferro-níquel em pavimento asfáltico, observou que na camada de base, o solo utilizado classificado como laterítico argiloso, com cerca de 30% de pedregulho; com a adição de 30% de escória, apresentou acréscimo de 10% no valor de CBR, além do aumento do seu valor de massa específica seca máxima e diminuição do seu teor de umidade ótima.

Em outra pesquisa desenvolvida utilizando material fresado como reforço de solo para composição de camadas de sub-base, Vieira *et al*. (2021), classificou o solo em estudo como uma argila-siltosa medianamente plástica ausente de características que o possibilitasse de ser utilizado em nenhuma camada de pavimentação, sendo a composição de 70% de material fresado e 30% de solo, a mistura que apresentou resultados satisfatórios em expansão e CBR para uso de camada de sub-base. Observou também que o mesmo solo com adição somente de 30% de material fresado seria suficiente para atingir parâmetros exigidos pelo manual de pavimentação do DNIT para camada de subleito.

Na análise de estabilização granulométrica com utilização de escória, cujo solo apresentava índice de plasticidade de 16% e classificação HRB A-2-6 (areias siltosas ou argilosas), "a maior resistência foi para a mistura com 60% de escória, o que indica uma melhor estabilização granulométrica", e "no ensaio de ISC a mistura com 60% de escória apresentou o maior valor de capacidade de suporte" (SANTOS, 2019, p. 39).

No estudo de camada de reforço com resíduos de construção e demolição Niehues (2018), conclui que as propriedades do solo natural não o possibilitava de ser utilizado com subleito, e afirma que as misturas contendo 50% de agregado de resíduo da construção civil e 50% de solo de granulometria fina e misturas contendo 70% de agregado de resíduo da construção civil e 30% de solo de granulometria fina, ambas compactadas na energia Normal apresentaram valores de CBR e expansão dentro dos limites do normativo do DNIT para utilização em camadas de subleito, sendo estas mesmas misturas compactadas na energia Modificada apresentaram valores de CBR e expansão dentro dos limites do normativo do DNIT para utilização em camadas de sub-base.

Em sua pesquisa de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração, Rodrigues (2018) cita,

> [...] a partir do ensaio CBR com a expansão pode-se afirmar que o solo amarelo originalmente não poderia ser utilizado como base ou sub-base de pavimentos, mas com a substituição parcial de rejeito nas porcentagens de 10% e 20%, que forneceram 33,50% e 44,50% de CBR e 0,25% e 0,13% de expansão, passou a ser possível ser utilizado como sub-base, [..]. No caso do solo vermelho, por meio dos ensaios de CBR e expansão, o mesmo, já poderia ser utilizado como sub-base com valores de 31% de CBR e de 0,51% de expansão. (RODRIGUES, 2018, p. 68)

Em relação à utilização de brita na estabilização de solos, Silva (2018) em seu trabalho avaliou camadas de base de solo misturado com brita em proporções de 30%, 50% e 70%,

concluindo ao final que as três misturas poderiam ser utilizadas em bases de pavimentos para tráfego leve, médio ou pesado, de acordo com as especificações de CBR e expansão.

Frente às análises das pesquisas realizadas, definiu-se para este estudo a utilização de rejeito magnetita em percentuais variando de 20% a 40%, em referência aos estudos de Rodrigues (2018) e Santos (2019); por outro lado a adição de brita nº 0 foi estipulada em 10%, abaixo dos estudos já realizados, para que seja avaliado a relação solo-magnetita, sendo a adição da brita neste contexto, um material de complemento granulométrico entre os dois primeiros materiais. A confecção das misturas foi realizada no laboratório da empresa SoloCap, na cidade de Belo Horizonte - MG. O percentual de adição de cada material nas misturas pode ser visto na tabela 5.

Tabela 5 – Proporção percentual de mistura de materiais para correção granulométrica do solo

| IDENTIFICAÇÃO DA MISTURA | PERCENTUAL DE MATERIAL NA MISTURA | | |
|---|---|---|---|
| | SOLO | MAGNETITA | BRITA |
| M1 | 80% | 20% | 0% |
| M2 | 70% | 30% | 0% |
| M3 | 60% | 40% | 0% |
| M4 | 70% | 20% | 10% |
| M5 | 60% | 30% | 10% |
| M6 | 50% | 40% | 10% |

Fonte: a autora.

### 3.2.2 Caracterização das misturas

Após a preparação do material conforme a norma NBR 6457/17 e a confecção das misturas dos materiais, foram realizados os ensaios de: caracterização granulométrica, conforme a norma NBR 7181/19; massa específica dos grãos, conforme a norma NBR 6458/16; limite de liquidez, conforme a norma NBR 6459/17; e limite de plasticidade, conforme a norma NBR 7180/16. As figuras 32, 33, 34, 35 e 36 mostram, respectivamente, os materiais e as misturas preparadas para a realização do ensaio de caracterização granulométrica por peneiramento, limite de liquidez, CBR, expansividade e módulo de resiliência.

Figura 32 – Ensaio de granulometria nas misturas

Fonte: a autora.

Figura 33 – Ensaio de limite de liquidez nas misturas

Fonte: a autora.

Figura 34 – Ensaio CBR nas misturas

Fonte: a autora

Figura 35 – Ensaio de expansividade nas misturas

Fonte: a autora.

Figura 36 – Ensaio triaxial para obtenção de módulo de resiliência nas misturas

Fonte: a autora.

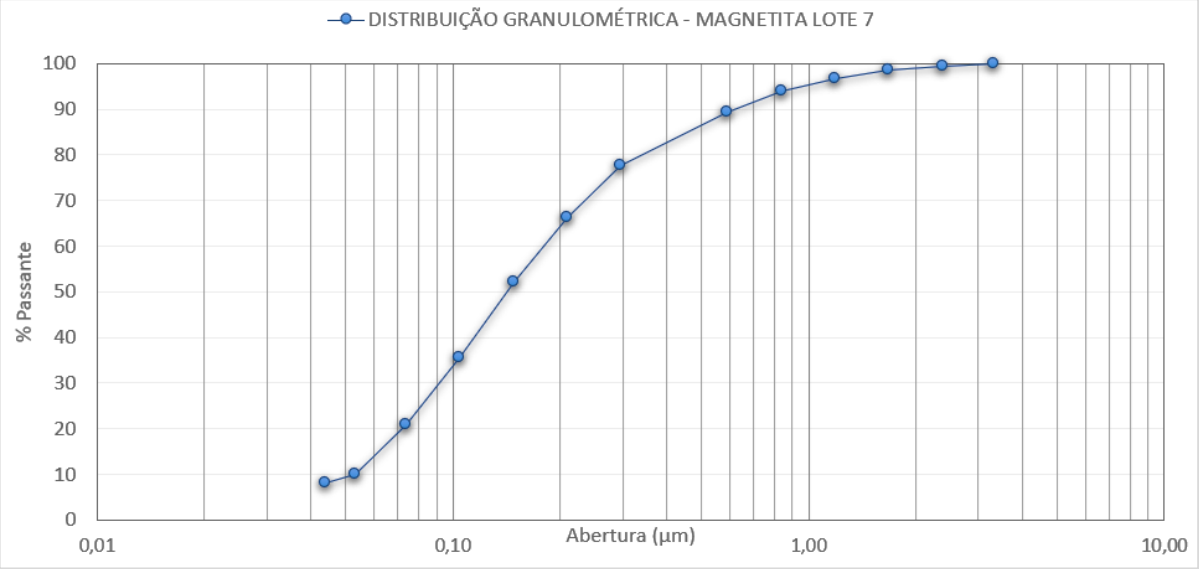
# 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 4.1 Materiais coletados.

A distribuição granulométrica e a curva granulométrica do rejeito magnetita foram fornecidos juntamente com o material. A partir da análise do resultado obtido demonstrado no gráfico 1, pode-se verificar que o rejeito possui granulometria característica de materiais granulares tanto de acordo com a classificação SUCS, que descreve como "material de granulometria" grossa aquele que fica retido 50% ou mais na peneira de malha 0,075 mm, tendo o rejeito apresentado 79,21% de material retido, quanto de acordo com a classificação HRB, que descreve como "material granular" aquele que apresenta 35% ou menos de material passante na peneira de malha 0,075 mm, tendo o rejeito apresentado 20,79% de material passante na peneira dessa malha.

Ainda, conforme a classificação SUCS, a classificação "areia fina" é empregada quando há 50% ou mais de material passante na peneira de malha 4,75 mm, podendo o rejeito ser classificado nessa faixa granulométrica por apresentar 100% de material passante nessa malha.

Gráfico 1 – Distribuição granulométrica do rejeito magnetita



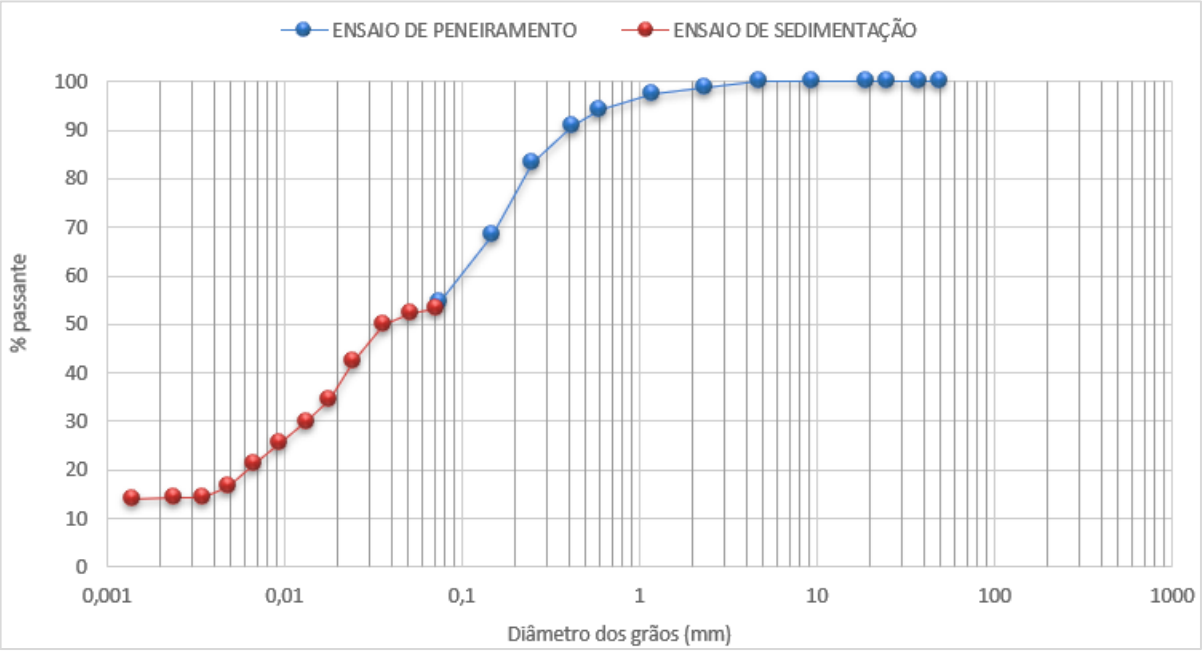

Fonte: empresa fornecedora do rejeito.

Para a realização do ensaio de caracterização granulométrica do solo coletado, foi utilizada a norma NBR 7181/19. Após a realização dos ensaios de peneiramento e sedimentação do solo coletado, pode-se verificar que a amostra de solo coletada possui granulometria característica de materiais finos tanto de acordo com a classificação SUCS, que descreve como "material de granulometria fina" aquele que passa pela peneira de malha 0,075 mm em

proporção de mais de 50%, tendo o solo apresentado 54,63% passante, quanto de acordo com a classificação HRB, que descreve como “material fino” aquele que apresenta 36% ou mais de material passante na peneira de malha 0,075 mm (gráfico 2).

Ainda, conforme o sistema de classificação HRB, o material pode ser classificado como “silte” ou “argila”, e, conforme o sistema de classificação SUCS pode, ser classificado como “silte” ou “argila arenosa”. Desse modo, a definição correta é possível após a análise do resultado dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade.

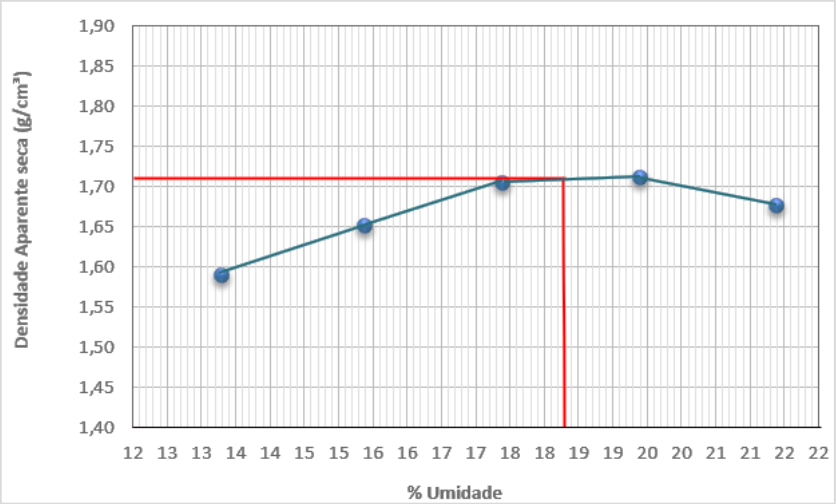
Gráfico 2 –Curva granulométrica obtida do solo coletado




Fonte: a autora.

Após obtenção da curva granulométrica, foi realizado o ensaio para a obtenção da massa específica dos grãos, conforme NBR 6458/17, através do gráfico de compactação, aferindo-se o valor de 1,71 g/cm³. Os resultados dos ensaios podem ser vistos no gráfico 3.

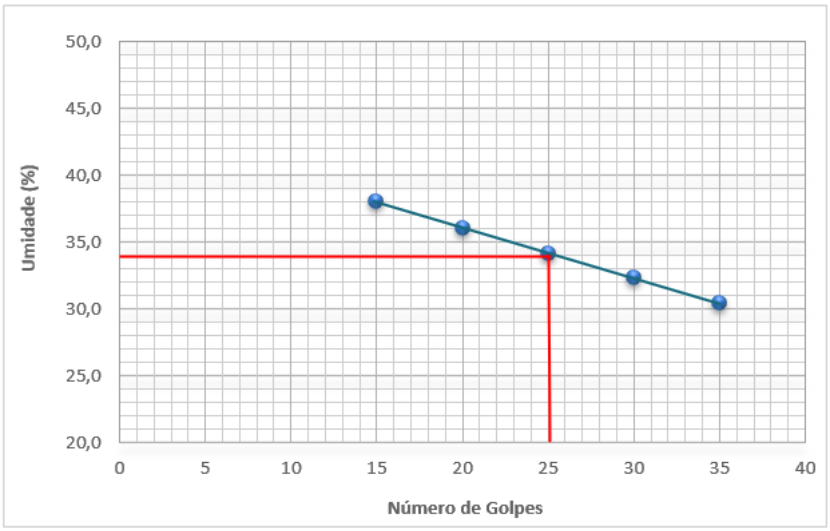
Gráfico 3 – Curva de compactação - massa específica do solo




Fonte: a autora.

Para a obtenção do limite de liquidez do solo foi realizado o ensaio no aparelho de “Casagrande”, conforme a norma NBR 6459/17. Após a realização do ensaio foi obtido o resultado de limite de liquidez de 34%, como pode ser visto no gráfico 4.

Gráfico 4 – Limite de liquidez do solo




Fonte: a autora.

Para a obtenção do limite de plasticidade do solo foi realizado o ensaio conforme a norma NBR 7180/16. A amostra foi preparada conforme a norma NBR 6457/17. O resultado obtido do ensaio de limite de plasticidade foi de 22,39%, como pode ser visto na tabela 6.

Tabela 6 – Resultado Limite de plasticidade do solo

| LIMITE DE PLASTICIDADE DO SOLO | | | |
|---|---|---|---|
| DETERMINAÇÃO Nº | 1 | 2 | 3 |
| CÁPSUL Nº | 57 | 38 | 56 |
| M CÁPSULA + SOLO + ÁGUA (g) | 6,10 | 6,00 | 6,20 |
| M CÁPSULA + SOLO (g) | 5,93 | 5,74 | 6,05 |
| M CÁPSULA (g) | 5,18 | 4,70 | 5,35 |
| PLASTICIDADE PONTO (%) | 22,67% | 23,08% | 21,43% |
| PLASTICIDADE (%) | | 22,39% | |

Fonte: a autora.

De posse dos dados de limite de liquidez e limite de plasticidade, o solo é classificado conforme o sistema SUCS, sendo calculados os coeficientes de uniformidade (Cu = equação 1) e de curvatura (Cc = equação 2).

Eq. (1)

$$Cu = \frac{D60}{D10}$$

$$Cu = \frac{0{,}1}{0{,}0025}$$

$$\boldsymbol{Cu = 40}$$

Eq. (2)

$$Cc = \frac{D30^2}{D10\ x\ D60}$$

$$Cc = \frac{0{,}015^2}{0{,}0025\ x\ 0{,}1}$$

$$\boldsymbol{Cc \approx 1}$$

Desse modo a amostra de solo coletada caracteriza-se como material desuniforme (Cu > 15), por apresentar coeficiente de uniformidade de 40, e bem-graduado (1 < Cc < 3), por apresentar coeficiente de curvatura de aproximadamente 1. Ainda conforme o sistema de classificação SUCS, é uma argila inorgânica de baixa e média plasticidade (argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas).

Para a classificação do material conforme o sistema HRB, é necessário realizar o cálculo do índice de grupo por meio da equação 3.

Eq. (3)

$$IG = [0{,}2\ (F200 - 35)] + [0{,}005\ (F200 - 35)(LL - 40)] + [0{,}01(F200 - 15)(IP - 10)]$$

$$IG = [0{,}2\ (54{,}63 - 35)] + [0{,}005\ (54{,}63 - 35)(34 - 40)] + [0{,}01(54{,}63 - 15)(11{,}61 - 10)]$$

$$IG = [0{,}2\ (19{,}63)] + [0{,}005\ (19{,}63)(-6)] + [0{,}01\ (39{,}63)(1{,}61)]$$

$$IG = [3{,}926] + [-0{,}5889] + [0{,}6380]$$

$$\boldsymbol{IG = 3{,}97}$$

Assim, com o índice de grupo no máximo até 4, o limite de liquidez de 34% e o índice de plasticidade de 11,61%, conforme o sistema de classificação HRB, o solo é classificado como “argiloso”, com comportamento em subleito de “sofrível a mau”, evidenciando assim *“a priori”*, necessidade de melhoramento desse solo, ou seja, execução de reforço.

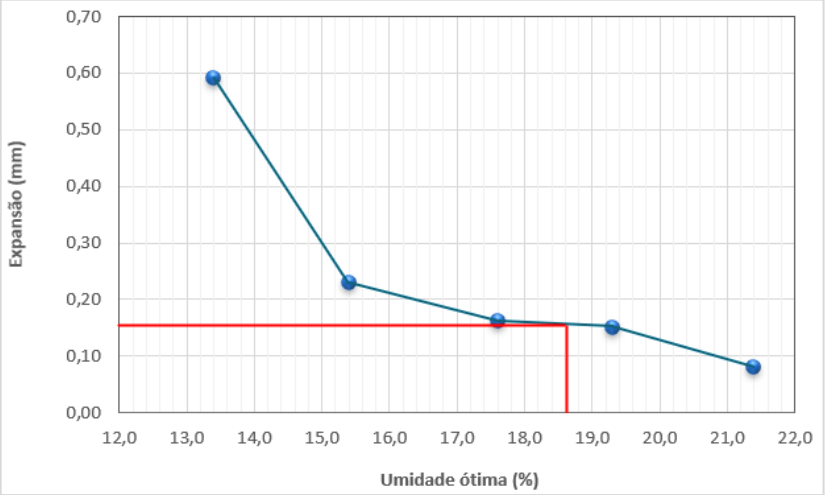
Para a obtenção do percentual de expansividade do solo, foi realizado o ensaio conforme a norma DNIT 172/16-ME. A amostra de solo coletada foi preparada conforme a norma NBR 6457/17. Para calcular o percentual de expansão de cada corpo de prova é utilizada a equação 4.

Eq. (4)

$$Expansão\ (\%) = \frac{leitura\ final - leitura\ inicial\ do\ relógio\ comparador\ (deflectômetro)}{altura\ inicial\ do\ corpo\ de\ prova}\ x\ 100$$

Os resultados obtidos dos corpos de prova ensaiados demonstraram percentual de expansividade médio de 0,15% na umidade ótima de 18,6% (ver gráfico 5).

Gráfico 5 – Resultado percentual de Expansão do solo coletado




Fonte: a autora.

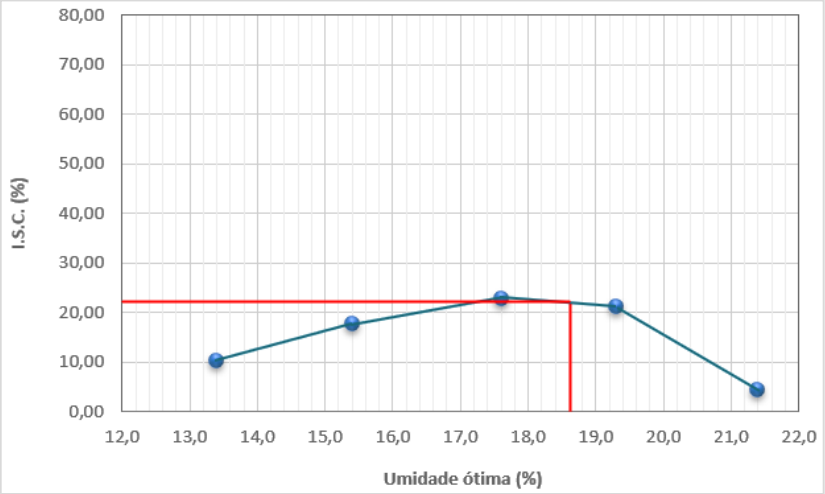
Após a realização do ensaio de expansão, retiram-se os corpos de prova do tanque, deixa-se escoar sua água durante 15 minutos e inicia-se o ensaio de penetração, conforme a norma DNIT 172/16-ME, para obter o percentual do Índice de Suporte Califórnia. Para calcular o Índice de Suporte Califórnia de cada corpo de prova utiliza-se a equação 5

Eq.(5)

$$ISC = \frac{pressão\ calculada\ ou\ pressão\ corrigida}{pressão - padrão}\ x\ 100$$

Os resultados obtidos dos corpos de prova ensaiados demonstraram Índice de Suporte Califórnia médio de 23,10% na umidade ótima de 18,6%, como pode ser visto no gráfico 6.

Gráfico 6 – Resultado Índice de Suporte Califórnia do solo coletado.




Fonte: a autora.

Nessa etapa inicial, em que os ensaios são realizados no solo coletado devido à indisponibilidade de equipamento no laboratório para realização do ensaio triaxial de carga repetida para obtenção do módulo de resiliência, optou-se por estimá-lo de forma indireta, a partir da porcentagem de silte que passa pela peneira de nº 200 (0,075 mm) e do valor de CBR do solo, demonstrados na tabela 7.

Tabela 7 – Classificação de solos finos quanto ao tipo de comportamento resiliente, pelo método indireto

| CBR | S% (fração de silte que passa na peneira de nº200) | | |
|---|---|---|---|
| | ≤ 35 | 35 - 65 | ≥ 65 |
| ≤ 5 | III | III | III |
| 6 - 9 | II | II | III |
| ≥ 10 | I | II | III |

Fonte: Adaptado de *Manual de pavimentação* – DNIT, 2006.

Tabela 8 – Resultados de CBR e expansão do solo coletado

| Massa Específica Aparente Seca máxima (g/cm³) | Umidade Ótima (%) | CBR (%) | Expansão (%) |
|---|---|---|---|
| 1,715 | 18,60 | 23,10 | 0,15 |

Fonte: a autora.

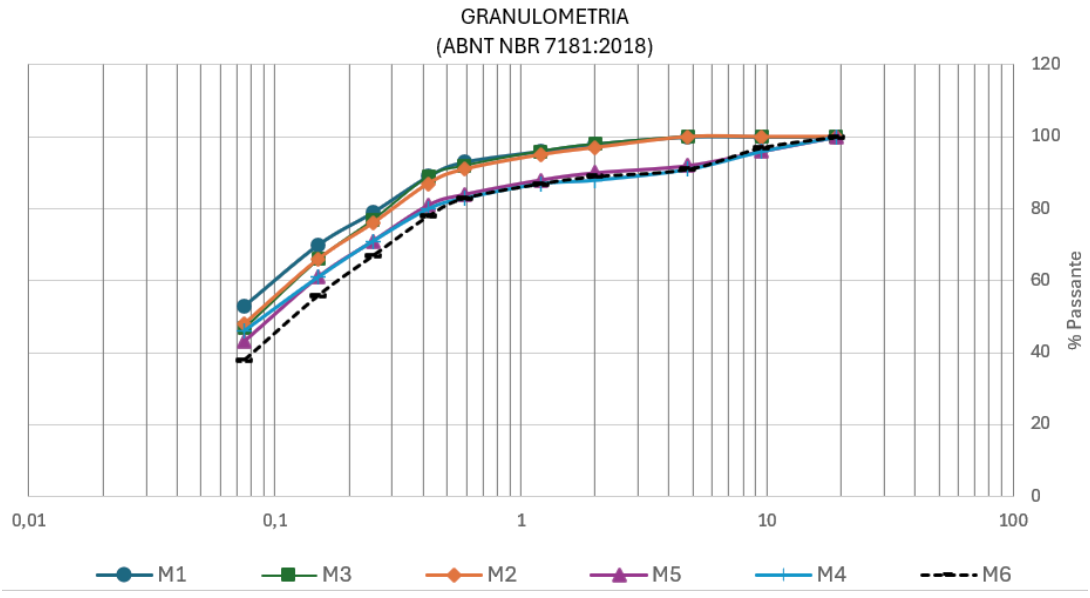
Assim, em função do valor de 23,10% de CBR e da fração de silte que passa na peneira de nº 200, de aproximadamente 40%, conforme tabela 8, a classificação do solo para cálculo do módulo de resiliência, é Tipo II (ver tabela 7). De acordo com o *Manual de pavimentação* – DNIT (2006), os solos Tipo II são classificados com comportamento regular quanto à resiliência como subleito e reforço do subleito.

## 4.2 Misturas confeccionadas.

De acordo com as granulometrias obtidas das misturas confeccionadas, as misturas 1, 3 e 4, foram classificadas como “areia argilo-siltosa” e as misturas 2, 5 e 6 foram classificadas como “areia silto-argilosa”, como pode ser visto na tabela 8.

A variação percentual de material granular nas misturas 4, 5 e 6, em comparação com as misturas 1, 2 e 3, é proporcional ao percentual de brita nº 0 inserida em substituição ao solo, que ocasionou em contrapartida, redução percentual de finos na curva granulométrica, contudo, mantendo ainda seu enquadramento como material de granulometria fina (gráfico 7).

Gráfico 7 – Curva granulométrica das misturas




Fonte: a autora.

Na tabela 9, pode-se verificar que, mesmo nas misturas em que foi adicionada a brita nº0, a granulometria de finos (passante na peneira de nº 200) variou entre 38 e 53%, próximo aos valores obtidos no solo coletado sem adições, cujo percentual de finos variou em média 54%.

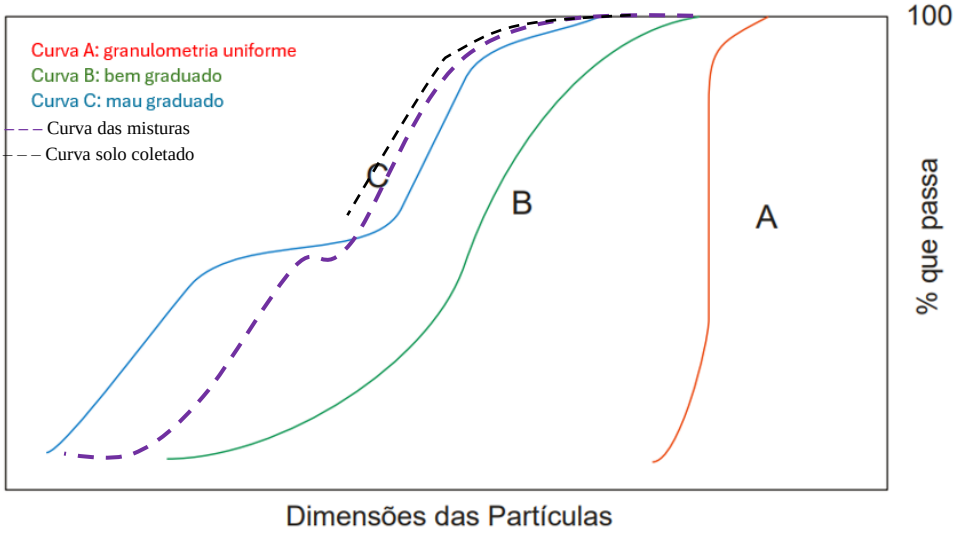
Tabela 9 – Granulometria obtida das misturas.

| | GRANULOMETRIA (ABNT NBR 7181:2018) | | % Passante (mm) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Misturas | % Passante (mm) | Classificação | 2" 50,4 | 1 1/2" 38,1 | 1" 25,4 | 3/4" 19,1 | 3/8" 9,52 | Nº4 4,76 | Nº10 2 | Nº16 1,2 | Nº30 0,59 | Nº40 0,42 | Nº60 0,25 | Nº100 0,15 | Nº200 0,075 |
| M1 | (80% Solo+20% Magnetita) | Areia Argilo Siltosa | - | - | - | 100 | 100 | 100 | 98 | 96 | 93 | 89 | 79 | 70 | 53 |
| M2 | (70% Solo+30% Magnetita) | Areia Silto Argilosa | - | - | - | 100 | 100 | 100 | 97 | 95 | 91 | 87 | 76 | 66 | 48 |
| M3 | (60% Solo+40% Magnetita) | Areia Argilo Siltosa | - | - | - | 100 | 100 | 100 | 98 | 96 | 92 | 89 | 77 | 66 | 47 |
| M4 | (70% Solo+20% Magnetita+10% Brita 0) | Areia Argilo Siltosa | - | - | - | 100 | 96 | 91 | 88 | 87 | 83 | 80 | 71 | 61 | 46 |
| M5 | (60% Solo+30% Magnetita+10% Brita 0) | Areia Silto Argilosa | - | - | - | 100 | 96 | 92 | 90 | 88 | 84 | 81 | 71 | 61 | 43 |
| M6 | (50% Solo+40% Magnetita+10% Brita 0) | Areia Silto Argilosa | - | - | - | 100 | 97 | 91 | 89 | 87 | 83 | 78 | 67 | 56 | 38 |

Fonte: a autora.

Assim como não houve grandes alterações na curva granulométrica das misturas em relação ao solo coletado no que diz respeito ao percentual granular (tabela 9 e gráfico 7), pôde-se concluir que foi obtida a condição de mau graduado (curva C da figura 37) para todas as misturas, assim como para o solo coletado.

Figura 37 – Classificação do solo em função da curva granulométrica




Fonte: Adaptado de *Manual de pavimentação* – DNIT, 2006.

Para a obtenção da massa específica dos grãos, após a preparação dos materiais conforme a norma NBR 6457/17 e após realizado o ensaio de CBR, com o material excedente

deste, foram realizados ensaios para a obtenção da umidade higroscópica e, em seguida, a obtenção da massa específica aparente seca máxima, obtendo-se os valores demonstrados na tabela 10.

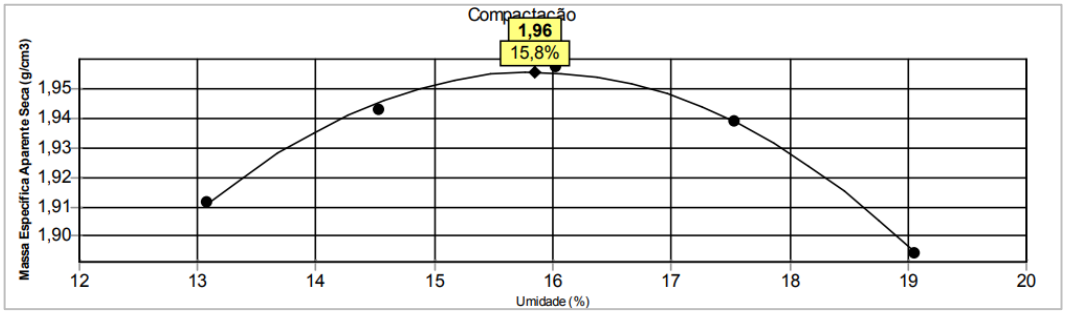
Tabela 10 – Massa específica aparente seca máxima das misturas

| | Misturas | Massa Específica Aparente Seca máxima (g/cm³) |
|---|---|---|
| MISTURA 1 | (80% Solo+20% Magnetita) | 1,955 |
| MISTURA 2 | (70% Solo+30% Magnetita) | 2,045 |
| MISTURA 3 | (60% Solo+40% Magnetita) | 2,081 |
| MISTURA 4 | (70% Solo+20% Magnetita+10% Brita 0) | 2,065 |
| MISTURA 5 | (60% Solo+30% Magnetita+10% Brita 0) | 2,194 |
| MISTURA 6 | (50% Solo+40% Magnetita+10% Brita 0) | 2,324 |

Fonte: a autora.

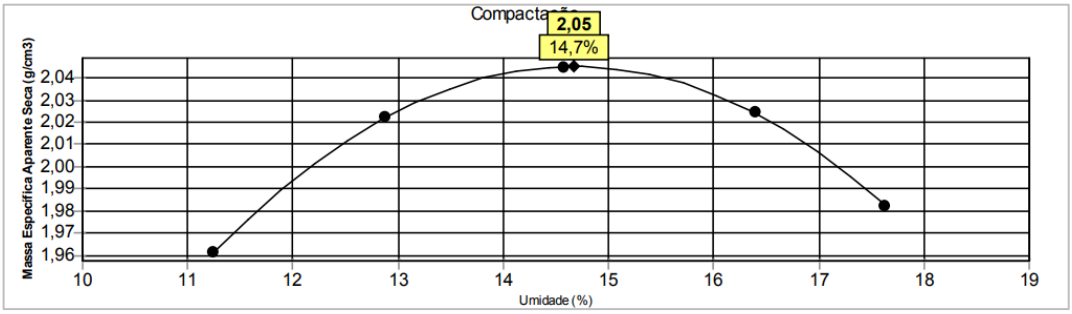
A mistura 6 apresentou maior valor de densidade em comparação com as demais misturas e aumento de 35% em comparação com o solo coletado, que apresentou 1,715 g/cm³. Outro ponto observado é o valor de densidade da mistura 3, que apresentou 2,081 g/cm³, ser menor que o valor de densidade da mistura 6, de 2,324 g/cm³, embora ambas tenham percentual de adição de magnetita iguais (40%). O fato pode ser explicado pela redução de percentual de solo da mistura 6 em relação ao da mistura 3, que ocasionou na mistura 6, 4% a mais de magnetita em comparação à mistura 3, sendo a magnetita o material das misturas com maior valor de densidade, aproximadamente 5 g/cm³. Pode-se correlacionar esses dados também com a presença da brita nº 0 na mistura 6, que pode ter aumentado, na média geral, a massa específica do conjunto. As curvas de compactação de cada mistura podem ser visualizadas nos gráficos 8 ao 13.

Gráfico 8 – Curva de compactação da mistura 1.



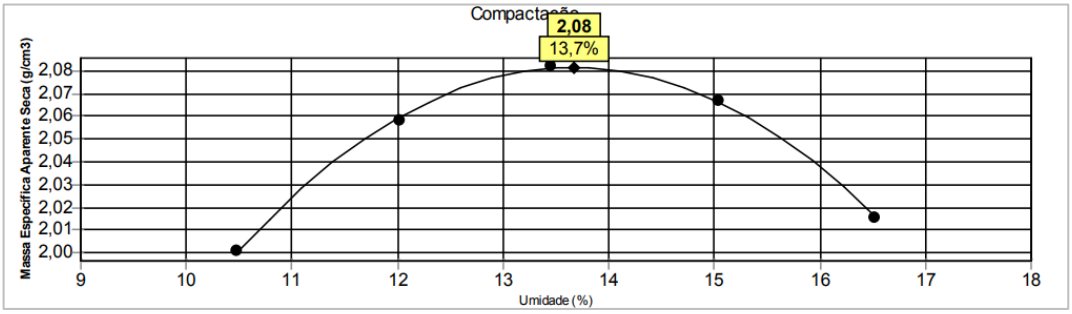

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 9 – Curva de compactação da mistura 2.



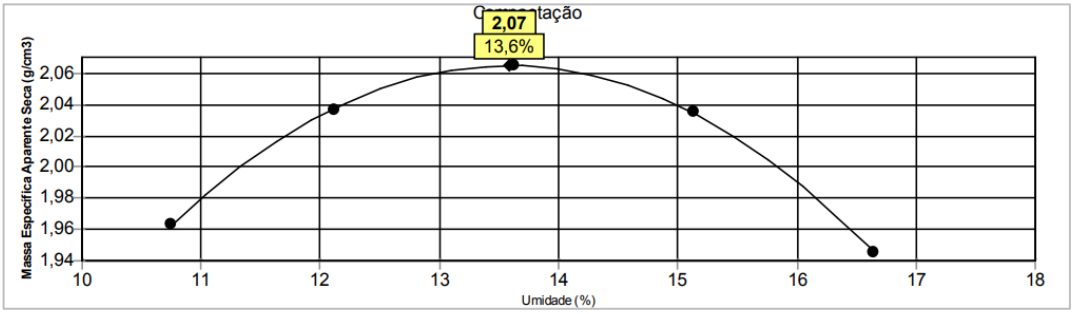

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 10 – Curva de compactação da mistura 3.



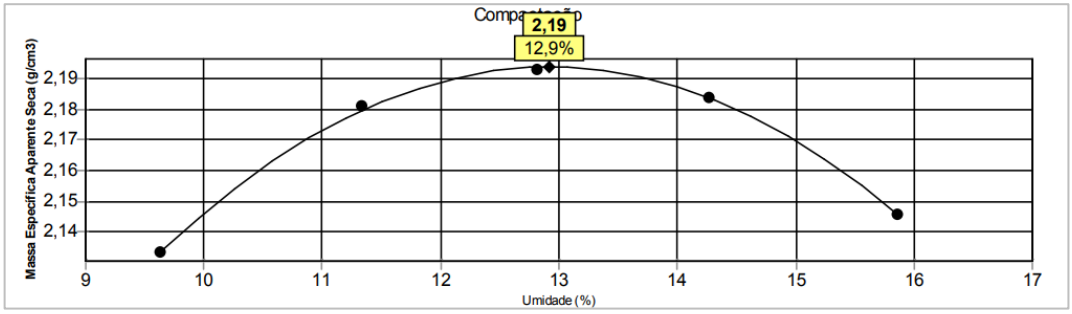

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 11 – Curva de compactação da mistura 4.



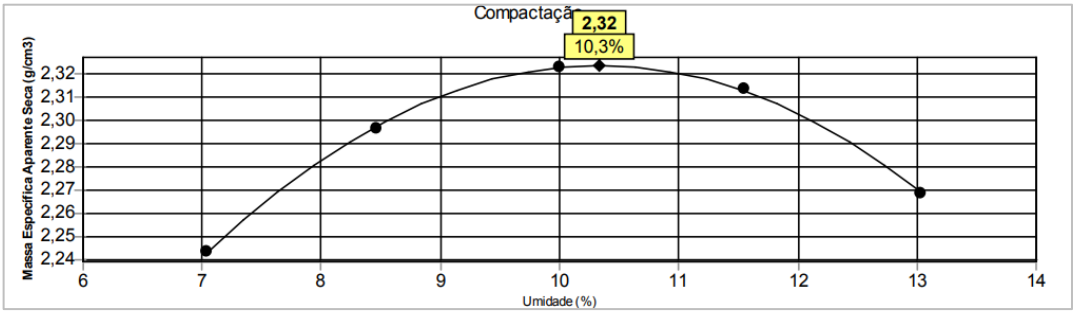

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 12 – Curva de compactação da mistura 5.




Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 13 – Curva de compactação da mistura 6.




Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Para a obtenção do limite de liquidez (LL), do limite de plasticidade (LP), do índice de plasticidade (IP) e do índice de grupo (IG), foram realizados os ensaios nas misturas conforme as normas NBR 6459/17 e NBR 7180/16, além dos cálculos de IP e IG. Os resultados podem ser vistos na tabela 11 e na figura 38.

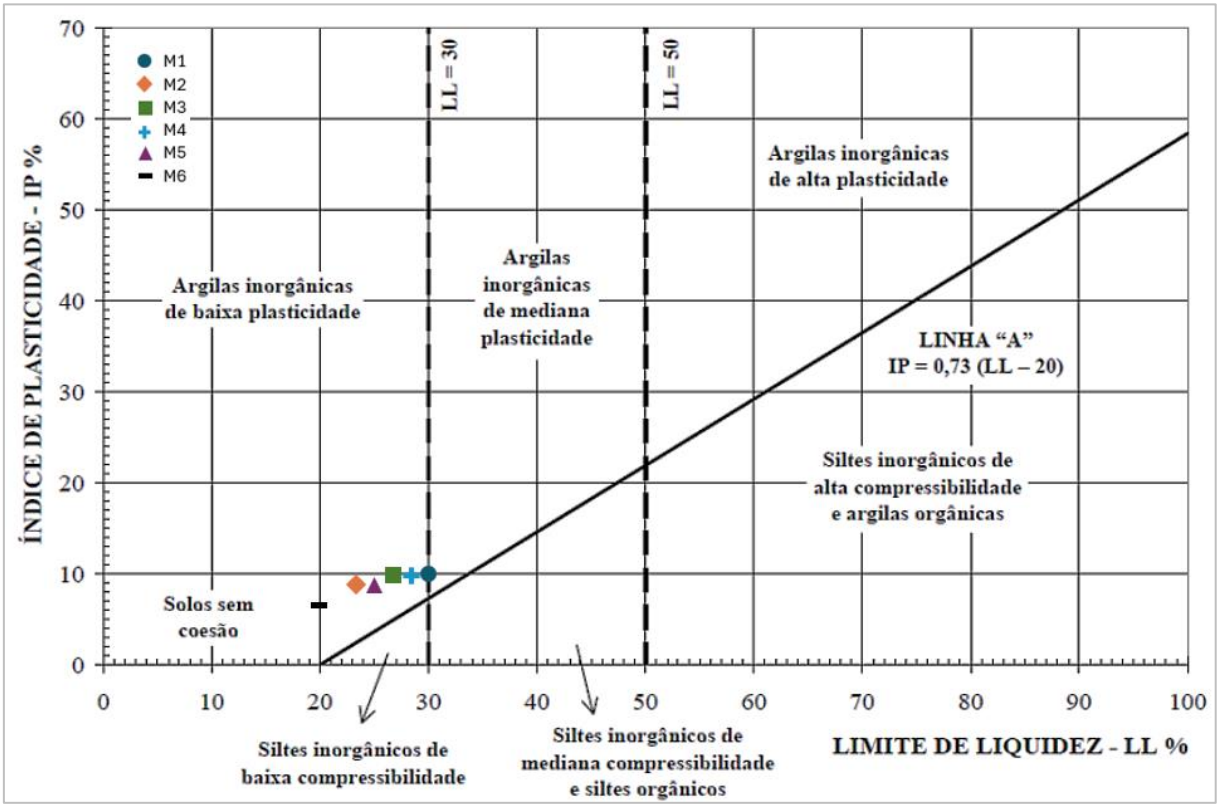
Tabela 11 – Índices físicos das misturas

| ÍNDICES FÍSICOS (ABNT NBR 6457:2017 / ABNT NBR 6459:2017 / ABNT NBR 7180:2016) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | MISTURAS | LL | LP | IP | IG |
| MISTURA 1 | (80% Solo+20% Magnetita) | 30 | 20 | 10 | 4 |
| MISTURA 2 | (70% Solo+30% Magnetita) | 24 | 16 | 8 | 3 |
| MISTURA 3 | (60% Solo+40% Magnetita) | 27 | 17 | 10 | 2 |
| MISTURA 4 | (70% Solo+20% Magnetita+10% Brita 0) | 29 | 19 | 10 | 2 |
| MISTURA 5 | (60% Solo+30% Magnetita+10% Brita 0) | 25 | 17 | 8 | 2 |
| MISTURA 6 | (50% Solo+40% Magnetita+10% Brita 0) | 20 | 13 | 7 | 0 |

Fonte: a autora.

Avaliando os dados obtidos no gráfico de índice de plasticidade frente ao limite de liquidez, observa-se que as misturas 2 a 5 se enquadram como argilas inorgânicas de baixa plasticidade, estando a mistura 1 limítrofe às áreas de argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade e a mistura 6 limítrofe à área de solos sem coesão.

Figura 38 – Gráfico índice de plasticidade x limite de liquidez das misturas e solo coletado.




Fonte: adaptado de SILVA, 2016, p. 94.

Entre as misturas confeccionadas, houve redução média de 4% do limite de liquidez (teor de umidade com que o material passa do estado plástico para o líquido), à medida em que se reduzia o percentual de solo e se aumentava o percentual de magnetita. Isso também ocorreu com o limite de plasticidade (teor de umidade com que o material passa do estado plástico para o semi-sólido), entretanto com redução média de 3%.

Em comparação com os dados obtidos dos ensaios no solo coletado (LL = 34%, LP = 22,39%, IP = 11,61% e IG = 3,97%), a mistura que apresentou maior variação dos índices físicos, com LL = 20%, LP = 13, IP = 7% e IG = 0%, é a mistura 6, pelo fato de esta ter maior percentual de adição de material magnetita + brita (50%) e menor percentual de solo (50%). Todas as misturas apresentaram valores de LL, LP, IP e IG abaixo dos valores apresentados na amostra de solo inicial, o que representa uma redução do teor de umidade no material para os mesmos índices e mesmo grau de compactação/adensamento do solo.

Pode-se verificar também a alteração na classificação TRB do material, cujo solo coletado é de A-6 (Solos argilosos com comportamento sofrível a mau), o qual, com os resultados das misturas, passou a ser A-4 (solos siltosos com comportamento sofrível a mau).

Para a obtenção do percentual de expansividade do solo, foi realizado o ensaio conforme as normas NBR 7172/16 e NBR 9895/17, e em seguida foi realizado o ensaio de expansão.

Os valores de expansividade e CBR que as misturas apresentaram após a finalização dos ensaios podem ser visualizados na tabela 12.

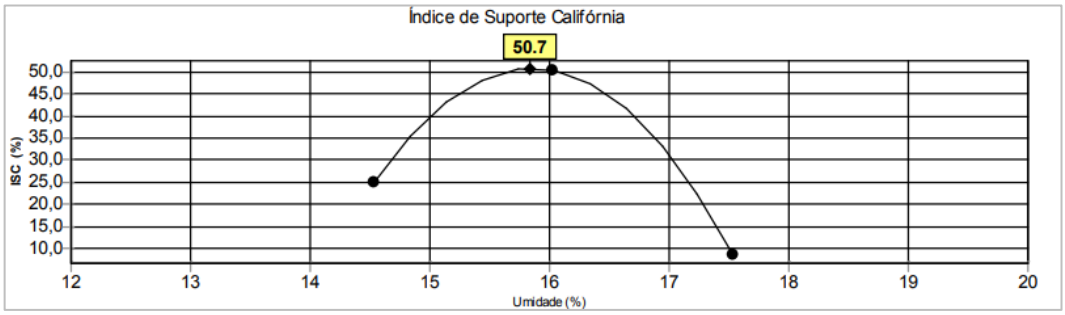
Tabela 12 – CBR e expansão das misturas.

| ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA - CBR (ABNT NBR 7182:2016 / ABNT NBR 9895:2017) | | | |
|---|---|---|---|
| Misturas | | CBR (%) | Expansão (%) |
| MISTURA 1 | (80% Solo+20% Magnetita) | 50,70 | 0,04 |
| MISTURA 2 | (70% Solo+30% Magnetita) | 49,90 | 0,05 |
| MISTURA 3 | (60% Solo+40% Magnetita) | 48,10 | 0,04 |
| MISTURA 4 | (70% Solo+20% Magnetita+10% Brita 0) | 50,80 | 0,04 |
| MISTURA 5 | (60% Solo+30% Magnetita+10% Brita 0) | 50,10 | 0,04 |
| MISTURA 6 | (50% Solo+40% Magnetita+10% Brita 0) | 51,60 | 0,04 |

Fonte: a autora.

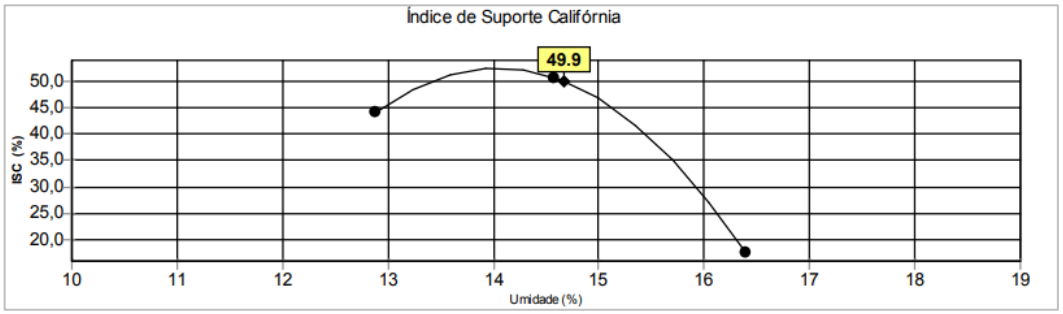
Os valores obtidos de CBR ou ISC entre as misturas apresentaram pouca variação entre si, variando 3,5% entre o maior percentual geral e o menor. Os dados de ISC obtidos de cada mistura podem ser vistos nos gráficos 14 ao 19.

Gráfico 14 – Curva de ISC da mistura 1.



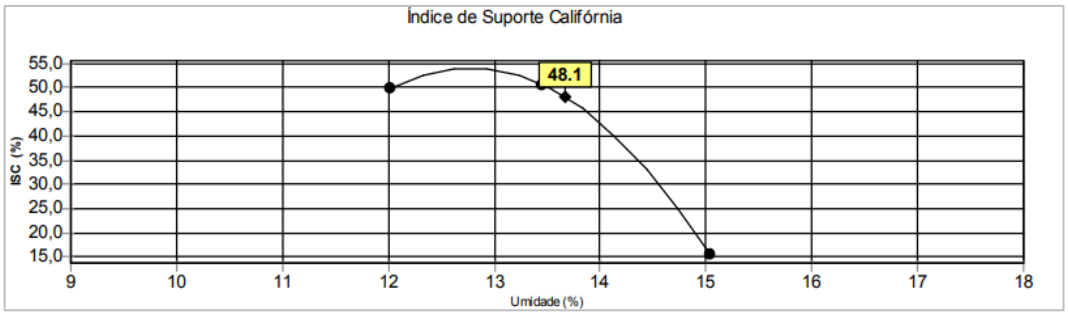

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 15 – Curva de ISC da mistura 2.



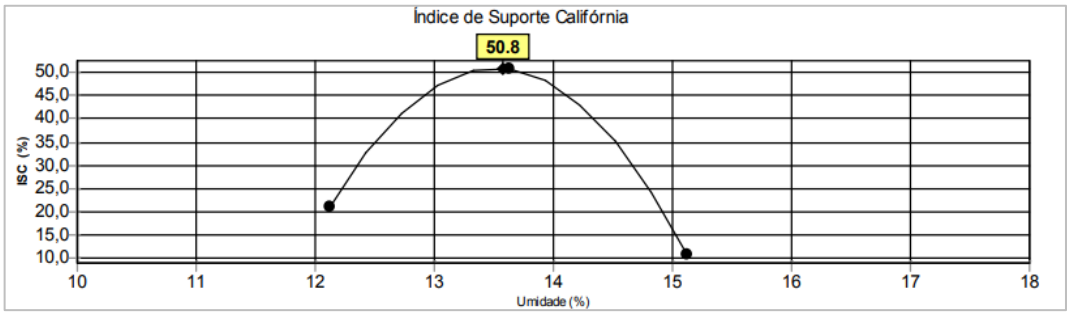

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 16 – Curva de ISC da mistura 3.



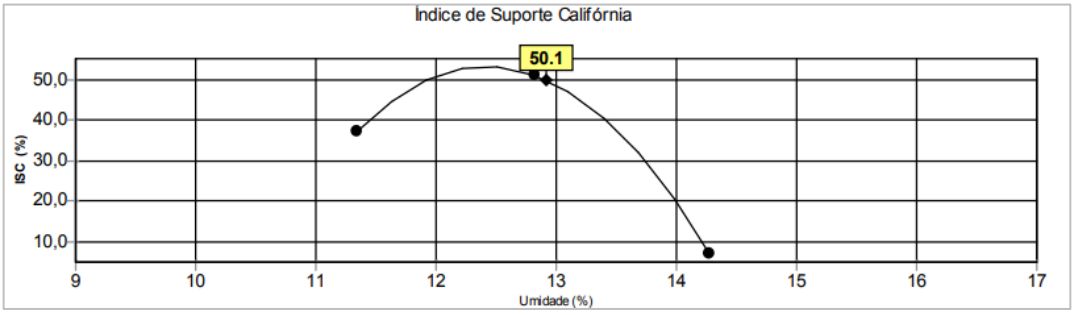

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 17 – Curva de ISC da mistura 4.



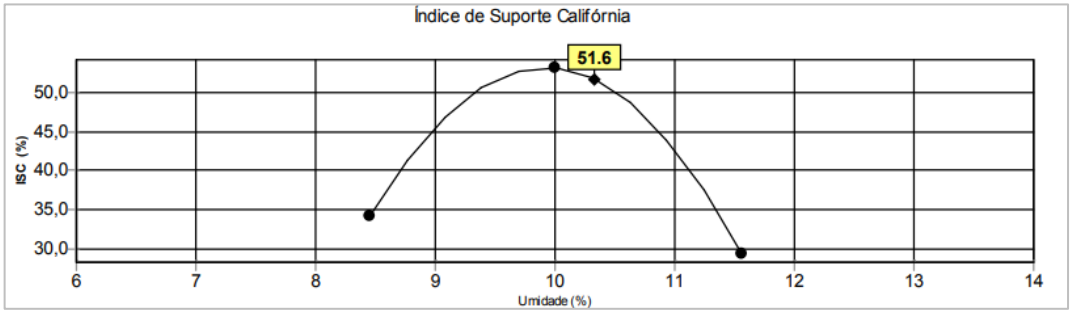

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 18 – Curva de ISC da mistura 5.




Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

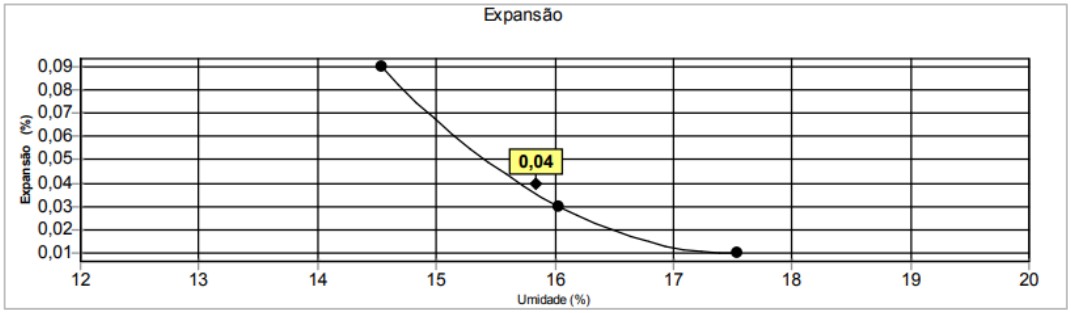
Gráfico 19 – Curva de ISC da mistura 6.




Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

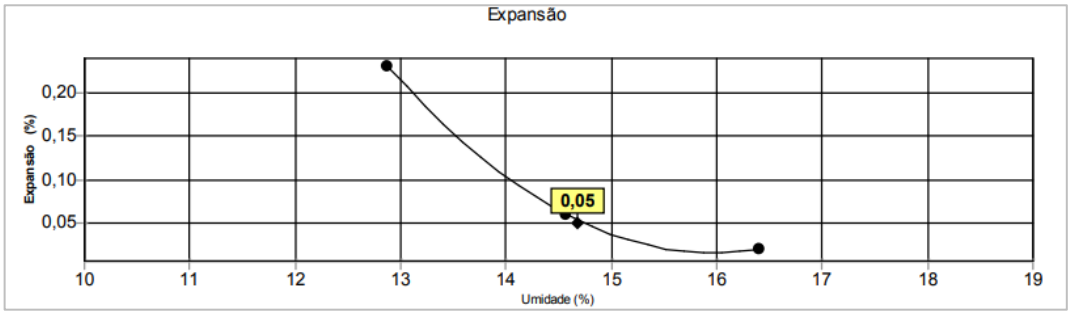
Os valores de expansão se mantiveram em 0,04%, com variação de 0,01% entre os percentuais extremos. Contudo, em comparação com o solo coletado, que forneceu percentual de CBR de 23,10% e expansão de 0,15%, houve aumento de 44% do valor de CBR em comparação ao maior valor de 51,60%, obtido da mistura 6, e redução de expansão de 66% em comparação ao maior percentual obtido da mistura 2, igual a 0,05%. Os valores de expansão de cada mistura podem ser vistos nos gráficos 20 a 25.

Gráfico 20 –Expansão da mistura 1.



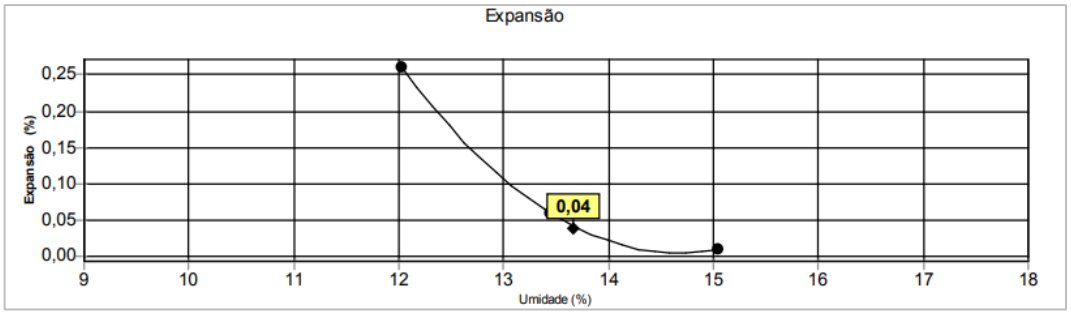

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 21 – Expansão da mistura 2.



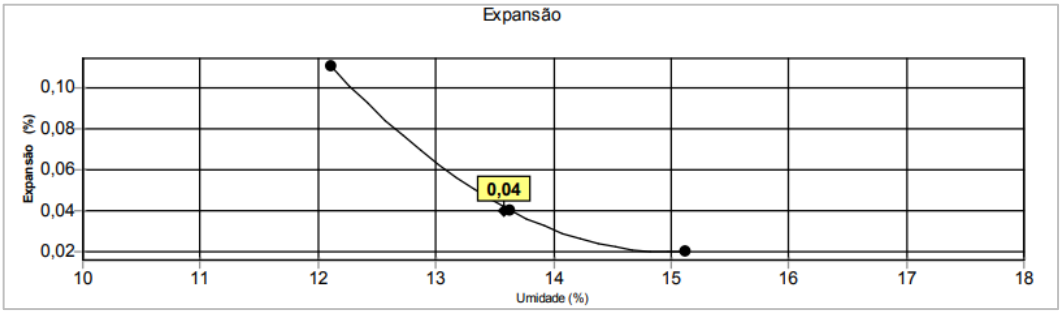

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 22 – Expansão da mistura 3.



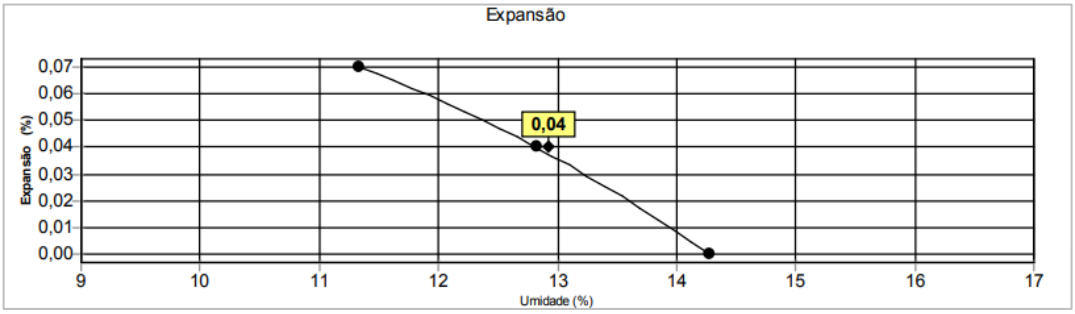

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 23 – Expansão da mistura 4.



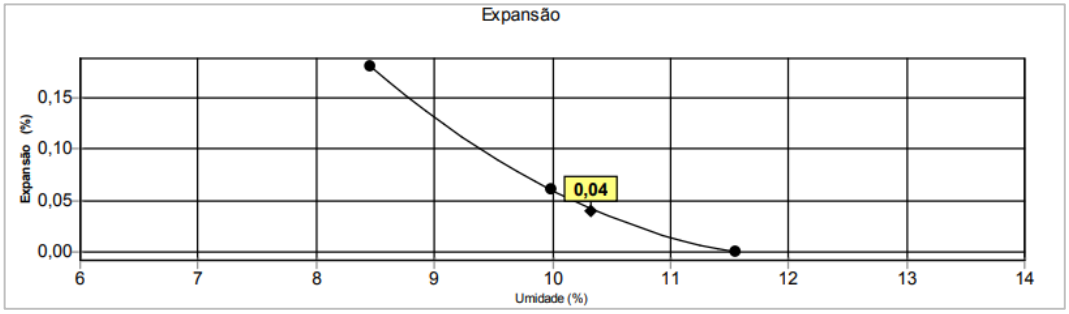

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 24 – Expansão da mistura 5.




Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 25 – Expansão da mistura 6.




Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

O módulo de resiliência das misturas foi aquirido com a realização do ensaio triaxial de carga repetida, após a fase de acondicionamento, fase esta em que aplica-se uma sequência de carregamentos cíclicos de 500 repetições de cada tensão desvio correspondente aos pares demonstrados na tabela 13, na ordem que aparecem, para eliminar deformações permanentes que possam ocorrer nas primeiras aplicações de tensão desvio.

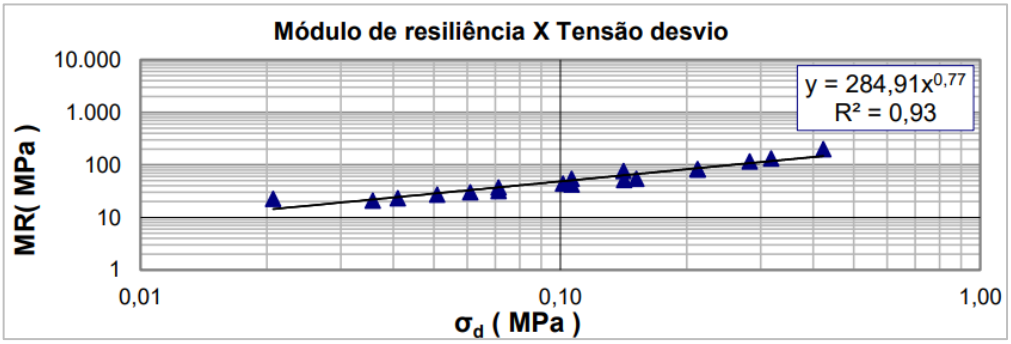
Tabela 13 – Sequência de tensões para fase de condicionamento

| TENSÃO CONFINANTE σ3(MPa) | TENSÃO DESVIO σd(MPa) | RAZÃO DE TENSÕES σ1/σ3 |
|---|---|---|
| 0,070 | 0,070 | 2 |
| 0,070 | 0,210 | 4 |
| 0,105 | 0,315 | 4 |

Fonte: adaptado de DNIT 134/2018-ME.

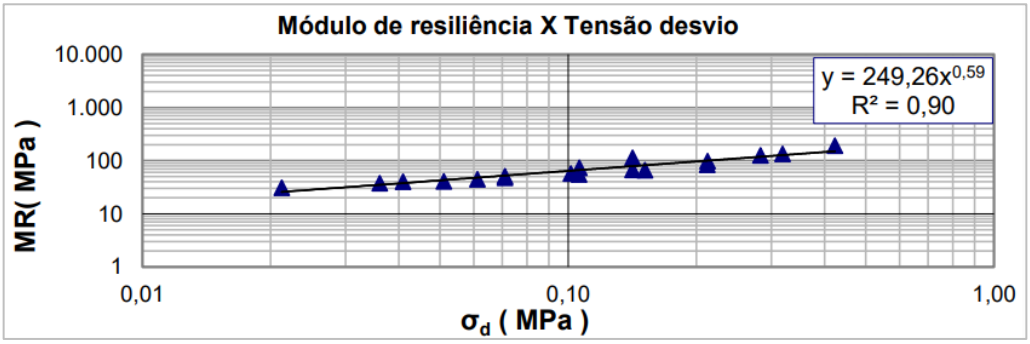
Após a execução da fase de condicionamento, foi realizado o procedimento de aplicação de sequência de 18 pares de tensões e para cada par aplicou-se no mínimo 10 ciclos de carga com aquisição de dados de no mínimo 5 repetições, com variação de leituras de no máximo 5%, conforme a norma DNIT 134/18. Os resultados de cada mistura para este parâmetro podem ser visualizados nos gráficos 26 ao 31.

Gráfico 26 – Módulo de resiliência x Tensão desvio da mistura 1.



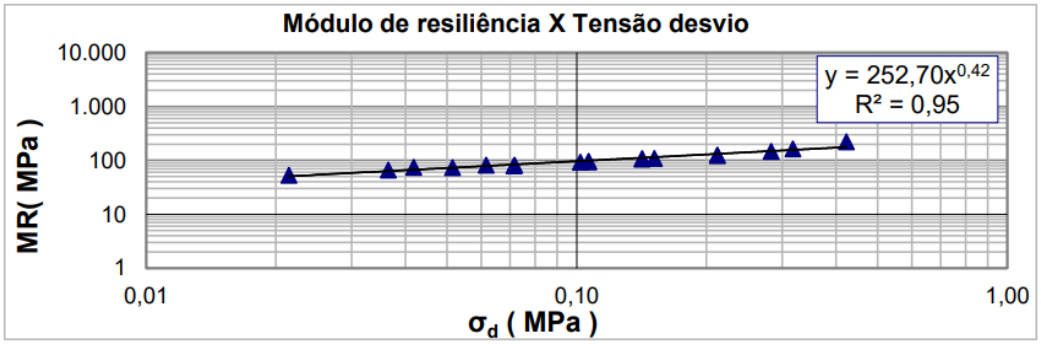

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 27 – Módulo de resiliência x Tensão desvio da mistura 2.



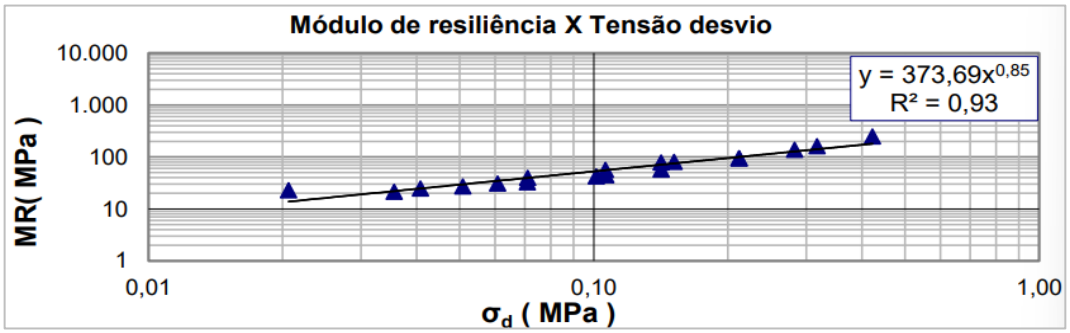

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 28 – Módulo de resiliência x Tensão desvio da mistura 3.



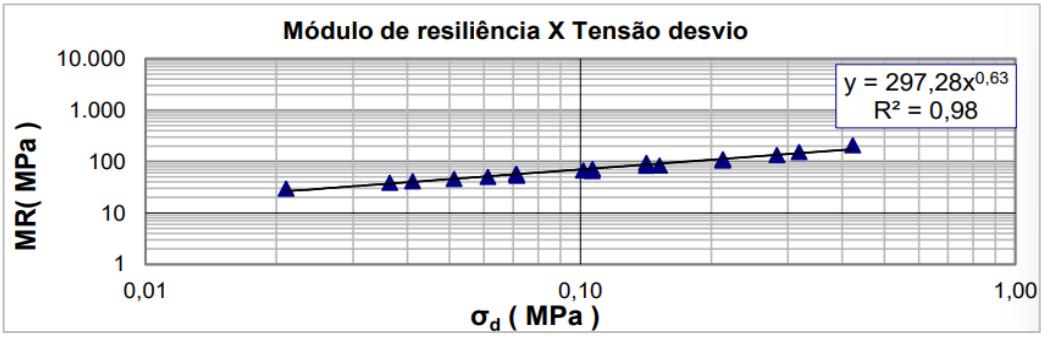

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 29 – Módulo de resiliência x Tensão desvio da mistura 4.



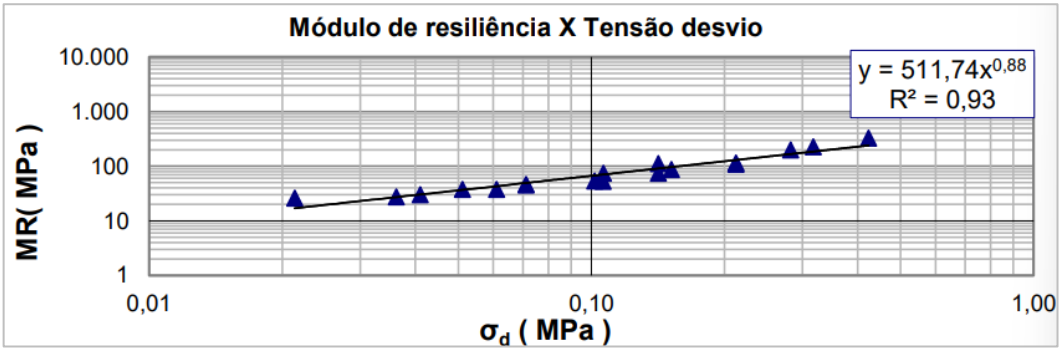

Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 30 – Módulo de resiliência x Tensão desvio da mistura 5.




Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

Gráfico 31 – Módulo de resiliência x Tensão desvio da mistura 6.




Fonte: Laboratório Solocap, 2024.

As misturas 3 e 6 apresentaram os maiores valores médios de módulo de resiliência, e as misturas 2, 3 e 6 apresentaram menor valor de deslocamento permanente ao fim do ensaio, em comparação às demais. Quanto maior o valor de módulo de resiliência e menor o deslocamento, maior é a capacidade de resistir às tensões de carregamento do pavimento com deformação permanente reduzida, refletido no volume ou espessura da camada do solo.

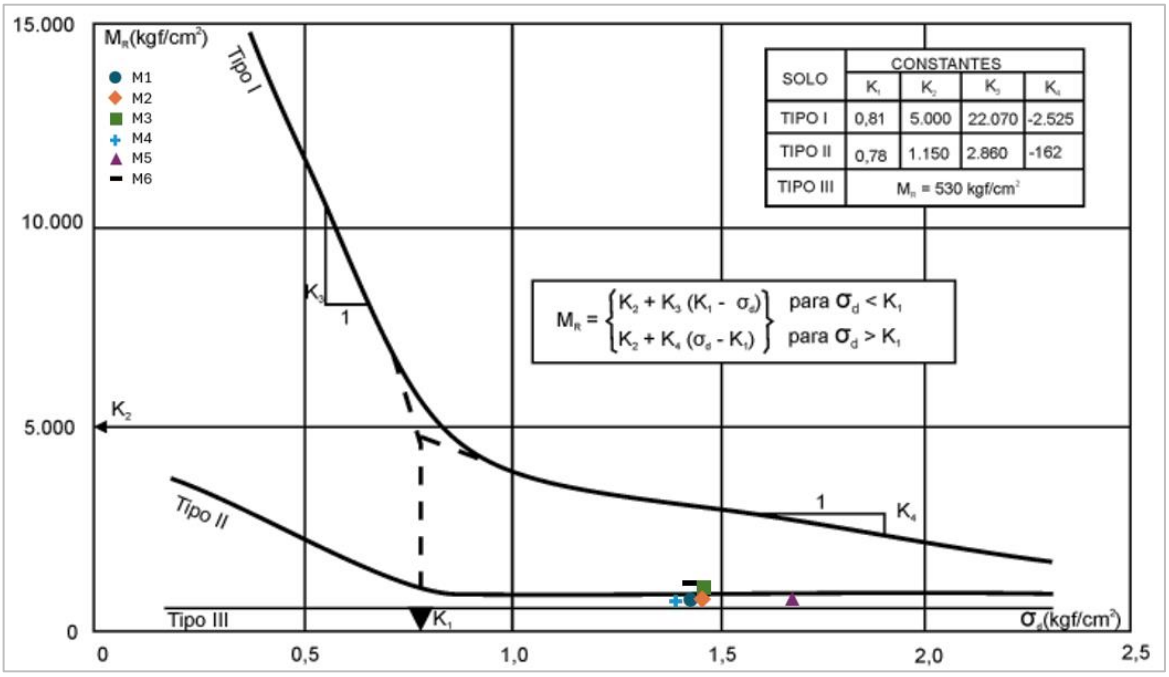
No geral, neste ensaio, destacam-se as misturas 3 e 6, que obtiveram: módulo de resiliência = 1072,4 kgf/cm² e 0,01 mm de deslocamento permanente; e módulo de resiliência = 952,87 kgf/cm² e 0,02 mm de deslocamento permanente, respectivamente. Por meio do gráfico módulo de resiliência *versus* tensão desvio (figura 39), foi feita a análise das misturas para solos finos, tendo em vista que o *Manual de pavimentação* do DNIT indica os materiais cujo percentual passante na peneira nº 200, estejam acima de 35%, e as misturas apresentaram tal percentual entre 38% e 53% (tabela 9). Na análise, somente as misturas 3 e 6 enquadraram-se no Tipo I, com o comportamento bom como subleito e reforço de subleito, podendo ser utilizadas em camada de sub-base. As demais misturas enquadraram-se no Tipo II, de comportamento regular quanto à resiliência como subleito e reforço (figura 39). Os dados gerais obtidos nos ensaios do módulo de resiliência podem ser vistos na tabela 14.

Tabela 14 – Módulo de resiliência médio, tensões e deslocamentos permanentes das misturas

| Misturas | MR | Deslocamento Permanente (mm) | TENSÃO CONFINANTE | TENSÃO DESVIO | $R^2$ Tensão-desvio | $R^2$ Tensão-confinante |
|---|---|---|---|---|---|---|
| M1 ● | 640,16 | 0,55 | 0,703 | 1,444 | 0,93 | 0,72 |
| M2 ◆ | 770,45 | 0,00 | 0,702 | 1,445 | 0,90 | 0,77 |
| M3 ■ | 1072,40 | 0,01 | 0,698 | 1,447 | 0,95 | 0,60 |
| M4 ✚ | 734,76 | 0,26 | 0,703 | 1,442 | 0,93 | 0,68 |
| M5 ▲ | 845,23 | 0,23 | 0,703 | 1,707 | 0,98 | 0,71 |
| M6 ▬ | 952,87 | 0,02 | 0,702 | 1,445 | 0,93 | 0,72 |

Fonte: a autora.

Figura 39 – Classificação resiliente de solos finos




Fonte: adaptado de *Manual de pavimentação* – DNIT, 2006, p. 73.

Para a classificação MCT, em virtude da indisponibilidade técnica e de prazo, os ensaios de perda de massa por imersão para obtenção dos coeficientes e' e c', não foram possíveis de serem realizados, entretanto foi possível classificar através de interrelação entre MCT e os dados resilientes das misturas conforme indicado na tabela 15 do Manual de Pavimentação do DNIT (2006).

Tabela 15 – Interrelação entre a classificação MCT e a resiliente.

| MCT | Resiliente | Predominância | Comportamento |
|---|---|---|---|
| NA | III | III | grau de resiliência alto |
| LA | III | III | grau de resiliência alto |
| NA' | II - III | II | grau de resiliência médio a alto |
| NS' | II - III | II | grau de resiliência médio a alto |
| NG' | II - I | II | grau de resiliência médio a baixo |
| LA' | II - I | II - I | grau de resiliência médio a baixo |
| LG' | I - II | I | grau de resiliência baixo |

Fonte: adaptado de *Manual de pavimentação* – DNIT, 2006, p. 75.

A partir da análise das misturas em função do seu módulo de resiliência, as misturas 3 e 6, que enquadraram-se no Tipo I, com o comportamento bom como subleito e reforço de subleito, na classificação MCT poderiam ser do tipo NG' (não laterítico argiloso), LA' (laterítico arenoso) ou LG'(laterítico argiloso), e como apresentaram grau de resiliência médio a baixo e possuem predominância tipo I, então sua classificação resulta em LA' (laterítico

arenoso), que corresponde a sua classificação granulométrica (areia argilo siltosa e areia silto argilosa).

As demais misturas que enquadraram-se no Tipo II, de comportamento regular quanto à resiliência como subleito e reforço, na classificação MCT poderiam ser do tipo NG' (não laterítico argiloso) e LA' (laterítico arenoso), em virtude do grau de resiliência ser médio a baixo e por possuir predominância tipo II, então sua classificação resulta em NG', solos não laterítico argilosos (argilas arenosas ou argilas siltosas), entretanto discrepante em relação à sua classificação granulométrica (areia argilo siltosa e areia silto argilosa).

Esta dificuldade de correlação e classificação de solos entre TRB, SUCS e MCT já foi evidenciada através dos estudos de Nogami e Villibor, em função das diferenças entre solos temperados e tropicais, assim como corrobora Rodrigues (2018),

> Essa contradição se deve ao fato de que a classificação da AASHTO foi produzida para solos de clima temperado, não sendo efetiva para os solos de clima tropical. [...] ocorreu com o solo amarelo, sendo classificado como A-2-7 com IG igual a 0, o que seria de bom comportamento como material para subleito segundo a classificação da AASHTO, o que não foi confirmado pelo valor de CBR de 6% (RODRIGUES, 2018, p. 68).

Os principais resultados obtidos por meio dos ensaios realizados nos materiais trabalhados, estão demonstrados na tabela 16.

Tabela 16 – Resultados gerais da caracterização dos materiais trabalhados

| Materiais | | LL | LP | IP | IG | TRB | Umidade Ótima (%) | Massa Específica Aparente Seca máxima (g/cm³) | CBR (%) | Expansão (%) | Módulo de Resiliência (Mpa) | Deslocamento Resiliente médio (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SOLO | Solo coletado sem adições | 34 | 22 | 12 | 4 | A-6 | 18,60 | 1,715 | 23,10 | 0,15 | II | - |
| MISTURA 1 ● | (80% Solo+20% Magnetita) | 30 | 20 | 10 | 4 | A-4 | 15,80 | 1,955 | 51,00 | 0,04 | 62,70 | 2,21 |
| MISTURA 2 ◆ | (70% Solo+30% Magnetita) | 24 | 16 | 8 | 3 | A-4 | 14,70 | 2,045 | 50,00 | 0,05 | 75,50 | 0,00 |
| MISTURA 3 ■ | (60% Solo+40% Magnetita) | 27 | 17 | 10 | 2 | A-4 | 13,70 | 2,081 | 48,00 | 0,04 | 105,20 | 0,03 |
| MISTURA 4 ✚ | (70% Solo+20% Magnetita+10% Brita 0) | 29 | 19 | 10 | 2 | A-4 | 13,60 | 2,065 | 51,00 | 0,04 | 72,00 | 3,32 |
| MISTURA 5 ▲ | (60% Solo+30% Magnetita+10% Brita 0) | 25 | 17 | 8 | 2 | A-4 | 12,90 | 2,194 | 50,00 | 0,04 | 82,80 | 1,91 |
| MISTURA 6 ▬ | (50% Solo+40% Magnetita+10% Brita 0) | 20 | 13 | 7 | 0 | A-4 | 10,30 | 2,324 | 52,00 | 0,04 | 93,40 | 0,03 |

Fonte: a autora.

# 5 CONCLUSÃO

Em relação à caracterização física dos materiais, houve redução percentual de finos na curva granulométrica, proporcional ao percentual de adição de brita 0. Contudo, foi mantido o enquadramento como materiais de granulometria fina, classificados como “areia silto-argilosa” e “areia argilo-siltosa”. Assim como não houve grandes alterações na curva granulométrica das misturas em relação ao solo coletado, obteve-se a condição de mau graduado para todas as misturas assim como para o solo coletado. Essa condição traz dificuldades de compactação embora obtenha-se maiores valores de resistência a tensões incidentes no pavimento.

A mistura 6 apresentou maior valor de densidade em comparação às demais misturas e aumento de 35% em comparação com o solo coletado. Entretanto acredita-se que isso ocorra em virtude de a magnetita possuir maior valor de densidade (aproximadamente 5 g/cm³) e pelo seu maior percentual adicionado à mistura (40%), tendo em vista a condição granulométrica de mau graduado obtida nas misturas.

Conforme resultados de índice de plasticidade frente ao limite de liquidez, todas as misturas se enquadram como argilas inorgânicas de baixa plasticidade, estando a mistura 6 limítrofe à área de solos sem coesão. Argilas inorgânicas de baixa plasticidade apresentam comportamento resiliente frente a carregamentos cíclicos contudo com reduzido percentual comparado ao solo coletado, que deve-se ao fato de a adição de rejeito de magnetita presente nas misturas apresentar granulometria granular e ter contribuído com a redução do percentual de argila nas composições. Solos não coesivos em estado seco possuem aderência reduzida entre as partículas, sendo altamente permeáveis, entretanto podem apresentar maiores valores de resistência superficial conforme seu grau de compactação.

Em função da redução do Índice de grupo, as misturas classificaram-se como A-4 (solos siltosos com comportamento sofrível a mau), evidenciando ainda necessidade de melhoria do material para utilização em camada de pavimento.

Com relação às características mecânicas dos materiais, conforme indicado no *Manual de pavimentação* do DNIT, para que o material (misturas realizadas) seja utilizado como camada de reforço de subleito, o valor de CBR deverá ser maior que o do subleito encontrado (solo coletado), e a expansão, $\leq 1\%$, e, para que o material seja utilizado em camada de sub-base, o valor de CBR deverá ser $\geq 20\%$, e o índice de grupo igual a 0. Os valores obtidos de CBR entre as misturas apresentaram pouca variação entre si (3,5% entre o maior e o menor percentual geral). Em comparação com o solo coletado (CBR de 23,10% e expansão de 0,15%), houve aumento de 44%, cujo valor chegou a 51,60% na mistura 6. Em conjunto, obteve-se

redução de expansividade em 73%, chegando a 0,04%. Esses resultados validam a utilização da mistura 6 nas camadas de subleito e sub-base de pavimento.

No que tange ao módulo de resiliência, destacam-se as misturas 3 e 6, que obtiveram: valores de Mr igual a 1072,4 kgf/cm² e 0,01 mm de deslocamento permanente; e valores de Mr igual a 952,87 kgf/cm² e 0,02 mm de deslocamento permanente, respectivamente. Na análise do comportamento do solo frente à aplicação repetida de tensão desvio, os valores de deformabilidade elástica apresentaram pequenas alterações ao longo do tempo. Conforme classificação resiliente de materiais finos, somente as misturas 3 e 6 enquadraram-se no Tipo I, com o comportamento bom como subleito e reforço de subleito, podendo ser utilizadas em camada de sub-base. As demais misturas enquadraram-se no Tipo II, de comportamento regular quanto à resiliência como subleito e reforço.

Em contrapartida, através de interrelação do módulo de resiliência e a classificação MCT, as misturas 3 e 6, como apresentaram grau de resiliência de médio à baixo e predominância de comportamento tipo I, sua classificação enquadrou-se como material com características de solos laterítico arenosos (LA’). As misturas 1, 2, 4 e 5, em virtude do grau de resiliência de médio à baixo e possuir predominância de comportamento do tipo II, a classificação enquadrou-se como material com características de solos não laterítico argilosos (NG’). Materiais laterítico arenosos são solos com características estáveis, não expansivo ou pouco expansivo, podendo ser empregado como camada de subleito, reforço de subleito e em sub-bases em determinados casos, já os materiais não laterítico argilosos apresentam propriedades de permeabilidade, expansão e deformabilidade desfavoráveis para a pavimentação.

Em última análise, de modo geral, em relação às características mecânicas, os resultados validam a utilização da mistura 6 nas camadas granulares de subleito e sub-base de pavimento em virtude do aumento de capacidade de carga e módulo resiliente para melhor absorver e distribuir as cargas incidentes na camada do pavimento, porém em contrapartida, com relação às características físicas, os resultados evidenciaram necessidade de melhoria da curva granulométrica para obtenção de faixa bem graduada de material granular.

## 5.1 Trabalhos futuros.

Para trabalhos futuros recomenda-se o estudo da variação percentual de adição de magnetita em menor quantidade e aumento do percentual de material granular (brita), em granulometrias variadas (com transições), para melhor correção da curva granulométrica do

solo coletado quando da execução das misturas, e que se relacionem com os carregamentos cíclicos previstos característicos do tráfego.

Sugere-se pesquisar e avaliar a utilização de outros materiais para correção química, para melhoramento da coesão, uma vez que o material do rejeito de magnetita possui granulometria característica de material arenoso.

Por fim, importante aprofundar o estudo da mistura desses materiais utilizando o método Medina, seja para cálculos de projeto ou reforços, por meio dos ensaios com MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), sendo hoje esse método utilizado para solos tropicais característicos do Brasil.

# 6 REFERÊNCIAS


ARAÚJO, Marcelo Almeida*; et. Al.* **Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v. 10, p. 187-196. Novembro de 2016. Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/metodos-de-pavimentacao. Acesso em 19 set. 2023.

ARRIVABENI, Breno Santos. **Alternativas para estabilização granulométrica e química de solo de estradas florestais**. 2017. 53 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6457* – **amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6459* – **solo – determinação do limite de liquidez**. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7180* – **solo – determinação do limite de plasticidade**. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895 – **solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – método de ensaio**. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15287: **informação e documentação: Projeto de pesquisa: apresentação**. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724: **– informação e documentação: trabalhos acadêmicos – apresentação**. 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502 - **terminologia – rochas e solos**. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7207 – **terminologia e classificação de pavimentação**. 1982.

BERNUCCI, L. B. *et al*. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Abeda, 2008.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica, materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2007.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA. COORDENAÇÃO GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA. INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. **Manual de pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p. (IPR. Publ., 719).

COELHO, L. M.; SANTANA, C. S. A.; GUIMARÃES, A. C. R.; CASTRO, C. D. **Pavimento asfáltico contendo escória de ferro-níquel: uma solução viável**. Revista Ibero Americana de

Ciências Ambientais, v.12, n.5, p.451-461, 2021. DOI: http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.005.0036. Disponível em: https://www.sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/5519. Acesso em: 02 dez. 2024.

COSTA, Gessyca Menezes; MENDONÇA, A T; ALBUQUERQUE, F S; ALBUQUERQUE, T M A. **Características mecânicas de materiais para pavimentos: estudo de caso laboratório x campo.** *Scientia Plena*, [S. l.], v. 11, n. 11, 2015. DOI: 10.14808/sci.plena.2015.113311. Disponível em: https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/2660. Acesso em: 20 dez. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. NORMA DNIT 134/2018-ME. **Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. NORMA DNIT 137/2010 – ES. **Pavimentação – regularização do subleito – especificação de serviço**. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. NORMA DNIT 138/2010 – ES. **Pavimentação – Reforço do subleito - Especificação de serviço**. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. NORMA DNIT 172/2016 – ME. **solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. 2016

HELENA, Lúcia. Suporte Solos. **Análise granulométrica do solo: ensaios geotécnicos - o objetivo e as frações de solo**. Disponível em: https://www.suportesolos.com.br/blog/analise-granulometrica-do-solo-ensaios-geotecnicos-o-objetivo-e-as-fracoes-de-solo/71/. Acesso em: 05 jul. 2023.

JÚNIOR, Luiz Carlos Galvani *et al*. **Caracterização e classificação geotécnica de possíveis jazidas de solo para uso em rodovias não pavimentadas em Rio Paranaíba – MG**. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos. Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/caracterizacao-e-classificacao-geotecnica-de-possiveis-jazidas-de-solo-para-uso?lang=pt-br. Acesso em: 03 dez. 2023.

LEITE, Fabiana da Conceição. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. 216 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MARQUES, José Roberto Franco. **Dimensionamento de reforço mediante retroanálise de avaliações estruturais não-destrutivas**. 2002. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. doi:10.11606/D.18.2017.tde-10072017-170430. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-10072017-170430/pt-br.php. Acesso em: 01 nov. 2024.

PERES, J. S.; CORTÊS, L. M.; VIEIRA, S. P. **Utilização de material fresado como reforço de solo para composição de camadas de sub-base de pavimentos rodoviários**. Revista Perquirere, n. 18, vol. 2, p. 137-152, 2021. Disponível em: https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere/issue/view/187/241. Acesso em: 30 out. 2024.

RODRIGUES, Klaus Henrique de Paula. **Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração**. 2018. 108f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SANT'ANNA, Giovani Levi. **Módulo de resiliência de misturas solo-alcatrão, solo-cal-alcatrão e solo-cimento-alcatrão para pavimentação de estradas florestais**. 2002. 146 f. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação da Natureza; Silvicultura; Tecnologia e Utilização de) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002. Disponível em: http://locus.ufv.br/handle/123456789/3205. Acessado em: 13 dez. 2024.

SANTOS, Jádila Rodrigues dos; MENEGUELLI, Marcelo Ricardo Soares; SARTÓRIO, Elvio Antônio. **Estudo da viabilidade técnica da utilização do rejeito de minério de ferro na camada de sub-base de pavimentação rodoviária**. 2021. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Urbana, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/1572. Acessado em: 20 nov. 2024.

SANTOS, Paula Jessica da Cruz. **Análise da estabilização granulométrica de um solo areno-argiloso do município de São Cristóvão/SE com escória de cobre jateada**. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.

SCHNEIDER, Claudio L. *et al*. **Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016.

SILVA, João Paulo Souza. **Mecânica dos solos: introdução à engenharia geotécnica**. Olinda: Livro Rápido, 2016.

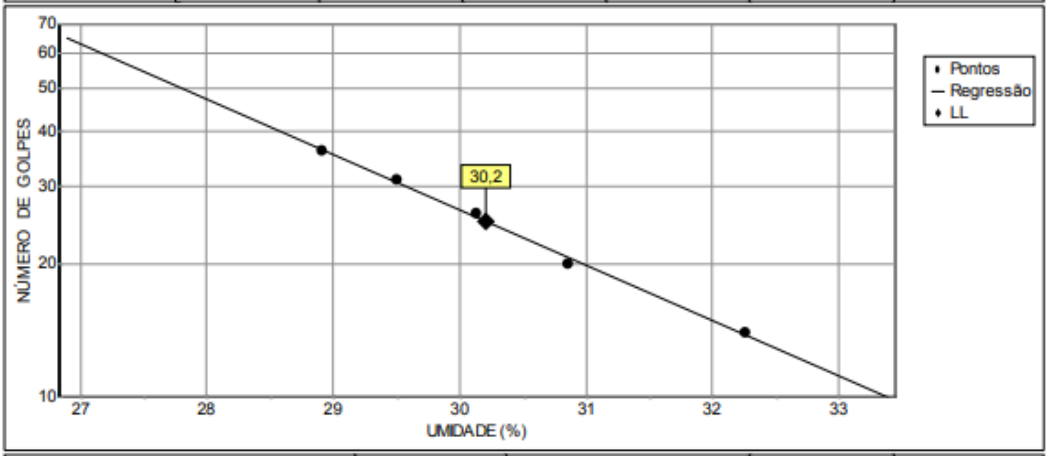
SILVA, Ádila Kalynne Gonçalves. **Estudo de estabilização de solo com brita para uso na pavimentação**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) –Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2018. Disponível em: https://repositorio.uema.br/handle/123456789/930. Acessado em: 20 dez.2024.

SOUSA, Mayssa. Alves da Silva. **Análise geotécnica de solos tropicais de ocorrência ao longo da Estrada de Ferro Carajás para uso como camadas de pavimento rodoviário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: https://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/7787. Acessado em: 19 dez. 2024.

# 7 ANEXOS

## Anexo A1: limites de Atterberg das misturas.

| Cliente: DAYANE BARBOSA PACHECO DE MATOS | | | Sub-Trecho: | | Estaca/Posição: |
|---|---|---|---|---|---|
| Obra: DS50/ARAXÁ-MG | | | Classificação do Material: SOLO 80% + MAGNETITA 20% | | Furo/Amostra: 1 |
| Trecho: PROJETO DE PESQUISA | | | Estudo: | | Profundidade: |
| **LIMITE DE LIQUIDEZ** | Data: 27/06/2024 | | Operador: JULIO | Registro Nº: 1406 | **LL= 30 %** |
| Cápsula nº | 71 | 85 | 110 | 128 | 129 | |
| C + S + A (g) | 20,80 | 20,81 | 20,81 | 20,81 | 20,81 | |
| C + Solo seco (g) | 18,42 | 18,39 | 18,33 | 18,28 | 18,20 | |
| Água (g) | 2,38 | 2,42 | 2,48 | 2,53 | 2,61 | |
| Cápsula (g) | 10,19 | 10,19 | 10,10 | 10,08 | 10,11 | |
| Solo seco (g) | 8,23 | 8,20 | 8,23 | 8,20 | 8,09 | |
| Umidade (%) | 28,9 | 29,5 | 30,1 | 30,9 | 32,3 | |
| GOLPES | 36 | 31 | 26 | 20 | 14 | |

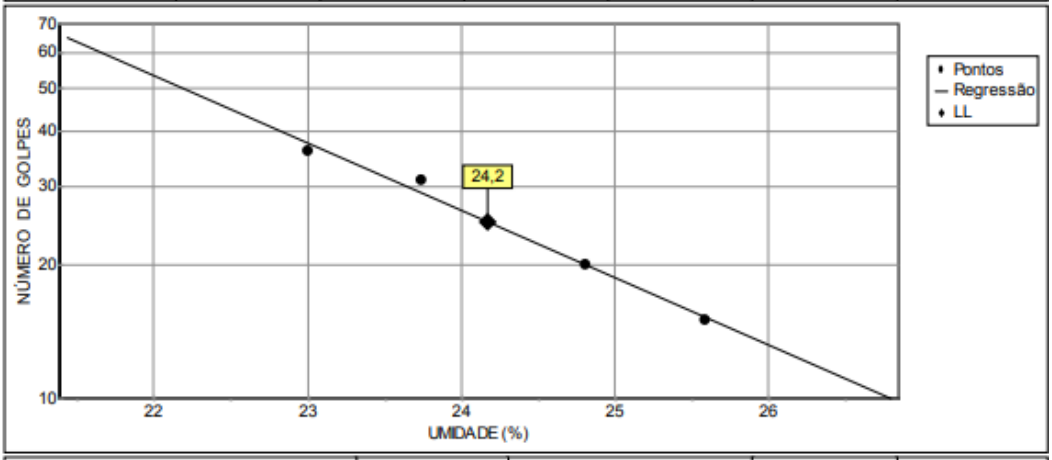



| **LIMITE DE PLASTICIDADE** | Data: 27/06/2024 | | Operador: JULIO | Registro Nº: 1406 | **LP= 20 %** |
|---|---|---|---|---|---|
| Cápsula Nº | 3 | 60 | 66 | 72 | 88 | |
| C + S + A (g) | 10,98 | 11,27 | 10,70 | 10,65 | 10,87 | |
| C + Solo seco (g) | 10,59 | 10,89 | 10,33 | 10,27 | 10,50 | |
| Água (g) | 0,39 | 0,38 | 0,37 | 0,38 | 0,37 | |
| Cápsula (g) | 8,66 | 8,97 | 8,47 | 8,33 | 8,67 | |
| Solo seco (g) | 1,93 | 1,92 | 1,86 | 1,94 | 1,83 | |
| Umidade % | 20,2 | 19,8 | 19,9 | 19,6 | 20,2 | |
| Aceitação | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM | |

| **ÍNDICE DE PLASTICIDADE** | **IP = LL - LP = 10 %** |
|---|---|

| Cliente: DAYANE BARBOSA PACHECO DE MATOS | | | Sub-Trecho: | | Estaca/Posição: |
|---|---|---|---|---|---|
| Obra: DS50/ARAXÁ-MG | | | Classificação do Material: SOLO 70% + MAGNETITA 30% | | Furo/Amostra: 2 |
| Trecho: PROJETO DE PESQUISA | | | Estudo: | | Profundidade: |

| **LIMITE DE LIQUIDEZ** | Data: 27/06/2024 | | Operador: JULIO | | Registro Nº: 1407 | **LL= 24 %** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cápsula nº | 31 | 35 | 101 | 104 | 108 | |
| C + S + A (g) | 20,77 | 20,77 | 20,77 | 20,77 | 20,78 | |
| C + Solo seco (g) | 18,70 | 18,56 | 18,66 | 18,51 | 18,49 | |
| Água (g) | 2,07 | 2,21 | 2,11 | 2,26 | 2,29 | |
| Cápsula (g) | 9,70 | 9,25 | 9,93 | 9,40 | 9,54 | |
| Solo seco (g) | 9,00 | 9,31 | 8,73 | 9,11 | 8,95 | |
| Umidade (%) | 23,0 | 23,7 | 24,2 | 24,8 | 25,6 | |
| GOLPES | 36 | 31 | 25 | 20 | 15 | |

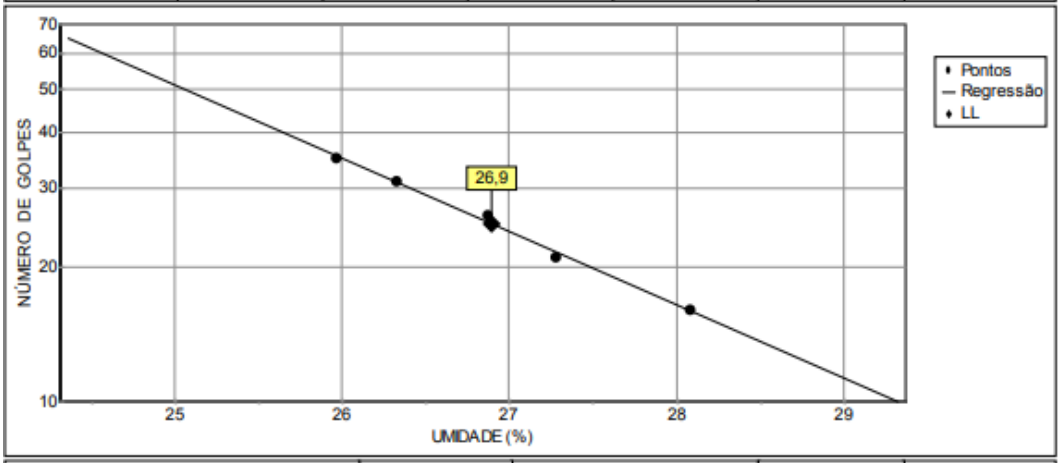



| **LIMITE DE PLASTICIDADE** | Data: 27/06/2024 | | Operador: JULIO | | Registro Nº: 1407 | **LP= 16 %** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cápsula Nº | 16 | 39 | 124 | 145 | 149 | |
| C + S + A (g) | 12,24 | 12,28 | 12,42 | 12,65 | 12,20 | |
| C + Solo seco (g) | 11,86 | 11,90 | 12,05 | 12,28 | 11,83 | |
| Água (g) | 0,38 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | |
| Cápsula (g) | 9,61 | 9,58 | 9,78 | 9,97 | 9,56 | |
| Solo seco (g) | 2,25 | 2,32 | 2,27 | 2,31 | 2,27 | |
| Umidade % | 16,9 | 16,4 | 16,3 | 16,0 | 16,3 | |
| Aceitação | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM | |

| **ÍNDICE DE PLASTICIDADE** | **IP = LL - LP = 8 %** |
|---|---|

| Cliente: DAYANE BARBOSA PACHECO DE MATOS | | | Sub-Trecho: | | Estaca/Posição: |
|---|---|---|---|---|---|
| Obra: DS50/ARAXÁ-MG | | | Classificação do Material: SOLO 60% + MAGNETITA 40% | | Furo/Amostra: 3 |
| Trecho: PROJETO DE PESQUISA | | | Estudo: | | Profundidade: |

| LIMITE DE LIQUIDEZ | Data: 27/06/2024 | Operador: JULIO | | Registro Nº: 1408 | LL= 27 % |
|---|---|---|---|---|---|
| Cápsula nº | 61 | 73 | 117 | 143 | 147 | |
| C + S + A (g) | 20,70 | 20,71 | 20,71 | 20,71 | 20,72 | |
| C + Solo seco (g) | 18,50 | 18,59 | 18,53 | 18,50 | 18,49 | |
| Água (g) | 2,20 | 2,12 | 2,18 | 2,21 | 2,23 | |
| Cápsula (g) | 10,03 | 10,54 | 10,42 | 10,40 | 10,55 | |
| Solo seco (g) | 8,47 | 8,05 | 8,11 | 8,10 | 7,94 | |
| Umidade (%) | 26,0 | 26,3 | 26,9 | 27,3 | 28,1 | |
| GOLPES | 35 | 31 | 26 | 21 | 16 | |

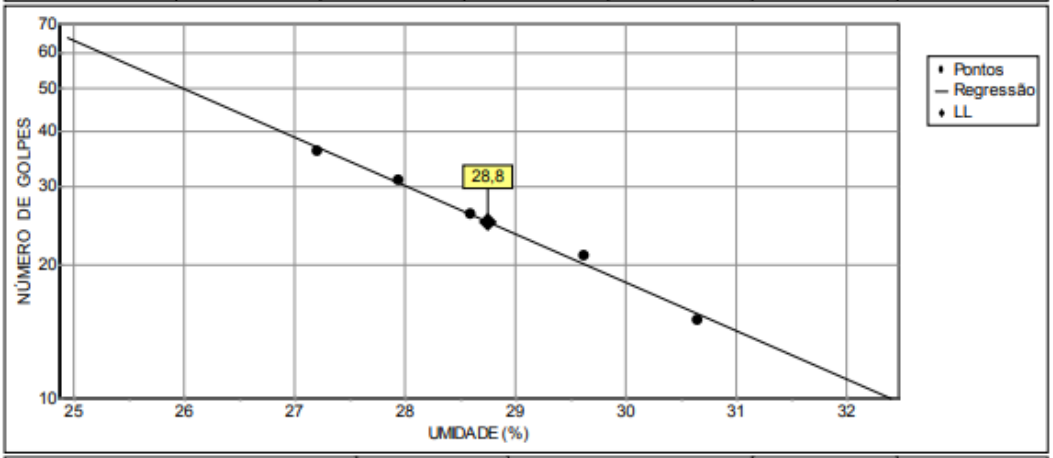



| LIMITE DE PLASTICIDADE | Data: 27/06/2024 | Operador: JULIO | | Registro Nº: 1408 | LP= 17 % |
|---|---|---|---|---|---|
| Cápsula Nº | 12 | 19 | 27 | 54 | 102 | |
| C + S + A (g) | 12,46 | 11,93 | 12,59 | 12,42 | 12,15 | |
| C + Solo seco (g) | 12,07 | 11,55 | 12,20 | 12,02 | 11,76 | |
| Água (g) | 0,39 | 0,38 | 0,39 | 0,40 | 0,39 | |
| Cápsula (g) | 9,83 | 9,32 | 9,94 | 9,76 | 9,49 | |
| Solo seco (g) | 2,24 | 2,23 | 2,26 | 2,26 | 2,27 | |
| Umidade % | 17,4 | 17,0 | 17,3 | 17,7 | 17,2 | |
| Aceitação | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM | |

| ÍNDICE DE PLASTICIDADE | IP = LL - LP = 10 % |
|---|---|

| Cliente: DAYANE BARBOSA PACHECO DE MATOS | | | Sub-Trecho: | | Estaca/Posição: |
|---|---|---|---|---|---|
| Obra: DS50/ARAXÁ-MG | | | Classificação do Material: SOLO 70% + MAGNETITA 20% + BRI | | Furo/Amostra: 4 |
| Trecho: PROJETO DE PESQUISA | | | Estudo: | | Profundidade: |

| LIMITE DE LIQUIDEZ | Data: 26/06/2024 | Operador: JULIO | | Registro Nº: 1409 | LL= 29 % |
|---|---|---|---|---|---|
| Cápsula nº | 20 | 53 | 84 | 131 | 162 | |
| C + S + A (g) | 20,78 | 20,78 | 20,78 | 20,79 | 20,78 | |
| C + Solo seco (g) | 18,53 | 18,48 | 18,44 | 18,37 | 18,30 | |
| Água (g) | 2,25 | 2,30 | 2,34 | 2,42 | 2,48 | |
| Cápsula (g) | 10,26 | 10,25 | 10,26 | 10,20 | 10,21 | |
| Solo seco (g) | 8,27 | 8,23 | 8,18 | 8,17 | 8,09 | |
| Umidade (%) | 27,2 | 27,9 | 28,6 | 29,6 | 30,7 | |
| GOLPES | 36 | 31 | 26 | 21 | 15 | |

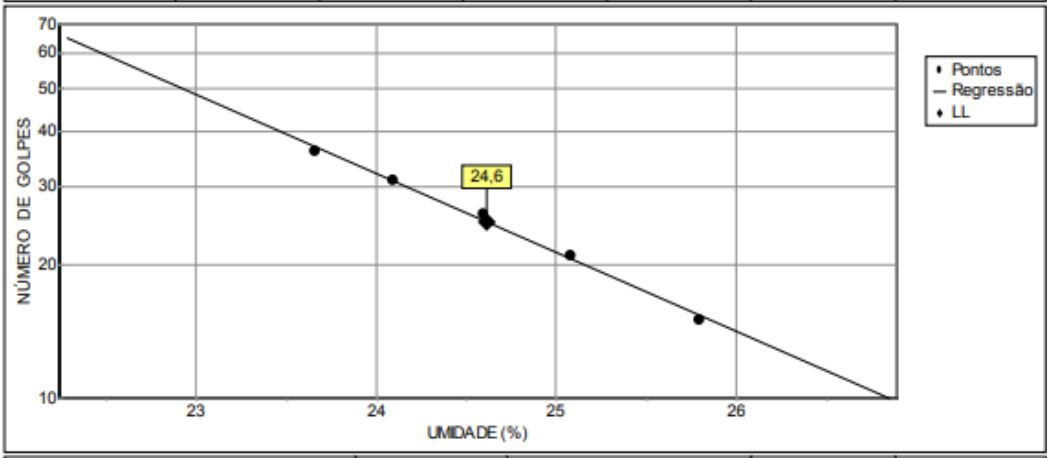



| LIMITE DE PLASTICIDADE | Data: 26/06/2024 | Operador: JULIO | | Registro Nº: 1409 | LP= 19 % |
|---|---|---|---|---|---|
| Cápsula Nº | 2 | 13 | 49 | 69 | 79 | |
| C + S + A (g) | 12,72 | 12,61 | 12,50 | 12,55 | 12,57 | |
| C + Solo seco (g) | 12,35 | 12,22 | 12,11 | 12,17 | 12,18 | |
| Água (g) | 0,37 | 0,39 | 0,39 | 0,38 | 0,39 | |
| Cápsula (g) | 10,37 | 10,19 | 10,07 | 10,14 | 10,14 | |
| Solo seco (g) | 1,98 | 2,03 | 2,04 | 2,03 | 2,04 | |
| Umidade % | 18,7 | 19,2 | 19,1 | 18,7 | 19,1 | |
| Aceitação | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM | |

**ÍNDICE DE PLASTICIDADE** **IP = LL - LP = 10 %**

| Cliente: DAYANE BARBOSA PACHECO DE MATOS | | | Sub-Trecho: | | Estaca/Posição: |
|---|---|---|---|---|---|
| Obra: DS50/ARAXÁ-MG | | | Classificação do Material: SOLO 60% + MAGNETITA 30% + BRI | | Furo/Amostra: 5 |
| Trecho: PROJETO DE PESQUISA | | | Estudo: | | Profundidade: |

| **LIMITE DE LIQUIDEZ** | Data: 26/06/2024 | | Operador: JULIO | | Registro Nº: 1410 | **LL= 25 %** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cápsula nº | 36 | 120 | 130 | 144 | 158 | |
| C + S + A (g) | 20,55 | 20,56 | 20,56 | 20,56 | 20,56 | |
| C + Solo seco (g) | 18,34 | 18,49 | 18,40 | 18,37 | 18,38 | |
| Água (g) | 2,21 | 2,07 | 2,16 | 2,19 | 2,18 | |
| Cápsula (g) | 9,00 | 9,90 | 9,62 | 9,64 | 9,93 | |
| Solo seco (g) | 9,34 | 8,59 | 8,78 | 8,73 | 8,45 | |
| Umidade (%) | 23,7 | 24,1 | 24,6 | 25,1 | 25,8 | |
| GOLPES | 36 | 31 | 26 | 21 | 15 | |

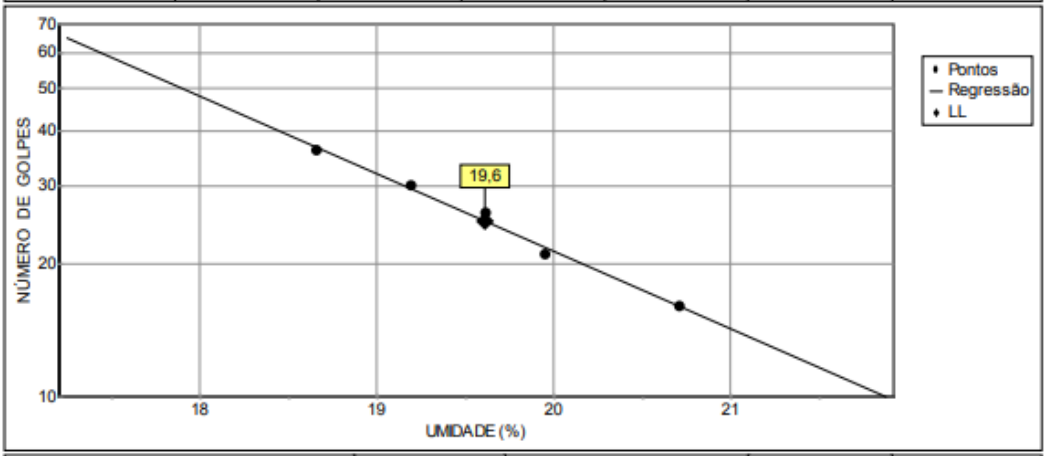



| **LIMITE DE PLASTICIDADE** | Data: 26/06/2024 | | Operador: JULIO | | Registro Nº: 1410 | **LP= 17 %** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cápsula Nº | 6 | 25 | 59 | 75 | 123 | |
| C + S + A (g) | 12,70 | 12,85 | 12,77 | 12,74 | 12,78 | |
| C + Solo seco (g) | 12,35 | 12,49 | 12,42 | 12,40 | 12,42 | |
| Água (g) | 0,35 | 0,36 | 0,35 | 0,34 | 0,36 | |
| Cápsula (g) | 10,30 | 10,36 | 10,34 | 10,35 | 9,67 | |
| Solo seco (g) | 2,05 | 2,13 | 2,08 | 2,05 | 2,75 | |
| Umidade % | 17,1 | 16,9 | 16,8 | 16,6 | 13,1 | |
| Aceitação | SIM | SIM | SIM | SIM | Não | |

**ÍNDICE DE PLASTICIDADE** **IP = LL - LP = 8 %**

| Cliente: DAYANE BARBOSA PACHECO DE MATOS | | | Sub-Trecho: | | Estaca/Posição: |
|---|---|---|---|---|---|
| Obra: DS50/ARAXÁ-MG | | | Classificação do Material: SOLO 50% + MAGNETITA 40% + BRI | | Furo/Amostra: 6 |
| Trecho: PROJETO DE PESQUISA | | | Estudo: | | Profundidade: |

| **LIMITE DE LIQUIDEZ** | Data: 26/06/2024 | Operador: JULIO | | Registro Nº: 1411 | **LL= 20 %** |
|---|---|---|---|---|---|
| Cápsula nº | 47 | 62 | 92 | 161 | 164 | |
| C + S + A (g) | 20,84 | 20,85 | 20,85 | 20,85 | 20,84 | |
| C + Solo seco (g) | 19,20 | 19,23 | 19,12 | 19,08 | 19,04 | |
| Água (g) | 1,64 | 1,62 | 1,73 | 1,77 | 1,80 | |
| Cápsula (g) | 10,41 | 10,79 | 10,30 | 10,21 | 10,35 | |
| Solo seco (g) | 8,79 | 8,44 | 8,82 | 8,87 | 8,69 | |
| Umidade (%) | 18,7 | 19,2 | 19,6 | 20,0 | 20,7 | |
| GOLPES | 36 | 30 | 26 | 21 | 16 | |




| **LIMITE DE PLASTICIDADE** | Data: 26/06/2024 | Operador: JULIO | | Registro Nº: 1411 | **LP= 13 %** |
|---|---|---|---|---|---|
| Cápsula Nº | 11 | 126 | 157 | 160 | 168 | |
| C + S + A (g) | 12,23 | 12,68 | 12,79 | 12,75 | 12,83 | |
| C + Solo seco (g) | 11,89 | 12,33 | 12,44 | 12,40 | 12,48 | |
| Água (g) | 0,34 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | |
| Cápsula (g) | 9,31 | 9,64 | 9,73 | 9,66 | 9,79 | |
| Solo seco (g) | 2,58 | 2,69 | 2,71 | 2,74 | 2,69 | |
| Umidade % | 13,2 | 13,0 | 12,9 | 12,8 | 13,0 | |
| Aceitação | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM | |

**ÍNDICE DE PLASTICIDADE** **IP = LL - LP = 7%**