UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

MARIA EDUARDA DA CUNHA CAPOTE

INFLUÊNCIA DO TEOR DE CAL E DO PERÍODO DE CURA NO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA DE UM SOLO RESIDUAL LATERÍTICO DE PONTA GROSSA/PR

PONTA GROSSA
2026

MARIA EDUARDA DA CUNHA CAPOTE

INFLUÊNCIA DO TEOR DE CAL E DO PERÍODO DE CURA NO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA DE UM SOLO RESIDUAL LATERÍTICO DE PONTA GROSSA/PR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Gustavo Alexandre Swiech Assad

PONTA GROSSA

2026

MARIA EDUARDA DA CUNHA CAPOTE

INFLUÊNCIA DO TEOR DE CAL E DO PERÍODO DE CURA NO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA DE UM SOLO RESIDUAL LATERÍTICO DE PONTA GROSSA/PR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Gustavo Alexandre Swiech Assad

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

_____

Prof.ª Me. Maitê Milléo Almeida

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

_____

Prof. Me. Helenton Carlos da Silva

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa, 05 de novembro de 2026

Dedico este trabalho à minha mãe, que me ensinou a contar nos dedos; às minhas tias, que me ensinaram a contar com o cuidado, a força e a presença; aos meus avós, que me ensinaram a contar com Deus; e à minha família e aos meus amigos, com quem sempre pude contar. Muito antes de a Engenharia Civil me ensinar sobre solos e fundações, vocês já eram a base firme sobre a qual construí minha história.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por guiar meus passos até a engenharia civil e me fortalecer em todos os momentos em que me senti cansada e sem rumo, por me dar a coragem necessária para enfrentar os desafios e pela fé que me ajudou a seguir em frente, mesmo quando o caminho parecia difícil.

À minha mãe, minha gratidão mais profunda. Obrigada por sempre estar ao meu lado, por acreditar em mim e por me incentivar a continuar. Seu amor, seu cuidado e suas palavras de apoio fizeram diferença em cada etapa desta caminhada. Esta conquista também é sua, pois sei que minha trajetória foi construída com o apoio que sempre encontrei em você.

À minha família, especialmente aos meus avós, às minhas tias e à minha irmã, agradeço pelo carinho, pela ajuda, pela compreensão e pela presença ao longo desses anos. Obrigada por torcerem por mim e por celebrarem comigo cada pequena conquista. Ter pessoas com quem dividir as dificuldades e as alegrias tornou essa jornada muito mais especial.

Ao meu orientador, Prof. Gustavo Alexandre Swiech Assad, agradeço pela confiança, pela disponibilidade e por todo o conhecimento compartilhado durante o desenvolvimento deste trabalho. Suas orientações, sugestões e contribuições foram fundamentais para a construção deste TCC e para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos meus amigos, obrigada pela companhia, pelo incentivo e pelos momentos de descontração em meio às responsabilidades da graduação. Vocês tornaram os dias difíceis mais leves e os momentos felizes ainda melhores. Sou grata por cada pessoa que caminhou ao meu lado e fez parte dessa fase da minha vida.

À banca examinadora composta pela Prof.ª Me. Maitê Milléo Almeida e pelo Prof. Me. Helenton Carlos da Silva, agradeço pelas valiosas contribuições acadêmicas para a realização deste estudo.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse até aqui. Concluir este trabalho representa o encerramento de uma etapa marcada por aprendizado, esforço e superação.

RESUMO

CAPOTE, MARIA EDUARDA DA CUNHA. **Influência do teor de cal e do período de cura no índice de suporte califórnia de um solo residual laterítico de Ponta Grossa/Pr.** 2026. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2026.

Este trabalho avaliou a influência do teor de cal e do período de pré-cura sobre o Índice de Suporte Califórnia (ISC) e a expansão de um solo residual proveniente do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa, Paraná, descrito na literatura como de comportamento laterítico. O programa experimental compreendeu a caracterização física do solo natural, o ensaio de compactação e a avaliação de misturas com 3% e 5% de cal hidratada, em relação à massa seca do solo, submetidas a 0, 7 e 28 dias de pré-cura após a moldagem. O solo natural foi ensaiado sem pré-cura e utilizado como referência. Foram moldados dois corpos de prova por condição, totalizando 14, e adotou-se a umidade ótima do solo natural como referência para a preparação das misturas. Após 96 horas de imersão, determinaram-se a expansão e o ISC por meio de ensaios em prensa automática, com análise descritiva dos resultados. O solo natural apresentou predominância de partículas finas, índice de plasticidade de 3%, ISC médio de 9,94% e expansão média de 1,08%. Todas as misturas apresentaram ISC médio superior e expansão média inferior aos valores do solo natural. Para os dois teores de cal, o ISC médio aumentou entre 0 e 7 dias de pré-cura e diminuiu aos 28 dias. O maior ISC médio foi obtido com 5% de cal e 7 dias de pré-cura, atingindo 48,56%, com desvio-padrão amostral de 7,25 pontos percentuais. A menor expansão média, de 0,48%, foi registrada com 5% de cal e 28 dias de pré-cura, representando redução de aproximadamente 55,7% em relação ao solo natural. Os resultados indicam potencial de melhoria da capacidade de suporte e redução da expansão com a adição de cal, embora sua interpretação seja limitada pelo número de corpos de prova e pelas diferenças de umidade e massa específica aparente seca de moldagem. A aplicação em pavimentação depende da verificação dos requisitos técnicos da camada pretendida.

Palavras-chave: estabilização de solos; cal hidratada; índice de suporte Califórnia; pavimentação; pré-cura.

ABSTRACT

CAPOTE, MARIA EDUARDA DA CUNHA. **Influence of lime content and curing period on the California Bearing Ratio of a lateritic residual soil from Ponta Grossa/PR.** 2026. Course Completion Assignment (Civil Engineering)– State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2026.

This study evaluated the influence of lime content and pre-curing period on the California Bearing Ratio (CBR) and expansion of a residual soil collected at the Geotechnical Studies Experimental Field in Ponta Grossa, Paraná, Brazil, which has been described in the literature as exhibiting lateritic behavior. The experimental program included the physical characterization of the natural soil, a compaction test, and the evaluation of mixtures containing 3% and 5% hydrated lime by dry soil mass, subjected to pre-curing periods of 0, 7, and 28 days after specimen molding. The natural soil was tested without pre-curing and used as a reference. Two specimens were molded for each condition, totaling 14 specimens, and the optimum moisture content of the natural soil was used as a reference for preparing the mixtures. After 96 hours of soaking, expansion and CBR were determined using an automatic testing machine, and the results were analyzed descriptively. The natural soil exhibited a predominance of fine particles, a plasticity index of 3%, a mean CBR of 9.94%, and a mean expansion of 1.08%. All lime-treated mixtures presented higher mean CBR values and lower mean expansion values than the natural soil. For both lime contents, the mean CBR increased between 0 and 7 days of pre-curing and decreased after 28 days. The highest mean CBR was obtained with 5% lime and 7 days of pre-curing, reaching 48.56%, with a sample standard deviation of 7.25 percentage points. The lowest mean expansion, 0.48%, was recorded for the mixture containing 5% lime after 28 days of pre-curing, representing a reduction of approximately 55.7% compared with the natural soil. The results indicate the potential for improving bearing capacity and reducing expansion through lime addition, although their interpretation is limited by the number of specimens and differences in molding moisture content and dry bulk density. The use of the treated soil in pavement construction depends on verifying the technical requirements for the intended pavement layer.

Keywords: soil stabilization; hydrated lime; California Bearing Ratio (CBR); pavements; curing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática das camadas de um pavimento 25

Figura 2 - Esquema dos mecanismos físico-químicos envolvidos na estabilização solo-cal 31

Figura 3 - Fluxograma do programa experimental adotado 38

Figura 4 - Solo residual laterítico utilizado na pesquisa 40

Figura 5 – Cal hidratada utilizada 41

Figura 6 - Etapas de preparação do solo: (a) secagem ao ar, (b) destorroamento e (c) homogeneização 46

Figura 7 – Ensaios de caracterização (a) picnômetros; (b) ensaio de umidade; (c) sedimentação; (d) conjunto de peneiras; (e) limite de liquidez 47

Figura 8 - Conjunto de compactação: (a) molde e acessórios; (b) aplicação dos golpes molde 48

Figura 9 - Homogeneização da mistura solo-cal em condição seca 49

Figura 10 – Corpo de prova após moldagem no cilindro de ISC 50

Figura 11 - Montagem e acompanhamento da expansão durante a imersão 51

Figura 12 - Prensa automática Marshall/ISC utilizada no ensaio de penetração 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantitativo de solo necessário para o programa experimental 40

Tabela 2 - Distribuição dos corpos de prova 44

Tabela 3 - Umidade gravimétrica..... 54

Tabela 4 - Peso específico real dos grãos 55

Tabela 5 - Peneiramento grosso 56

Tabela 6 - Sedimentação 57

Tabela 7 – Peneiramento fino 57

Tabela 8 - Limite de liquidez 59

Tabela 9 - Limite de plasticidade..... 60

Tabela 10 - Pontos da curva de compactação do solo natural..... 64

Tabela 11 - Condições de moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios de expansão e ISC..... 66

Tabela 12 - Deslocamento vertical e expansão dos corpos de prova após 96 horas de imersão 67

Tabela 13 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo natural 71

Tabela 14 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo-cal 3% aos 0 dias 72

Tabela 15 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo-cal 3% aos 7 dias 73

Tabela 16 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo-cal 3% aos 28 dias 74

Tabela 17 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo-cal 5% sem pré-cura 76

Tabela 18 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo-cal 5% aos 7 dias 77

Tabela 19 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo-cal 5% aos 28 dias 78

Tabela 20 - Síntese dos resultados de ISC e expansão após 96 horas de imersão 78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Equipamentos utilizados e respectivas aplicações 42

Quadro 2 - Matriz de variáveis e parâmetros 43

Quadro 3 – Procedimentos e referências normativas 48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica 58

Gráfico 2 - Composição granulométrica do solo 59

Gráfico 3 - Relação semilogarítmica entre umidade e número de golpes experimentais 60

Gráfico 4 - Curva de compactação 65

Gráfico 5 - Expansão após 96 horas de imersão em função do período de pré-cura68

Gráfico 6 - Curvas pressão–penetração dos corpos de prova do solo natural 70

Gráfico 7 – Curvas pressão-penetração da mistura com 3% de cal sem pré-cura... 72

Gráfico 8 - Curvas pressão-penetração da mistura com 3% de cal com 7 dias de pré-cura 73

Gráfico 9 - Curvas pressão-penetração da mistura com 3% de cal com 28 dias de pré-cura 74

Gráfico 10 - Curvas pressão-penetração da mistura com 5% de cal sem pré-cura.. 75

Gráfico 11 - Curvas pressão-penetração da mistura com 5% de cal com 7 dias de pré-cura 76

Gráfico 12 - Curvas pressão-penetração da mistura com 5% de cal com 28 dias de pré-cura 77

Gráfico 13 – ISC médio após 96 horas de imersão em função do período de pré-cura 79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAH	Aluminatos de cálcio hidratados
CEEG – PG	Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de prova
CSH	Silicatos de cálcio hidratados
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
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
NBR	Norma Brasileira
NLA	National Lime Association
PR	Paraná
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA 18

1.2 HIPÓTESE 18

1.3 OBJETIVOS 18

1.3.1 Objetivo geral 18

1.3.2 Objetivos específicos 18

1.4 JUSTIFICATIVA 19

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21

2.1 SOLOS E SUAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS 21

2.1.1 Formação e classificação dos solos 21

2.1.2 Solos tropicais e lateríticos 23

2.1.3 O subleito e as camadas do pavimento 24

2.1.4 Principais parâmetros 26

2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS 27

2.2.1 Conceito de estabilização 27

2.2.2 Tipos de estabilização 29

2.3 A ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS COM CAL 30

2.3.1 Mecanismos das reações solo-cal 32

2.3.2 Fatores que influenciam a estabilização solo-cal 34

3 METODOLOGIA 38

3.1 MATERIAIS 38

3.1.1 Solo 39

3.1.2 Cal hidratada 40

3.1.3 Água 42

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS 42

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL 43

3.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS 45

3.4.1 Caracterização do solo natural 45

3.4.2 Preparação das misturas e moldagem 49

3.4.3 Períodos e condições de pré-cura 50

3.4.4 Ensaio de expansão e ISC 51

3.4.5 Análise dos dados 52

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 54

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NATURAL 54

4.1.1 Umidade gravimétrica 54

4.1.2 Peso específico real dos grãos 55

4.1.3 Análise granulométrica 56

4.1.4 Limites de consistência 59

4.1.5 Classificação geotécnica do solo 61

4.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO NATURAL 63

4.3 EXPANSÃO E ISC 66

4.3.1 Apresentação das condições de moldagem 66

4.3.2 Expansão após imersão 67

4.3.3 ISC 69

4.3.3.1 Solo natural 70

4.3.3.2 Misturas com 3% de cal 71

4.3.3.3 Misturas com 5% de cal 75

4.3.3.4 Comparação do comportamento do solo natural e das misturas solo-cal 78

5 CONCLUSÃO 83

1 INTRODUÇÃO

O solo representa o material de construção mais antigo e abundante na engenharia civil (Caputo, 1988). Na infraestrutura de transportes, desempenha um papel estratégico e indispensável, compondo as principais camadas estruturais dos pavimentos e viabilizando técnica e economicamente a execução de rodovias por meio do uso de materiais locais (Bernucci *et al.,* 2022).

A relevância da infraestrutura de transportes evidencia-se diante do contínuo desenvolvimento nacional em obras rodoviárias, cujo avanço constitui um fator determinante para o progresso socioeconômico do país. Segundo a Pesquisa Confederação Nacional do Transporte de Rodovias (CNT, 2025), a eficiência da malha rodoviária condiciona a integração territorial e a mobilidade da população, influenciando diretamente o acesso a serviços essenciais. O relatório destaca, ainda, que a modernização e a manutenção adequada das vias são requisitos indispensáveis para a redução dos custos logísticos e para a ampliação da competitividade nacional, permitindo que o desenvolvimento da infraestrutura acompanhe as demandas dinâmicas da economia brasileira.

Todavia, a expansão das redes rodoviárias impõe desafios relevantes à engenharia, uma vez que a estabilidade das camadas superiores depende diretamente do comportamento do terreno natural (Paula *et al*., 2024). Dessa forma, o projeto de infraestrutura não pode ser dissociado das características geológicas locais. Quando o terreno não apresenta propriedades mecânicas adequadas, o desempenho do pavimento pode ser comprometido, o que acaba influenciando na redução da vida útil e no aumento da necessidade de intervenções corretivas.

Segundo a análise de tensões em estruturas de pavimentos apresentada por Huang (2004), o subleito é o suporte crítico que sustenta as camadas superiores do pavimento. Caso suas propriedades geotécnicas sejam insuficientes, a estrutura poderá apresentar falhas prematuras, independentemente da qualidade dos materiais empregados nas camadas superiores. Nesse cenário, é frequente que os solos, em seu estado natural, não apresentem os parâmetros de resistência e deformabilidade adequados para suportar as solicitações de tráfego previstas em projeto, exigindo soluções técnicas para sua adequação.

Solos com baixa capacidade de suporte, alta plasticidade, elevada compressibilidade ou comportamento expansivo representam um dos maiores desafios da engenharia geotécnica (Medeiros; Ferreira; Bello, 2023). A utilização direta desses materiais em subleitos de pavimentos ou fundações pode resultar em desempenho insatisfatório e no surgimento de patologias severas, como recalques diferenciais, afundamentos e rupturas, comprometendo a funcionalidade e a segurança da obra e acarretando elevados custos de manutenção (Usanga; Edet, 2025). Assim, garantir um solo estabilizado e resistente não é apenas um requisito técnico de engenharia, mas também uma necessidade econômica.

Diante desse cenário, torna-se relevante a aplicação de técnicas que visem à melhoria das propriedades mecânicas e químicas desses solos. Dentre as soluções disponíveis, as técnicas de melhoramento de solos surgem como alternativa vantajosa à substituição do material local. Tais métodos visam modificar as propriedades do solo para que este atenda aos requisitos de segurança e desempenho exigidos pelo projeto (Lima *et al*., 2023). Nesse contexto, a estabilização química destaca-se por alterar a estrutura do solo, sendo que o emprego da cal sobressai como uma das técnicas mais consolidadas e eficientes para o tratamento de solos tropicais e lateríticos (Alcântara *et al*., 1997).

A cal promove reações de curto e longo prazo, melhorando a trabalhabilidade e aumentando significativamente a resistência mecânica do solo (Diniz *et al.*, 2024). Pesquisas recentes têm demonstrado que esse aditivo pode reduzir a expansibilidade e aumentar o Índice de Suporte Califórnia (ISC) (Silvani *et al*., 2024), tornando-se uma solução eficaz para solos de baixa qualidade, especialmente em regiões tropicais.

Diante do exposto, este trabalho verificou o comportamento do solo residual do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa/PR (CEEG-PG). De acordo com a caracterização de Tonus *et al*. (2022), esse material exibe comportamento laterítico fornecendo contexto necessário para a presente investigação. A seleção do referido solo fundamentou-se na sua representatividade regional e no propósito de investigar a eficácia de processos de estabilização química, buscando contribuir para o entendimento do comportamento mecânico de um solo residual laterítico estabilizado com cal, especialmente quanto à influência do teor de aditivo e do período de cura na evolução da capacidade de suporte.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Conforme preconizado por Little (1995), a estabilização solo-cal é um processo sinérgico em que o teor de ligante provê o potencial químico, a energia de compactação garante a redução de vazios e o tempo de cura permite a maturação das ligações pozolânicas, resultando no ganho de resistência da camada. Todavia, a simples aplicação da técnica sem um estudo prévio pode levar a resultados ineficientes e ao desperdício de recursos, evidenciando a necessidade de métodos que permitam identificar a dosagem otimizada para diferentes cenários, especialmente em solos residuais tropicais que apresentam alta variabilidade de comportamento.

Diante da heterogeneidade dos solos, esta pesquisa buscou responder a seguinte problemática: Como a variação do teor de cal e dos períodos de cura interferem na evolução da capacidade de suporte (ISC) de um solo laterítico de Ponta Grossa/PR?

1.2 HIPÓTESE

Admite-se que a adição de cal ao solo residual laterítico tende a promover um aumento substancial da capacidade de suporte (ISC), condicionado a uma relação entre as variáveis de dosagem e execução. Pressupõe-se que o ganho de resistência apresente uma correlação positiva com o teor de ligante (até o limite de saturação química), e com o período de cura mediante uma energia de compactação controlada.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Analisar a influência das variáveis teor de aditivo e período de cura, na evolução da capacidade de suporte de um solo residual laterítico do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa/PR, sob condições controladas de compactação.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar fisicamente o solo em sua condição natural, estabelecendo a linha base para a análise comparativa dos efeitos da estabilização;
- Avaliar a evolução da expansão das misturas compactadas em função dos teores de cal e dos períodos de cura adotados;
- Avaliar a evolução da capacidade de suporte (ISC) das misturas compactadas em função dos teores de cal e dos períodos de cura adotados.

1.4 JUSTIFICATIVA

Do ponto de vista da Engenharia Civil, a alternativa tradicional para lidar com solos de baixa capacidade de suporte é a sua substituição por materiais de empréstimo com melhores características, como agregados graúdos ou o solo de jazidas adequadas. Essa prática, entretanto, acarreta custos elevados relacionados à aquisição, transporte e descarte do material (bota-fora), além de gerar impactos ambientais significativos pela exploração de novas jazidas e pelo aumento do tráfego de veículos pesados (Cabral, 2018).

Nesse contexto, a estabilização de solos com cal é amplamente empregada como uma alternativa técnica. Conforme Alcântara *et al.* (1997), os solos tratados com cal demonstram melhorias significativas em suas propriedades mecânicas, apresentando comportamento mais resistente e estável em comparação ao solo natural.

Contudo, para que esses benefícios sejam plenamente alcançados, a aplicação da técnica deve ser otimizada. A literatura técnica aponta que a eficiência da estabilização com cal está intrinsecamente ligada às características mineralógicas e químicas do solo (Medeiros; Ferreira; Bello, 2023). Por essa razão, dados obtidos em formações geológicas distintas não podem ser extrapolados de forma genérica, sob o risco de comprometer a integridade estrutural do pavimento.

A aplicação inadequada da técnica, sem um estudo prévio, pode levar tanto ao superdimensionamento, implicando em desperdício de material e recursos financeiros, quanto ao subdimensionamento, que compromete o desempenho e a durabilidade da estrutura. É nessa lacuna de conhecimento específico que se encontra o presente estudo.

A pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender o comportamento particular do solo residual laterítico do CEEG-PG, investigando como o teor de aditivo

e o período de maturação governam o incremento da capacidade de suporte e da expansão. Tais resultados poderão fornecer material para futuras pesquisas relacionadas a decisões de projeto que aliem segurança técnica à eficiência econômica na região.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente pesquisa aborda os principais conceitos e fundamentos relacionados à estabilização de solos com cal, visando contribuir para a compreensão do comportamento do material estudado. Inicialmente, são apresentados aspectos relacionados à formação dos solos e às suas principais propriedades geotécnicas, com ênfase nos solos tropicais e lateríticos e nos parâmetros relevantes para a avaliação de seu comportamento. Em seguida, são discutidos os conceitos e os principais métodos de estabilização de solos, destacando-se a estabilização química. Por fim, são abordados os mecanismos envolvidos na estabilização com cal e os principais fatores que influenciam o desempenho das misturas solo-cal, especialmente quanto à capacidade de suporte e à evolução das propriedades mecânicas ao longo do período de cura.

2.1 SOLOS E SUAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

2.1.1 Formação e classificação dos solos

O solo é um sistema trifásico complexo, composto por partículas sólidas, água e ar, resultante do incessante processo de intemperismo sobre as rochas. Segundo Pinto (2006), a origem desse material é governada pela desintegração física, que preserva a natureza mineralógica da rocha mãe em partículas maiores e pela decomposição química, responsável pela formação de minerais secundários.

Em regiões de clima subtropical, como o Sul do Brasil, a formação do solo é fortemente influenciada pela intensidade pluviométrica e pelas variações de temperatura. Segundo Santos *et al.* (2018), em publicação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) esse dinamismo climático atuou como o motor do intemperismo químico local, onde os solos passaram por um processo de ferralitização, caracterizado pela lixiviação da sílica livre e das bases e concentração relativa de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Em outras palavras, foram gerados solos residuais que, apesar da localização geográfica subtropical, exibem caráter laterítico e comportamento tipicamente tropical (Nogami; Villibor, 1995).

Para a padronização das práticas de engenharia, o agrupamento desses materiais em sistemas de classificação é fundamental para que seja possível prever seu comportamento sob carregamento. Entre os principais sistemas de classificação

empregados está o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), que classifica os solos com base em suas características de textura e plasticidade. Nesse sistema, a granulometria é utilizada para diferenciar as frações grossas e finas e, para os solos finos, os limites de liquidez e de plasticidade, conhecidos como Limites de Atterberg, são interpretados por meio do gráfico de plasticidade idealizado por Casagrande (DNIT, 2006).

Complementarmente, a Classificação da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) avalia solos como material de subleito. Sua aplicação fundamenta-se nos critérios de granulometria e limites de consistência e complementarmente no Índice de Grupo (IG), uma expressão empírica que relaciona a fração fina do solo (passante na peneira nº 200) com seus limites de liquidez e plasticidade. De acordo com Balbo (2007, p. 84) o IG serve como “um parâmetro arbitrário e estimativo da capacidade de suporte”, quanto maior o seu valor, menor é a capacidade de suporte esperada.

Esse indicador, portanto, auxilia na classificação geotécnica dos solos empregados em obras rodoviárias, fornecendo parâmetros para a avaliação de sua adequação como material de pavimentação (DNIT, 2010).

Entretanto, as classificações geotécnicas tradicionais podem subestimar o potencial de solos de regiões tropicais por utilizarem critérios desenvolvidos para regiões de clima distinto. Para mitigar essa distorção, a Metodologia Miniatura, Compactado, Tropical (MCT), desenvolvida por Nogami e Villibor (1995), introduziu uma abordagem que diferencia solos de comportamento laterítico daqueles de natureza não laterítica.

Essa distinção é fundamental, pois, conforme destacam os autores, a metodologia foi desenvolvida especialmente para que fosse possível escolher mais apropriadamente os solos para a finalidade considerada, o que nem sempre era possível com o uso apenas das sistemáticas tradicionais de classificação (Nogami; Villibor, 1995). Assim, solos finos tropicais com características lateríticas podem apresentar elevada capacidade de suporte e baixa expansibilidade, desafiando os critérios de rejeição das normas internacionais clássicas. A compreensão integrada desses sistemas é vital para a investigação de estabilizantes químicos, como a cal, visto que a eficácia do aditivo está diretamente condicionada à mineralogia e ao enquadramento geotécnico do solo em estudo.

2.1.2 Solos tropicais e lateríticos

Do ponto de vista geotécnico, os solos tropicais apresentam peculiaridades mecânicas. Esses materiais frequentemente exibem uma estrutura granular com elevada porosidade, podendo também manifestar alta plasticidade, baixa capacidade de suporte ou significativa variação volumétrica (Medeiros; Ferreira; Bello, 2023), características que impõem desafios complexos à engenharia de infraestrutura. Por isso, o entendimento de seu comportamento e a aplicação de técnicas de melhoramento são essenciais para garantir estabilidade e durabilidade em obras de infraestrutura.

Conforme a Metodologia MCT (Nogami; Villibor, 1995), esses materiais são classificados em dois grandes grupos baseados em seu comportamento geotécnico: os solos não-lateríticos e os solos lateríticos.

Os solos não-lateríticos preservam minerais da rocha-mãe, o que pode conferir propriedades desfavoráveis ao seu emprego em camadas de pavimentos, como alta plasticidade e expansibilidade, capazes de comprometer a capacidade de suporte e a estabilidade volumétrica do material. Em contrapartida, os solos lateríticos representam o estágio avançado do intemperismo, caracterizado por processos de lixiviação profunda de sílica e precipitação de óxidos de ferro e alumínio. Segundo Nogami e Villibor (1995), essa composição mineralógica promove a formação de microagregados estáveis, conferindo ao material baixa expansibilidade em comparação a outros solos argilosos.

No cenário regional, o solo residual de Ponta Grossa/PR é identificado com comportamento laterítico devido ao seu histórico de formação geológica e climática. Segundo Tonus *et al*. (2022), embora as investigações tátil-visuais e granulométricas classifiquem as camadas superficiais como solos finos de matriz argilo-siltosas, os ensaios de caracterização revelam baixa atividade das argilas, com Índice de Plasticidade (IP) reduzido e comportamento com baixa plasticidade. Essa estrutura, confirmada pelo MCT como solo argiloso laterítico, favorece a estabilidade volumétrica e confere ao material propriedades geotécnicas que divergem do comportamento esperado para solos argilosos convencionais, influenciando diretamente a resistência ao cisalhamento e a capacidade de carga local.

Nesse contexto, surge o questionamento sobre a aplicação de cal em solos que já apresentam baixo potencial de expansão. A utilização do aditivo químico em

solos lateríticos justifica-se não pela correção da expansividade, mas pela melhoria da performance estrutural. De acordo com Little (1995), a cal promove a modificação imediata da trabalhabilidade via floculação e, a longo prazo, desencadeia reações pozolânicas que formam compostos cimentantes nos vazios do solo.

Para solos lateríticos, isso se traduz em um potencial incremento da capacidade de suporte (ISC) e da rigidez do material, além de reduzir seu potencial de expansão e melhorar seu desempenho em condições de elevada umidade o que leva a prevenir deformações permanentes e patologias precoces. (Amadi; Okeiyi, 2017; Portelinha *et al*., 2012).

2.1.3 O subleito e as camadas do pavimento

Estruturalmente, o pavimento caracteriza-se como um sistema de camadas sobrepostas de geometria finita, projetado para a absorção e dissipação das solicitações dinâmicas do tráfego de veículos. Sua configuração visa a redução das tensões verticais a níveis admissíveis, assegurando que o subleito (unidade de fundação da via) receba apenas esforços compatíveis com sua capacidade de suporte. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática das principais camadas de um pavimento flexível, composto, de modo geral, por revestimento asfáltico, base, sub-base e subleito (DER/PR, 2023).

Figura 1 - Representação esquemática das camadas de um pavimento



Fonte: DER/PR (2023)

Segundo Bernucci *et al*. (2022), um pavimento é considerado eficiente quando protege o subleito de deformações excessivas, garantindo a trafegabilidade e o conforto ao longo de sua vida útil. As camadas superiores, como revestimento, base e sub-base, por serem constituídas de materiais selecionados geralmente possuem módulos de resiliência mais elevados, enquanto o subleito, por ser o material natural, pode representar o elo mais frágil da estrutura (DNIT, 2010).

A capacidade de suporte do subleito, expressa pelo ISC, constitui um parâmetro determinante no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Valores reduzidos de ISC exigem maior espessura total do pavimento para proteger o subleito, aumentando o consumo de materiais e os custos de execução (DNIT, 2006). Quando a estrutura é insuficiente para limitar as deformações provocadas pelo tráfego, podem ocorrer afundamentos em trilha de roda e trincamento por fadiga (Huang, 2004).

Nesse contexto, a teoria de distribuição de tensões de Huang (2004) reforça que a intensidade das cargas verticais diminui conforme a profundidade. Entretanto, se o subleito não apresentar uma resistência mínima adequada ou se for suscetível a variações volumétricas e perda de suporte por saturação, ocorrerá o fenômeno da deflexão excessiva.

Portanto, a estabilização química do solo do subleito com cal não visa apenas o ganho imediato de resistência, mas a criação de uma plataforma de trabalho rígida e estável. Ao elevar o ISC do solo residual e reduzir sua sensibilidade à água, a técnica assegura que as tensões transmitidas pelas camadas superiores sejam suportadas sem causar recalques permanentes, resultando em uma infraestrutura com menores custos de manutenção e maior longevidade (Senço, 2007).

2.1.4 Principais parâmetros

A caracterização geotécnica de um solo descreve o material e fornece parâmetros para a previsão de seu comportamento mecânico sob diferentes condições de carregamento. De acordo com Das e Sobhan (2018), a determinação das propriedades e dos parâmetros de resistência é o que permite traduzir a natureza física do solo em dados quantitativos para o dimensionamento de engenharia.

A investigação inicia-se fundamentalmente pelos índices físicos que estabelecem relações entre os sólidos, água e ar. A massa específica, o teor de umidade, o índice de vazios e o grau de saturação, os quais conforme aponta Caputo (1988), estabelecem as relações de fase do sistema trifásico do solo e servem como base para correlacionar sua porosidade e estado de compacidade com a suscetibilidade a deformações.

Complementarmente, os Limites de Atterberg, compostos pelo limite de liquidez (LL) e pelo limite de plasticidade (LP), são indispensáveis para mapear a consistência e a atividade da fração fina. Pinto destaca que:

> Os índices de consistência se mostram muito úteis para a identificação dos solos e sua classificação. Dessa forma, com o seu conhecimento, pode-se prever muito do comportamento do solo, sob o ponto de vista da Engenharia, com base em experiência anterior (Pinto, 2006, p.27).

Para aplicações de infraestrutura, onde o solo atua como camada de suporte, as propriedades mecânicas devem ser avaliadas sob condições induzidas de compactação e ruptura. O ensaio de compactação Proctor fornece a relação crítica entre a umidade ótima e a massa específica aparente seca (ABNT 7182, 2016), parâmetro que, segundo Pinto (2006), dita o arranjo estrutural ideal para maximizar a resistência e reduzir a permeabilidade.

A partir da condição idealizada de compactação, o ensaio de Índice de Suporte Califórnia atua como o indicador empírico predominante de resistência à penetração e expansão, sendo a métrica norteadora para o dimensionamento de pavimentos (Balbo, 2007). Muito embora os métodos contemporâneos nacionais preconizem a transição para parâmetros dinâmicos, o índice empírico de ISC permanece consolidado como a base regulamentar da triagem e controle tecnológico de materiais.

Por fim, a estabilidade intrínseca do material frente a esforços cortantes é consolidada através da determinação da resistência ao cisalhamento. Esse parâmetro expressa a capacidade do solo de resistir a tensões cisalhantes sem atingir a ruptura (Caputo,1988). Esses parâmetros são fundamentais para avaliar a adequação do solo às solicitações de projeto e, quando insuficientes, apontam a necessidade de aplicação de técnicas de melhoramento, garantindo, assim, a segurança estrutural e a viabilidade da obra.

2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

2.2.1 Conceito de estabilização

No âmbito da engenharia rodoviária, a estabilização reúne procedimentos destinados a modificar propriedades relevantes do solo surgindo como uma alternativa à substituição de solos de baixa qualidade, reduzindo os custos com transporte de bota-fora (Senço, 2007), ao mesmo tempo que mitiga os impactos ambientais associados à exploração de novas jazidas ao reutilizar o próprio material local deteriorado (Luvizão, 2023).

Segundo as diretrizes normativas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), o emprego dessa técnica em materiais locais constitui uma alternativa para viabilizar a execução de camadas de subleito e sub-base, priorizando o aproveitamento dos recursos naturais disponíveis nas proximidades ou na própria faixa de domínio da obra.

Lima *et al.* (2023) afirmam que a escolha do método mais apropriado está intrinsecamente ligada às propriedades geotécnicas do solo local e às condições de campo, devendo o projeto atender às exigências mecânicas normatizadas para cada camada estrutural do pavimento. De forma geral, as técnicas de estabilização visam

aumentar a resistência ao cisalhamento, reduzir a deformabilidade (variabilidade volumétrica) e melhorar a durabilidade do material perante os agentes climáticos (Caputo,1988).

O foco principal desse processo é modificar propriedades relevantes ao comportamento geotécnico do solo adequando-o às solicitações previstas para a camada de acordo com a vida útil de projeto do pavimento. Do ponto de vista microestrutural, altera a estrutura do solo ao favorecer a atração entre as partículas e a formação de uma estrutura floculada, modificando a estrutura e a trabalhabilidade do solo. Com o avanço da cura, as reações pozolânicas formam compostos cimentantes que contribuem para o aumento da resistência e da rigidez do material (Dash; Hussain, 2012).

Em misturas solo-cal compactadas, a redução da porosidade está associada ao aumento da resistência mecânica do material (Consoli; Lopes Jr.; Heineck, 2009). Além disso, o controle da umidade é relevante para o desempenho das camadas do pavimento, uma vez que o teor de água influencia o acúmulo de deformações permanentes sob as solicitações repetidas do tráfego (Lekarp; Isacsson; Dawson, 2000).

É justamente nesse cenário de solicitações dinâmicas que as investigações conduzidas por Guimarães (2009), endossadas por achados recentes de Medeiros, Santana e Silva (2024), ganham relevância. Os autores demonstram que solos tropicais estabilizados exibem uma redução drástica na suscetibilidade a esse tipo de deformação permanente se comparados ao natural. Essa estabilização previne o surgimento de patologias precoces na capa asfáltica, como o afundamento nas trilhas de roda decorrente do tráfego de veículos pesados.

Adicionalmente, o aprofundamento desse conceito exige a compreensão da sensibilidade hídrica das matrizes constituintes. Materiais em estado natural e de comportamento expansivo tendem a sofrer perdas drásticas de capacidade de carga quando saturados, fenômeno associado ao amolecimento estrutural. A estabilização, portanto confere estabilidade volumétrica ao controlar os potenciais de expansão e contração decorrentes das variações sazonais de umidade (Ingles; Metcalf, 1972). Dessa forma, a estabilização não deve ser vista apenas como um incremento na rigidez imediata do material, mas como uma maneira de desempenho mecânico a longo prazo. O processo transforma um material natural tipicamente imprevisível em

uma camada de engenharia homogênea, capaz de distribuir as tensões verticais provenientes do tráfego de maneira eficiente, protegendo a integridade de toda a estrutura do pavimento.

2.2.2 Tipos de estabilização

Para que o desempenho mecânico a longo prazo e a homogeneidade da camada sejam alcançados, as intervenções de engenharia não se limitam a um único procedimento metodológico. A escolha do tratamento depende das características geotécnicas e mineralógicas do solo, da compatibilidade com o agente estabilizante e dos requisitos estabelecidos em projeto (Ingles; Metcalf, 1972).

Didaticamente, a literatura Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) geotécnica agrupa essas metodologias em três grandes vertentes: a estabilização mecânica, a estabilização granulométrica e a estabilização química (DNIT, 2006).

A estabilização mecânica refere-se aos processos que alteram o estado físico sem modificar sua composição química ou sua curva granulométrica original. O método mais difundido nesta categoria é a compactação enérgica de campo, que utiliza rolos compactadores (como pés-de-carneiro, pneumáticos ou vibratórios) para induzir a expulsão do ar dos vazios rearranjando as partículas, elevando a massa específica aparente seca do maciço e sua consequente resistência ao cisalhamento (Pinto, 2006).

Complementarmente, a engenharia geotécnica moderna engloba nesta categoria a inserção de elementos tensores de reforço na matriz terrosa, a exemplo dos geossintéticos (geogrelhas e geotêxteis), que atuam absorvendo os esforços de tração e aumentando a capacidade de carga global da estrutura através do confinamento das partículas (Vertematti, 2015).

Por sua vez, a estabilização granulométrica baseia-se na modificação da distribuição do tamanho das partículas por meio da mistura controlada de dois ou mais solos de características distintas. O princípio fundamental é corrigir as deficiências de uma graduação natural mal graduada ou descontínua. De acordo com Senço (2007), a abordagem envolve a associação de um solo granular (rico em pedregulhos ou areias), responsável por conferir um esqueleto rígido e alto ângulo de atrito interno por intertravamento, com um solo de frações finas (argiloso ou siltoso), que atua como

elemento aglutinante por coesão. O resultado é uma mistura de curva granulométrica contínua que, após compactada, apresenta elevada estabilidade sob carregamento e menor deformabilidade.

Por fim, a estabilização química fundamenta-se na incorporação de agentes aglomerantes exógenos à matriz terrosa, promovendo alterações profundas em sua estrutura físico-química e mineralógica (Diniz *et al.*, 2024). Enquanto os métodos mecânicos e granulométricos dependem essencialmente do rearranjo físico e do atrito entre os grãos, a estabilização química induz reações como a de troca catiônica, floculação e cimentação diretamente na superfície das argilas (Little, 1995). Para esse fim, destaca-se o emprego de materiais tradicionais como a cal e o cimento Portland, além do aproveitamento de subprodutos industriais promissores, a exemplo da cinza volante e da escória de alto-forno.

2.3 A ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS COM CAL

Como explicado anteriormente, a estabilização química de solos com cal é uma técnica empregada na engenharia geotécnica e de pavimentação rodoviária, a cal está entre os agentes estabilizantes de solo mais antigos conhecidos, com registros históricos de sua utilização na construção de estradas desde as civilizações antigas (Carpenter *et al*., 1992).

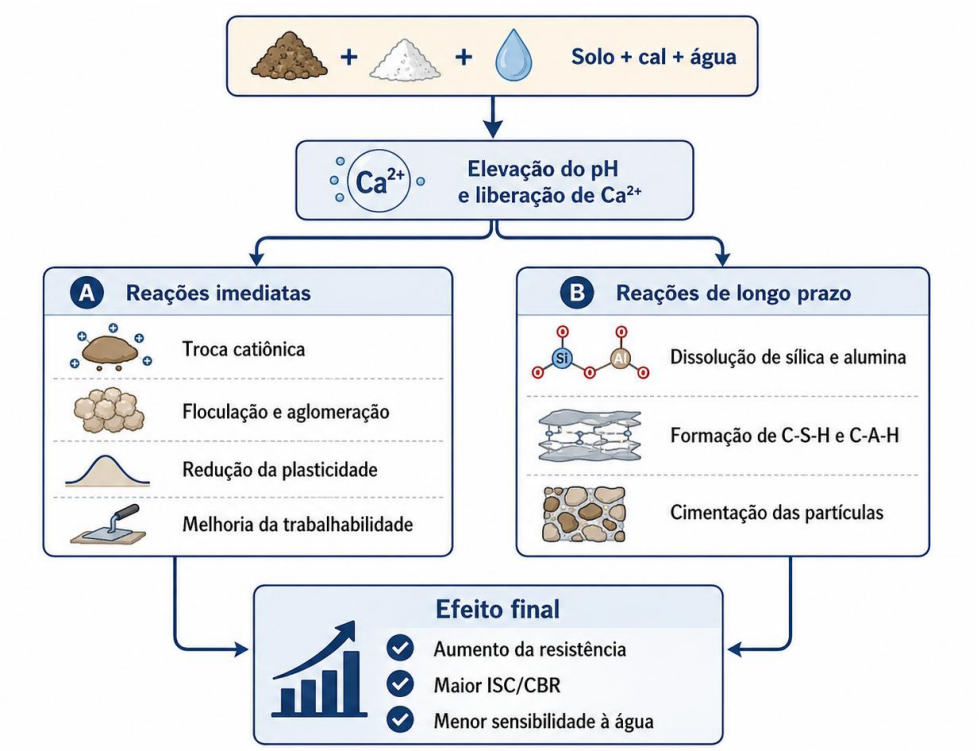
De acordo com o DNIT (2019), a estabilização de solos com cal é definida como um processo físico-químico decorrente da adição de uma quantidade mínima de cal capaz de promover o aumento permanente das propriedades mecânicas do solo. A própria norma evidencia que esse processo envolve reações químicas entre a cal e o solo, como troca catiônica, neutralização ácido-base e, posteriormente, reações pozolânicas responsáveis pela formação de compostos cimentantes.

Assim, a técnica não deve ser compreendida apenas como uma simples mistura de materiais, mas como um processo dependente das interações físico-químicas entre o aditivo e os constituintes mineralógicos do solo (Dash; Hussain, 2012).

Do ponto de vista de sua composição química e origem mineralógica, a cal empregada como aditivo pode ser classificada em cal cálcica[1] e cal dolomítica[2], sendo ambas inicialmente produzidas na forma de cal viva (Martins; Punhagui; John, 2022).

Segundo a National Lime Association (NLA, 2004), a partir da adição controlada de água, ocorre a hidratação, dando origem à cal hidratada. Em obras rodoviárias esse produto apresenta ampla utilização no Brasil, principalmente devido à sua praticidade executiva, especialmente quanto ao manuseio e incorporação ao solo, pois reduz os riscos associados à elevada reatividade da cal viva (Araújo, 2009). Abaixo, a Figura 2 apresenta o esquema dos mecanismos físico-químicos envolvidos na estabilização solo-cal.

Figura 2 - Esquema dos mecanismos físico-químicos envolvidos na estabilização solo-cal



Fonte: Little (1995) e NLA (2004).
Nota: A autora (2026)

Quando incorporada em presença de água, a cal eleva o pH do meio e disponibiliza íons cálcio, os quais participam de reações com as partículas argilosas e

[1] cal cálcica é aquela cuja composição é predominantemente formada por compostos de cálcio (Martins; Punhagui; John, 2022);
[2] cal dolomítica é aquela que, além dos compostos de cálcio, apresenta quantidade significativa de compostos de magnésio (Martins; Punhagui; John, 2022).

com os compostos de sílica e alumina presentes no solo. Esses processos são responsáveis tanto pelas alterações imediatas de plasticidade e trabalhabilidade quanto pelos ganhos de resistência desenvolvidos ao longo do período de cura (NLA, 2004).

Essas etapas são compreendidas de duas maneiras principais e complementares: a modificação do solo e a estabilização propriamente dita. A modificação está associada a efeitos físico-químicos de curto prazo, como troca catiônica e floculação das partículas argilosas. Já a estabilização está relacionada às reações pozolânicas de longo prazo, responsáveis pela formação de compostos cimentantes e pelo aumento progressivo da resistência mecânica do material (Makusa, 2012).

Nos solos tropicais residuais e lateríticos, a aplicação da cal apresenta particularidades importantes, uma vez que esses materiais podem conter uma mineralogia capaz de influenciar o desenvolvimento das reações solo-cal (DNIT, 2019). Além disso, por apresentarem comportamento geotécnico distinto daquele previsto por classificações tradicionais, a eficiência da estabilização não deve ser atribuída apenas ao teor de cal adicionado, mas também à mineralogia, à natureza do solo, ao teor de umidade, à energia de compactação e ao período de cura adotado (Araújo, 2009).

Dessa forma, a estabilização química com cal constitui uma técnica de grande potencial, desde que sua aplicação seja precedida de estudos laboratoriais específicos. A heterogeneidade dos solos naturais impede a adoção de dosagens genéricas. A resposta ao tratamento varia conforme as características de cada material, o teor de cal deve ser definido, considerando os ganhos requeridos de capacidade de suporte, resistência à compressão e módulo de resiliência estabelecidos no projeto do pavimento (Dash; Hussain, 2012; DNIT, 2019).

2.3.1 Mecanismos das reações solo-cal

De acordo com a NLA (2004), as reações iniciam-se quase imediatamente após a cal ser adicionada na presença de água, o meio se torna mais alcalino, favorecendo reações, em curto prazo, com as partículas do solo. Essas reações iniciais promovem alterações físico-químicas importantes, como a troca catiônica, a

neutralização da acidez do solo e a adsorção nas superfícies dos argilominerais, conforme descrito pelo DNIT 419 (DNIT, 2019).

Após a incorporação da cal ao solo, os íons cálcio interagem com a superfície das partículas argilosas, substituindo outros íons presentes em sua superfície. Esse processo promove a redução da camada de água adsorvida e das forças de repulsão eletrostática entre as partículas, favorecendo sua aproximação e, consequentemente, a floculação e a aglomeração (Araújo, 2009). Como resultado, a estrutura do solo torna-se mais agregada e friável, apresentando características de comportamento granular que podem contribuir para a melhoria de suas propriedades geotécnicas, observa-se, em geral, redução da plasticidade, melhoria da trabalhabilidade e alteração dos parâmetros de compactação. Esses efeitos costumam resultar no aumento da umidade ótima e na redução da massa específica aparente seca máxima, embora sua intensidade possa variar conforme a granulometria, a mineralogia do solo, o teor de argila e a quantidade de cal utilizada (Bell, 1996; Manzoor; Yousuf, 2020).

A estabilização propriamente dita ocorre posteriormente, quando o meio mantém pH suficientemente elevado para solubilizar silicatos e aluminatos presentes na matriz argilosa e, em alguns casos, nas frações finas do solo. Esses compostos solubilizados reagem com o cálcio livre disponibilizado pela cal e com a água, formando produtos cimentantes, como silicatos de cálcio hidratados (CSH) e aluminatos de cálcio hidratados (CAH). A formação desses produtos promove a cimentação entre flocos e aglomerados de partículas, contribuindo para a ligação da matriz solo-cal e para o aumento da resistência mecânica ao longo do período de cura (Little; Nair, 2009).

Essa distinção explica por que algumas melhorias são percebidas imediatamente após a adição da cal, ao passo que outras dependem de dias ou semanas para se manifestarem de forma significativa. As reações pozolânicas são diretamente dependentes da manutenção de condições adequadas de umidade, alcalinidade e disponibilidade de cálcio (NLA, 2004). Por isso, o período de cura exerce influência significativa no desempenho final do solo estabilizado, de acordo com Bhattacharja, Bhatty e Todres (2003) quanto maior o tempo disponível para o desenvolvimento das reações, maior tende a ser a formação de compostos cimentantes, desde que exista cal suficiente e que o solo apresente minerais reativos capazes de participar do processo.

Em solos residuais tropicais, a interpretação dessas reações exige atenção, especialmente quando a dosagem é baseada apenas no critério de pH. O DNIT (2019) reconhece que, em determinados solos tropicais residuais ricos em oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, o pH de 12,4 pode não ser atingido devido ao consumo rápido do hidróxido de cálcio pelas reações pozolânicas e pelas reações de superfície. Esse comportamento evidencia que a resposta à cal não depende apenas do teor adicionado, mas também da composição mineralógica e da reatividade do solo, sendo necessária a realização de ensaios específicos para cada material, especialmente ensaios mecânicos que confirmem o ganho efetivo de resistência (Bhattacharja; Bhatty; Todres, 2003).

Outro processo que pode ocorrer em misturas solo-cal é a carbonatação, reação na qual a cal reage com o dióxido de carbono atmosférico, formando carbonato de cálcio. Esse processo é considerado indesejável para a estabilização, pois consome a cal que poderia participar das reações pozolânicas e favorece a formação de carbonato de cálcio em vez dos produtos cimentantes responsáveis pelo ganho de resistência, como o CSH e o CAH. Por esse motivo, o controle das etapas construtivas, especialmente quanto à sequência de execução e à redução da exposição prolongada da mistura ao ar e à chuva, é essencial para favorecer o desenvolvimento adequado dos mecanismos de estabilização do solo tratado com cal (Mallela; Von Quintus; Smith, 2004).

Portanto, os mecanismos das reações solo-cal envolvem uma sequência de processos interdependentes e a compreensão desses mecanismos é fundamental para interpretar o comportamento das misturas solo-cal e avaliar a influência do teor de aditivo e do período de cura sobre seu desempenho (DNIT, 2019; Dash; Hussain, 2012).

2.3.2 Fatores que influenciam a estabilização solo-cal

A eficiência da estabilização solo-cal depende das características mineralógicas e físico-químicas do solo, do teor de cal empregado e do período de cura, uma vez que esses fatores influenciam as reações, a formação de compostos cimentantes e, consequentemente, o desempenho mecânico da mistura (Dash; Hussain, 2012).

A mineralogia do solo exerce papel fundamental na resposta à cal, pois influencia diretamente a disponibilidade de sílica e alumina, a capacidade de troca catiônica e a reatividade das partículas argilosas (Diamond; White; Dolch, 1963). Segundo Little (1995), solos constituídos por argilominerais mais reativos tendem a apresentar reduções mais expressivas de plasticidade e variação volumétrica após a adição de cal, em razão dos processos de troca catiônica, floculação e aglomeração que promovem mudanças na estrutura e na textura do solo.

Em contrapartida, solos tropicais e lateríticos não devem ser avaliados apenas sob a perspectiva da correção da expansividade típica de argilas mais ativas, pois apresentam composição mineralógica e comportamento geotécnico particulares (Portelinha *et al*., 2012). Amadi e Okeiyi (2017) demonstraram que esses materiais também podem apresentar melhorias relevantes quando tratados com cal, especialmente quanto à trabalhabilidade, à rigidez, à resistência mecânica e à capacidade de suporte. Dessa forma, a resposta desses solos à estabilização está mais associada à modificação da estrutura do material, ao aumento da cimentação entre partículas e ao desenvolvimento de propriedades mecânicas favoráveis ao uso em camadas de pavimentos do que apenas à redução da variação volumétrica.

A granulometria e a fração fina do solo também exercem influência significativa no desempenho da estabilização. Little (1995) cita que a presença de partículas argilosas reativas é fundamental para o desenvolvimento das reações pozolânicas, solos com maior teor de finos e elevada plasticidade podem demandar maiores teores de cal para satisfazer as reações iniciais e possibilitar ganhos de resistência a longo prazo. Por outro lado, solos com fração granular significativa também podem apresentar melhoria quando possuem quantidade suficiente de material fino reativo, pois os produtos cimentantes formados favorecem a ligação entre partículas, a alteração da textura e o aumento da resistência da mistura (Portelinha *et al*., 2012).

O teor de cal é um dos fatores mais importantes para o desempenho das misturas solo-cal, pois deve ser suficiente para satisfazer as reações iniciais de troca catiônica e ainda disponibilizar cálcio e alcalinidade para o desenvolvimento das reações pozolânicas (Amadi; Okeiyi, 2017). Teores insuficientes podem resultar apenas na modificação do solo, sem garantir a estabilização efetiva e o ganho de resistência esperado, por outro lado, a adição de cal acima do teor ótimo pode não

produzir aumentos significativos de resistência, uma vez que, após determinado nível de dosagem, o acréscimo de cal tende a não melhorar o desempenho mecânico da mistura (Bhattacharja; Bhatty; Todres, 2003), além de elevar os custos da técnica.

Dessa forma, a definição do teor de cal pode ser realizada por meio de critérios físico-químicos, como o método baseado no pH de Eades e Grim, e complementada por ensaios mecânicos, especialmente de resistência à compressão simples, a fim de confirmar o ganho efetivo de desempenho da mistura (Little, 1995).

O teor de umidade interfere diretamente no comportamento das misturas solo-cal, uma vez que a presença de água favorece a troca catiônica, a elevação do pH e a solubilização da sílica e da alumina necessárias ao desenvolvimento das reações pozolânicas (Manzoor; Yousuf, 2020). De modo semelhante, Portelinha *et al*. (2012) destacam que os parâmetros de compactação também condicionam o desempenho mecânico do material estabilizado, pois a moldagem dos corpos de prova na umidade ótima e na massa específica seca máxima de cada mistura permite avaliar a resistência à compressão simples, o módulo tangente inicial, o ISC e o comportamento do material em aplicações rodoviárias.

O período de cura é determinante para o ganho progressivo de resistência, uma vez que as reações pozolânicas não ocorrem de forma instantânea. Com o avanço da cura, tende a ocorrer maior formação de produtos cimentantes, os quais contribuem para o desenvolvimento da resistência da mistura, desde que ainda existam condições favoráveis (Ahmadullah; Chrysochoou, 2024). Assim, amostras curadas por períodos mais longos tendem a apresentar maior rigidez em comparação às amostras avaliadas em idades iniciais, uma vez que o módulo resiliente de solos tratados com cal aumenta com o período de cura e passa a refletir o desenvolvimento das reações pozolânicas ao longo do tempo (Elkady; Al-Mahbashi; Al-Shamrani, 2015).

Além dos fatores laboratoriais, as condições de execução em campo também devem ser consideradas. Little (1995) reitera que os procedimentos executivos também influenciam diretamente o desempenho final do solo estabilizado com cal, a homogeneização da mistura, a eficiência da compactação, a uniformidade da distribuição da cal, o controle do teor de umidade e a proteção da camada durante o período de cura são aspectos fundamentais para que as reações ocorram

adequadamente e para que o material tratado desenvolva resistência e estabilidade compatíveis com sua aplicação em pavimentos.

Portanto, a análise dos mecanismos e dos fatores que influenciam a estabilização solo-cal evidencia que o desempenho da mistura não depende apenas da adição do estabilizante, mas da interação entre as características do solo, o teor de cal empregado, o estado de compactação e o período de cura (Dash; Hussain, 2012). Essa compreensão fundamenta a necessidade de avaliação experimental para cada material, especialmente em solos residuais lateríticos, cuja resposta à cal pode variar em função de sua mineralogia e reatividade (DNIT, 2019). Dessa forma, a metodologia apresentada a seguir busca verificar como diferentes teores de cal e períodos de cura influenciam a evolução da capacidade de suporte do solo estudado.

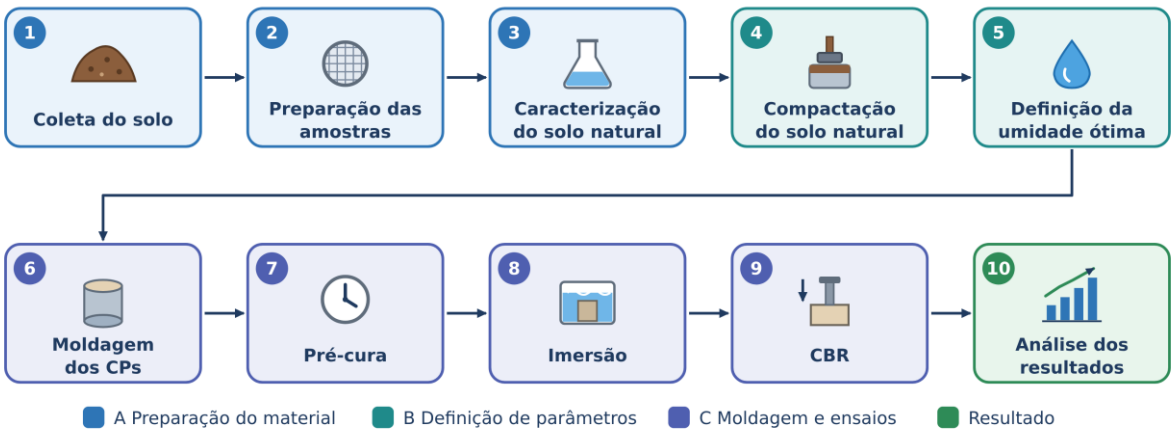
3 METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como um estudo experimental, de abordagem quantitativa, desenvolvido em laboratório com foco na análise do comportamento mecânico de um solo residual laterítico estabilizado quimicamente com cal.

Segundo Gil (2008), a pesquisa experimental consiste na determinação de um objeto de estudo, na seleção das variáveis capazes de influenciá-lo e na definição das formas de controle e observação dos efeitos produzidos. Nesse sentido, a abordagem quantitativa fundamenta-se na obtenção e comparação de resultados numéricos dos ensaios de caracterização física, compactação, expansão e ISC buscando avaliar a influência das duas variáveis principais, o teor de cal e o período de cura, sobre a capacidade de suporte do solo residual laterítico do CEEG-PG mantendo-se controladas as condições de moldagem definidas para o estudo.

Para padronizar, os procedimentos experimentais foram conduzidos conforme as normas técnicas aplicáveis da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), conforme fluxograma apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma do programa experimental adotado



Fonte: A autora (2026).

3.1 MATERIAIS

Para a realização deste estudo e a consequente caracterização das propriedades mecânicas e físicas, a seleção dos materiais fundamentou-se em

critérios de viabilidade técnica e relevância estrutural. Desse modo, o programa experimental utilizou como componentes essenciais o solo, a cal hidratada (empregada como agente estabilizante e aglomerante) e a água, elemento indispensável para os processos de hidratação e compactação da mistura. A combinação desses insumos visou avaliar o potencial de melhoria do comportamento geotécnico do solo trabalhado.

3.1.1 Solo

O solo utilizado é proveniente do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa. A classificação prévia do material como solo de comportamento laterítico, obtida por meio da metodologia MCT (Tonus *et al*., 2022), fundamenta a base teórica deste estudo**.** A partir dessa referência, a presente pesquisa concentrou-se na caracterização física do material coletado e na avaliação de seu comportamento mecânico e estrutural após a estabilização com cal.

A seleção do solo justifica-se por sua representatividade regional e pela relevância em avaliar seu comportamento mecânico e estrutural quando submetido à estabilização química com cal.

Para a execução do programa experimental, realizou-se a amostragem do material mediante a remoção prévia da camada superficial orgânica, isolando o horizonte de interesse geotécnico. Posteriormente, o solo foi transportado ao laboratório, onde passou pelas etapas de secagem ao ar livre, destorroamento e homogeneização destinadas aos ensaios subsequentes. Este material foi preparado conforme os procedimentos normativos aplicáveis aos ensaios de caracterização, compactação e Índice de Suporte Califórnia, de modo a assegurar a uniformidade das amostras utilizadas ao longo da pesquisa. A Figura 4 apresenta o solo residual laterítico utilizado na pesquisa.

Figura 4 - Solo residual laterítico utilizado na pesquisa



Fonte: A autora (2026).

O planejamento do consumo de material e o quantitativo estimado para a execução das etapas experimentais encontram-se detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantitativo de solo necessário para o programa experimental

Ensaio	Massa estimada de solo destorroado (gf)
Umidade	100
Massa específica	50
Granulometria	1.000
Limite de liquidez	200
Limite de plasticidade	200
Compactação	7.000
ISC	49.000
TOTAL	**57.550**

Fonte: A autora (2026).
Notas: Para a realização dos ensaios de ISC, foram utilizadas sete condições experimentais, sendo necessários 7 kg de solo para a moldagem de dois corpos de prova em cada condição. Dessa forma, a quantidade total de solo prevista foi de 49 kg, suficiente para a moldagem dos 14 corpos de prova.

3.1.2 Cal hidratada

O agente estabilizante utilizado na pesquisa foi a cal hidratada comercial especial do tipo CH-I, incorporada ao solo em diferentes teores, definidos em relação à massa seca do solo.

A escolha da cal hidratada justifica-se por sua ampla utilização em obras rodoviárias e por sua maior praticidade de manuseio, armazenamento e incorporação

ao solo em comparação à cal viva. O material foi armazenado em recipientes herméticos no laboratório, a fim de evitar a carbonatação prévia decorrente do contato com o dióxido de carbono (CO_2) presente no ambiente.

Os teores de cal adotados nesta pesquisa foram de 0%, 3% e 5%. O teor de 0% de aditivo correspondeu ao solo natural, estabelecida como referência (controle) para a comparação dos efeitos da estabilização química. Os teores de 3% e 5% foram selecionados por se enquadrarem em faixas usualmente investigadas na literatura para misturas solo-cal, permitindo avaliar o comportamento do material em uma condição intermediária e em uma condição superior de adição de estabilizante.

A delimitação desses teores encontra respaldo em estudos que empregam teores semelhantes para avaliar a resposta de solos tratados com cal. Little (1995) indica que, como a maioria dos solos exige entre 2% e 5% de cal, é recomendável estruturar investigações laboratoriais dentro deste intervalo representativo. Em estudos aplicados a solos lateríticos brasileiros, Portelinha *et al*. (2012) avaliaram teores de 1%, 2% e 3% de cal hidratada observando que baixos teores de estabilizante foram suficientes para alterar a trabalhabilidade e o comportamento mecânico do solo. De modo complementar, Amadi e Okeiyi (2017) investigaram a estabilização de solo laterítico com teores de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de cal, demonstrando a relevância do teor de 5% em análises comparativas de desempenho.

Desse modo, a matriz de teores adotada possibilita analisar a evolução da capacidade de suporte e do comportamento estrutural do solo residual laterítico em função do acréscimo de cal. A Figura 5, representa a cal hidratada utilizada na pesquisa.

Figura 5 – Cal hidratada utilizada



Fonte: A autora (2026).

3.1.3 Água

A água foi utilizada tanto na preparação prévia das amostras quanto na moldagem dos corpos de prova destinado aos ensaios de compactação e ISC. A umidade de referência do programa experimental foi definida a partir do ensaio de compactação do solo natural, conduzido na energia Proctor Normal, conforme as diretrizes da ABNT NBR 7182 (2016).

Para isso, subamostras de solo com diferentes teores de umidade foram compactadas para a obtenção de suas respectivas massas específicas aparentes secas. O teor de água correspondente ao ponto de máxima massa específica aparente seca da curva foi estabelecido como a umidade ótima do solo natural. Este valor fixo foi adotado como o parâmetro padrão para a moldagem do solo puro e das misturas com 3% e 5% de cal, estabelecendo uma condição comum de umidade inicial e a uniformidade comparativa entre todas as amostras ao longo da pesquisa.

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

O programa experimental foi conduzido no Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas mediante o emprego de equipamentos e instrumentações específicas, operados em estrita conformidade com as respectivas normas técnicas. Os principais componentes da infraestrutura laboratorial utilizada, bem como suas respectivas aplicações nas etapas de ensaio, encontram-se sintetizados no Quadro 1.

Quadro 1 – Equipamentos utilizados e respectivas aplicações

(continua)

Equipamento	Finalidade Experimental
Balanças de precisão	Pesagem de solo, aditivos, cápsulas e corpos de prova
Estufa	Secagem para a determinação do teor de umidade das amostras
Jogo de peneiras	Separação granulométrica das frações do solo
Aparelho de Casagrande	Determinação do Limite de Liquidez
Conjunto de limite de plasticidade	Determinação do Limite de Plasticidade
Picnômetro	Determinação da massa específica dos grãos
Cilindro e soquete Proctor	Compactação na energia Proctor Normal

Equipamento	Finalidade Experimental
Extensômetros	Monitoramento e leitura da expansão das amostras
Prensa automática ISC	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

Fonte: A autora (2026).

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi estruturado em quatro etapas principais: caracterização física do solo natural, ensaio de compactação, moldagem com avaliação mecânica dos corpos de prova (expansão e ISC) e análise estatística dos resultados.

O planejamento da pesquisa seguiu um delineamento baseado na combinação de fatores, composto por dois elementos independentes (teor de cal e período de cura) e duas respostas dependentes (Índice de Suporte Califórnia e expansão percentual). As variáveis fixas e de controle compreenderam o tipo de solo, a energia de compactação Proctor Normal, a umidade de moldagem de referência e o tempo de imersão de quatro dias. A síntese das variáveis e dos parâmetros que regem a pesquisa está detalhada no Quadro 2.

Quadro 2 - Matriz de variáveis e parâmetros

Tipo de Variável	Descrição	Parâmetros
Independentes	Teor de cal	0%; 3%; 5%
	Tempo de Cura	0, 7 e 28 dias antes da imersão
Fixas	Solo	Laterítico de Ponta Grossa/PR
	Umidade	Solo natural
	Energia de Compactação	Proctor Normal
	Período de imersão	96 horas
Dependentes	Resistência mecânica	Índice de suporte Califórnia (ISC)
	Expansibilidade	Porcentagem de expansão

Fonte: A autora (2026).

A condição controle, correspondente ao solo natural, foi ensaiada exclusivamente com 0 dias de pré-cura, servindo como linha de base comparativa. Essa abordagem fundamenta-se nos critérios estabelecidos por Sunkara, Rao e Rao (2015), os quais apontam que solos puros tropicais não manifestam evolução temporal espontânea de capacidade de suporte a longo prazo na ausência de agentes químicos ativos. Desse modo, os prazos de 7 e 28 dias de pré-cura foram reservados unicamente às misturas solo-cal para quantificar as reações promovidas pelo aditivo.

A combinação entre os teores de cal e os períodos de cura resultou no estabelecimento de sete condições experimentais distintas**.** Para cada condição, foram moldados dois corpos de prova independentes como repetições autênticas, totalizando 14 amostras compactadas para os ensaios de ISC e expansibilidade. O detalhamento das condições e o quantitativo de amostragem física executada estão sistematizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Distribuição dos corpos de prova

Condição	Período de Pré-cura (dias)	CP's
Solo Natural	0	2
Solo-cal 3%	0	2
Solo-cal 5%	0	2
Solo-cal 3%	7	2
Solo-cal 5%	7	2
Solo-cal 3%	28	2
Solo-cal 5%	28	2
Total		14

Fonte: A autora (2026).

Paralelamente à moldagem mecânica, realizou-se a caracterização física elementar do solo natural. Esta etapa envolveu a execução de análise granulométrica e a determinação dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), respeitando-se o número de pontos e as repetições analíticas preconizadas por suas respectivas normas técnicas.

Para o ensaio de compactação elaborou-se uma única curva para o solo natural, a umidade ótima gerada foi fixada como referência para a subsequente moldagem das misturas com 3% e 5% de cal. Paul *et al.* (2026) adotaram a umidade ótima do solo natural como referência para a preparação das misturas estabilizadas, buscando estabelecer condições comuns de moldagem para a comparação entre tratamentos. No presente trabalho, adotou-se a umidade ótima determinada para o solo natural como referência para a moldagem de todos os corpos de prova, mantendo-se constante a energia de compactação. Essa decisão foi estabelecida no planejamento experimental, com o objetivo de padronizar as condições de moldagem e permitir a comparação dos resultados de ISC entre os diferentes teores de cal e períodos de cura. Entretanto, ressalta-se que a adição de cal pode provocar alterações na estrutura do solo, decorrentes do processo de floculação e aglomeração das partículas, geralmente resultando no aumento da umidade ótima e na redução da massa específica aparente seca máxima. Dessa forma, os corpos de prova contendo

cal não foram necessariamente moldados em suas respectivas condições ótimas de compactação, aspecto que deve ser considerado na interpretação e comparação dos resultados obtidos.

A ordem de preparação das misturas de solo e de moldagem das amostras foi aleatória dentro de cada janela operacional. Após a compactação, os corpos de prova foram identificados e distribuídos ao acaso nos seus respectivos tempos de cura. Critérios rígidos de exclusão foram definidos: amostras só seriam descartadas em cenários de não conformidades operacionais formalmente registradas (erros de pesagem, umidades fora dos limites normativos ou danos físicos no manuseio).

Resultados discrepantes e isolados não foram omitidos do banco de dados na ausência de falhas procedimentais justificadas. Nos casos excepcionais de descarte técnico validado, uma nova réplica equivalente foi imediatamente confeccionada para manter o balanço da amostragem original.

3.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.4.1 Caracterização do solo natural

A caracterização do solo natural constituiu a primeira etapa do programa experimental, tendo como objetivo determinar as propriedades físicas e geotécnicas do material anterior à incorporação da cal. Essa etapa estabeleceu a condição de referência necessária para as análises comparativas com as misturas estabilizadas, servindo para descrever as propriedades do solo puro cujos resultados analíticos são detalhados posteriormente.

Inicialmente, o solo foi preparado conforme as diretrizes da ABNT NBR 6457 (2016), envolvendo os processos laboratoriais de secagem ao ar, destorroamento, homogeneização das porções necessárias para as amostras, conforme a Figura 6a, Figura 6b e Figura 6c respectivamente.

Figura 6 - Etapas de preparação do solo: (a) secagem ao ar, (b) destorroamento e (c) homogeneização



(a) (b) (c)

Fonte: A autora (2026).

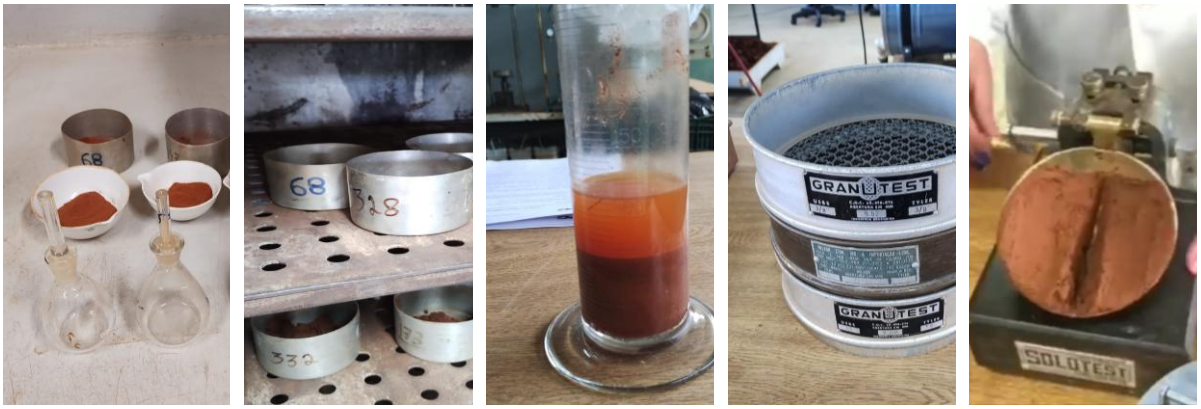
Na sequência, o programa laboratorial seguiu com os ensaios de caracterização, a massa específica dos sólidos foi determinada por picnometria, aplicando-se a correção para a temperatura do ensaio conforme o procedimento adotado. A umidade gravimétrica inicial foi obtida pela relação direta entre a massa de água e a massa de solo seco.

Para a análise granulométrica foi realizada conforme a ABNT NBR 7181 (2016) por meio do método combinado de peneiramento e sedimentação, o que permitiu quantificar a distribuição das partículas e os percentuais de frações grossas e finas presentes no material. Esses dados são fundamentais, visto que a fração argila é a principal responsável pelas reações químicas com o estabilizante (Diamond; Kinter, 1965).

Os limites de liquidez e de plasticidade foram determinados segundo os procedimentos correspondentes às normas ABNT NBR 6459 (2016) e ABNT NBR 7180 (2016), respectivamente. A partir desses resultados, calculou-se o Índice de Plasticidade pela diferença entre os dois limites, parâmetro utilizado na avaliação do comportamento do solo e na sua classificação geotécnica.

Estas etapas podem ser vistas na Figura 7a, Figura 7b, Figura 7c, Figura 7d e Figura 7e respectivamente.

Figura 7 – Ensaios de caracterização (a) picnômetros; (b) ensaio de umidade; (c) sedimentação; (d) conjunto de peneiras; (e) limite de liquidez



(a) (b) (c) (d) (e)

Fonte: A autora (2026).

Por fim, executou-se o ensaio de compactação do solo natural, conforme a ABNT NBR 7182 (2016), utilizando a energia Proctor Normal com o propósito de estabelecer a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo natural. A energia aplicada correspondeu ao trabalho mecânico padronizado por unidade de volume de solo.

Para a execução, prepararam-se porções com diferentes teores de umidade, as quais foram compactadas em um cilindro metálico pequeno do tipo ISC, com volume de 997,11 cm³. O procedimento foi realizado em três camadas, aplicando-se vinte e seis golpes uniformemente distribuídos sob a superfície de cada camada, conforme a Figura 8a e Figura 8b. Registrou-se o peso de cada amostra compactada no molde para o cálculo da massa específica úmida e, subsequentemente, da massa específica aparente seca.

Figura 8 - Conjunto de compactação: (a) molde e acessórios; (b) aplicação dos golpes molde



(a)



(b)

Fonte: A autora (2026).

Este ensaio permitiu obter a curva de compactação do solo natural, determinando graficamente a umidade ótima, correspondente ao ponto máximo da curva e a massa específica aparente seca máxima. A curva obtida para o solo natural funcionou estritamente como a linha de base para definir a umidade de referência para a moldagem das misturas solo-cal subsequentes, não se devendo atribuir às misturas a mesma massa específica seca máxima do solo natural. O Quadro 3 sintetiza os ensaios previstos e realizados nesta etapa inicial de caracterização.

Quadro 3 – Procedimentos e referências normativas

Ensaio	Objetivo	Norma Técnica
Preparação da amostra	Preparar o solo para os ensaios laboratoriais	ABNT NBR 6457:2016
Análise granulométrica	Determinar a distribuição das partículas do solo e a porcentagem de frações grossas e finas	ABNT NBR 7181:2016
Limite de liquidez	Determinar o teor de umidade correspondente à transição entre os estados plástico e líquido	ABNT NBR 6459:2016
Limite de plasticidade	Determinar o teor de umidade correspondente à transição entre os estados semissólido e plástico	ABNT NBR 7180:2016

Índice de plasticidade	Avaliar a faixa de umidade em que o solo apresenta comportamento plástico	Calculado a partir de LL e LP
Ensaio de compactação Proctor Normal	Determinar a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima do solo natural	ABNT NBR 7182:2016

Fonte: A autora (2026).

3.4.2 Preparação das misturas e moldagem

Após a caracterização do solo natural, realizou-se o ensaio de Índice de Suporte Califórnia, seguindo os preceitos da ABNT NBR 9895 (2016). Nesta etapa, foram avaliados dois teores de cal hidratada, correspondentes a 3% e 5% definidos em relação à massa seca do solo, além da condição de referência com 0% de cal, representada pelo solo natural. A adoção desses teores permite avaliar o comportamento do solo em uma condição intermediária e em uma condição superior de adição de estabilizante, possibilitando verificar se o ganho de capacidade de suporte ocorreu de forma progressiva ou se tendeu à estabilização a partir de determinado teor.

Para cada teor de cal, o solo foi inicialmente misturado ao estabilizante em condição seca, buscando garantir a distribuição uniforme da cal na massa de solo antes da hidratação. Em seguida, adicionou-se água gradualmente, sob constante homogeneização, até atingir a umidade de referência, correspondente à umidade ótima determinada no ensaio de compactação do solo natural, conforme pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Homogeneização da mistura solo-cal em condição seca



Fonte: A autora (2026).

Imediatamente após a homogeneização úmida, as misturas foram transferidas para os moldes cilíndricos de ISC. O processo de compactação seguiu rigorosamente a energia Proctor Normal padronizada. Cada corpo de prova (Figura 10) foi devidamente identificado de acordo com o teor de estabilizante incorporado e o respectivo período de pré-cura programado. Durante esta etapa, registraram-se a massa e as dimensões geométricas de cada amostra em fichas individuais de controle para o cálculo posterior dos parâmetros físicos de moldagem.

Figura 10 – Corpo de prova após moldagem no cilindro de ISC



Fonte: A autora (2026).

3.4.3 Períodos e condições de pré-cura

Neste trabalho, o termo "pré-cura" designou o intervalo cronológico compreendido entre o término da moldagem e compactação do corpo de prova e o início de seu processo de imersão em água. O delineamento experimental contemplou a moldagem de dois corpos de prova para cada combinação entre teor de cal (3% e 5%) e tempo de cura, avaliando-se três períodos distintos: 0, 7 e 28 dias.

A condição de 0 dias correspondeu às amostras submetidas à imersão imediata, sem período de armazenamento prévio, servindo para avaliar o efeito modificador da cal. Para os períodos de 7 e 28 dias, as misturas foram armazenadas previamente com o objetivo de favorecer o desenvolvimento das reações pozolânicas de longo prazo e verificar se o ganho de capacidade de suporte ocorreu de forma progressiva ao longo do tempo.

Durante os respectivos intervalos de cura, os corpos de prova permaneceram acondicionados hermeticamente fechados em ambiente laboratorial. Esse procedimento foi adotado com a finalidade de mitigar a perda de umidade por evaporação e reduzir a exposição direta ao ar evitando ao máximo a carbonatação prematura da cal.

3.4.4 Ensaio de expansão e ISC

Após o encerramento do período de pré-cura correspondente, os corpos de prova foram submetidos ao processo de imersão contínua em água por um intervalo de 96 horas, atendendo às especificações de saturação normativas. Durante esse período, realizaram-se leituras periódicas por meio de extensômetros acoplados aos moldes, permitindo o monitoramento da estabilidade dimensional do material. Os resultados de expansão foram calculados a partir da variação da leitura do dispositivo de medição, conforme Figura 11a e Figura 11b.

Figura 11 - Montagem e acompanhamento da expansão durante a imersão



(a)



(b)

Fonte: A autora (2026).

Encerrada a etapa de 96 horas de imersão, os corpos de prova foram retirados do tanque, drenados e submetidos ao ensaio de penetração (Figura 12) em prensa automática Marshall/ISC, configurada para o ensaio de ISC. Durante o procedimento, o equipamento registrou automaticamente os valores de carga aplicada e de penetração do pistão. Os registros obtidos serviram de base para a análise das curvas de carga versus penetração e para a determinação do Índice de Suporte Califórnia de cada corpo de prova, conforme os critérios da norma técnica adotada.

Figura 12 - Prensa automática Marshall/ISC utilizada no ensaio de penetração



Fonte: A autora (2026).

3.4.5 Análise dos dados

Os resultados obtidos no programa experimental foram organizados de forma sistemática por meio de tabelas e gráficos, visando facilitar a interpretação e a discussão das propriedades avaliadas.

Para a caracterização física do solo natural, sintetizaram-se os valores obtidos em cada determinação laboratorial juntamente com os respectivos valores representativos calculados. No que tange ao ensaio de compactação, os dados contemplaram os teores de umidade, as massas específicas aparentes secas e o traçado definitivo da curva de compactação do solo puro.

Para os ensaios de expansão e ISC, os resultados foram apresentados individualmente para cada corpo de prova moldado, sendo acompanhados pelo cálculo da média aritmética correspondente a cada condição experimental específica, permitindo explicitar os dados individuas e sua dispersão.

A análise dos dados foi conduzida de forma predominantemente descritiva, considerando o número de corpos de prova ensaiados por condição. A avaliação comparativa compreendeu a análise das divergências comportamentais entre o solo natural (referência) e as misturas aditivadas com 3% e 5% de cal, bem como o impacto das variações observadas ao longo dos períodos de pré-cura de 0, 7 e 28 dias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta etapa da pesquisa apresenta os resultados da caracterização e do ensaio de compactação do solo natural, como também a avaliação de capacidade de suporte e expansão das amostras. A análise dos resultados segue as etapas do programa experimental buscando compreender a influência da adição de cal e do período de cura sobre a capacidade de suporte e a expansão do solo residual laterítico de Ponta Grossa/PR, relacionando os resultados experimentais aos fundamentos teóricos e aos estudos apresentados nos capítulos anteriores.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NATURAL

A caracterização do solo natural teve como finalidade determinar os parâmetros físicos necessários à descrição do material utilizado na pesquisa. Foram avaliados a umidade gravimétrica, o peso específico real dos grãos, a distribuição granulométrica e os limites de consistência. Esses parâmetros fornecem subsídios para a interpretação dos resultados dos ensaios de compactação, capacidade de suporte e expansão.

4.1.1 Umidade gravimétrica

A umidade gravimétrica do solo foi determinada pelo método da estufa a partir de três determinações, considerando a relação entre a massa de água presente na amostra e a massa de solo seco. A Tabela 3 apresenta os resultados das determinações realizadas e a umidade média da amostra.

Tabela 3 - Umidade gravimétrica

Peso da Cáps. (gf)	Cáps. + s. úmido (gf)	Cáps. + s.seco (gf)	Solo seco (gf)	Massa de água (gf)	Teor de umidade (%)	Umidade Média (%)
14,32	44,34	43,26	28,94	1,08	3,73	3,59
16,58	47,45	46,38	29,8	1,07	3,59	
18,46	50,19	49,13	30,67	1,06	3,46	

Fonte: A autora (2026).

Os teores de umidade obtidos variaram de 3,46% a 3,73%, resultando em uma umidade gravimétrica média de 3,59%. O valor obtido representa a umidade da amostra submetida ao ensaio, após o período de secagem ao ar e ao destorroamento.

4.1.2 Peso específico real dos grãos

A densidade relativa dos grãos do solo foi determinada por meio do ensaio com picnômetro. Para expressar os resultados em relação à água a 20 °C, os valores obtidos foram multiplicados pelo fator de correção de temperatura (k_{20}). Esse fator corresponde à razão entre a massa específica da água na temperatura do ensaio e a massa específica da água a 20 °C, cujos valores encontram-se tabelados na norma DNER-ME 093/94 (1994).

O peso específico real dos grãos foi calculado pelo produto entre a densidade relativa corrigida e pelo fator de correção. A Tabela 4 apresenta os valores individuais obtidos nas determinações e a média dos resultados.

Tabela 4 - Peso específico real dos grãos

P1 (gf)	**P2 (gf)**	**P3 (gf)**	**P4 (gf)**	**T (ºC)**	**k_{20}**	**γs (gf/cm³)**
24,4	35,3	82,58	75,91	19	1,0002	2,577
36,75	47,7	98,7	92,01	19	1,0002	2,571
Peso específico médio real dos grãos (gf / cm³)						2,574

Fonte: A autora (2026).
Nota: P1 = picnômetro vazio e seco; P2 = picnômetro com solo; P3 = picnômetro, solo e água; P4 = picnômetro com água; γs = Peso específico real dos grãos a 20ºC

Os resultados individuais apresentaram valores próximos, com diferença de aproximadamente 0,0064 entre as determinações, essa diferença é inferior ao limite de 0,009 estabelecido pela norma demonstrando concordância entre os resultados obtidos. O valor médio informado foi de 2,574 esse parâmetro contribui para a caracterização física do solo e deve ser interpretado em conjunto com a distribuição granulométrica, os limites de consistência e os resultados de compactação.

4.1.3 Análise granulométrica

A análise granulométrica permitiu determinar a distribuição dos tamanhos das partículas do solo natural. As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam, respectivamente, os resultados do peneiramento grosso, da sedimentação e do peneiramento fino.

Para os cálculos da análise granulométrica, utilizou-se uma amostra de 1.000 g de solo seco ao ar, com teor de umidade de 3,59%. A massa de material retido na peneira de abertura de 2,0 mm foi de 13,96 g. Após a correção da massa em função da umidade, a massa total seca considerada nos cálculos foi de 965,80 g. Esses dados serviram de base para a determinação dos percentuais retidos e passantes apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 5 - Peneiramento grosso

Peneiras		**Material retido (g)**	**Material retido acumulado (g)**	**% passante Qg**
ASTM	**(mm)**			
2"	50,0	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,0	0,00	0,00	100,00
1"	25,0	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	0,00	0,00	100,00
4	4,8	0,43	0,43	99,96
10	2,0	13,96	14,39	98,51

Fonte: A autora (2026).

Para o ensaio de sedimentação, utilizou-se uma porção de 70,00 g de solo, considerando-se a massa específica real dos grãos de 2,574 g/cm³. As leituras do densímetro foram ajustadas mediante a aplicação da correção c, definida em função da temperatura da suspensão em cada leitura. O coeficiente de viscosidade da água adotado nos cálculos foi de $8{,}737 \times 10^{-6}$ g·s/cm².

Também foram considerados os parâmetros de calibração do densímetro B = 14,27, C = 0,89 e I = 1,50, empregados na determinação da altura efetiva de queda das partículas. Essa altura foi utilizada, juntamente com o tempo de sedimentação, a viscosidade da água e a massa específica dos grãos, no cálculo dos diâmetros equivalentes das partículas.

Tabela 6 - Sedimentação

Tempo (s)	Leitura densímetro	T (ºC)	Rh (cm)	a'	a	c	Diâmetro (mm)	% passante Qs
30	1,028000	21,00	4,18	12,205	11,46	0,00010	0,0618	66,99
60	1,027500	21,50	4,18	12,205	11,46	0,00020	0,0437	66,04
120	1,027000	22,00	4,4	12,425	11,68	0,00030	0,0312	65,08
240	1,027000	22,00	4,4	12,425	11,68	0,00030	0,0220	65,08
480	1,026500	22,00	4,49	12,515	11,77	0,00030	0,0156	63,89
900	1,026300	22,00	4,526	12,551	11,80	0,00030	0,0114	63,42
1800	1,025900	21,00	4,605	12,63	11,88	0,00010	0,0081	61,99
3600	1,025300	21,00	4,755	12,78	12,03	0,00010	0,0058	60,55
7200	1,025100	21,00	4,805	12,83	12,08	0,00010	0,0041	60,08
14.400	1,024500	21,00	4,915	12,94	12,19	0,00010	0,0029	58,65
28.800	1,024200	20,00	4,966	12,991	12,24	0,00000	0,0021	57,69
86.400	1,023000	20,00	5,11	13,135	12,39	0,00000	0,0012	54,83

Fonte: A autora (2026).

O peneiramento fino complementou a análise granulométrica por meio da determinação das massas retidas nas peneiras de menores aberturas. A tabela a seguir apresenta os resultados obtidos nessa etapa.

Tabela 7 – Peneiramento fino

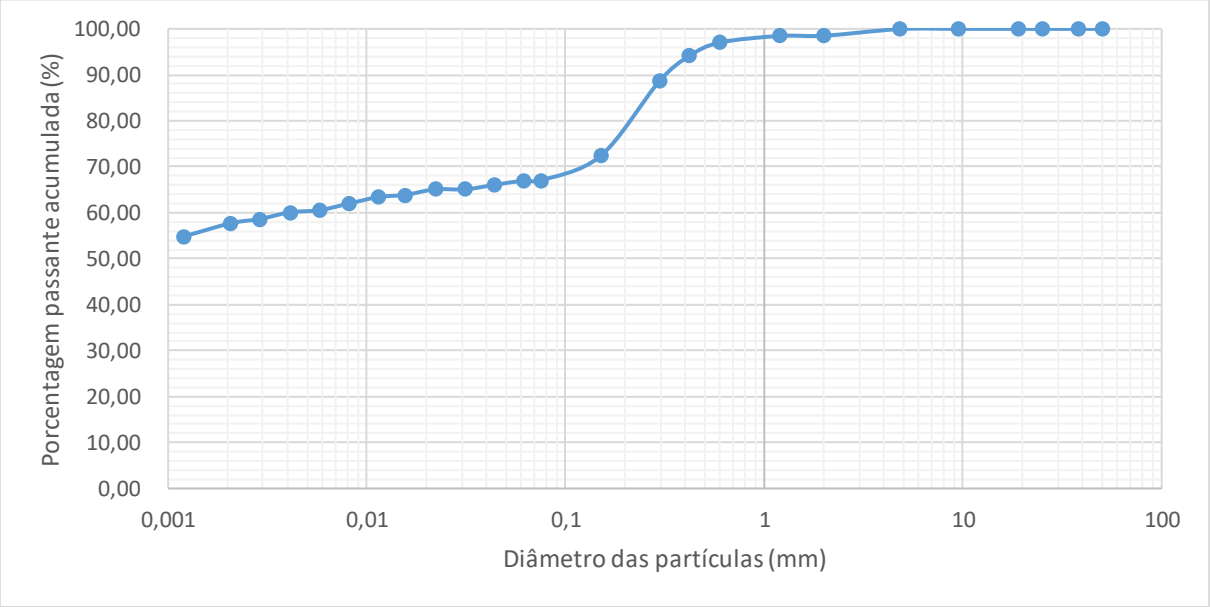
Peneiras		Material retido (g)	Material retido acumulado (g)	% passante Qf
ASTM	(mm)			
16	1,200	0,03	0,03	98,47
30	0,600	0,98	1,01	97,04
40	0,420	2,00	3,01	94,12
50	0,297	3,74	6,75	88,67
100	0,150	11,21	17,96	72,33
200	0,075	3,63	21,59	67,04

Fonte: A autora (2026).

Após a realização dos ensaios de sedimentação e dos peneiramentos fino e grosso, os resultados foram integrados para a elaboração da curva granulométrica completa da amostra, o gráfico relaciona o diâmetro das partículas, em escala logarítmica, à porcentagem acumulada passante, apresentada no Gráfico 1.

A análise da curva permitiu identificar a distribuição dos tamanhos das partículas, evidenciando a predominância da fração argila, acompanhada das frações areia e silte, com pequena participação de pedregulho.

Gráfico 1 – Curva granulométrica



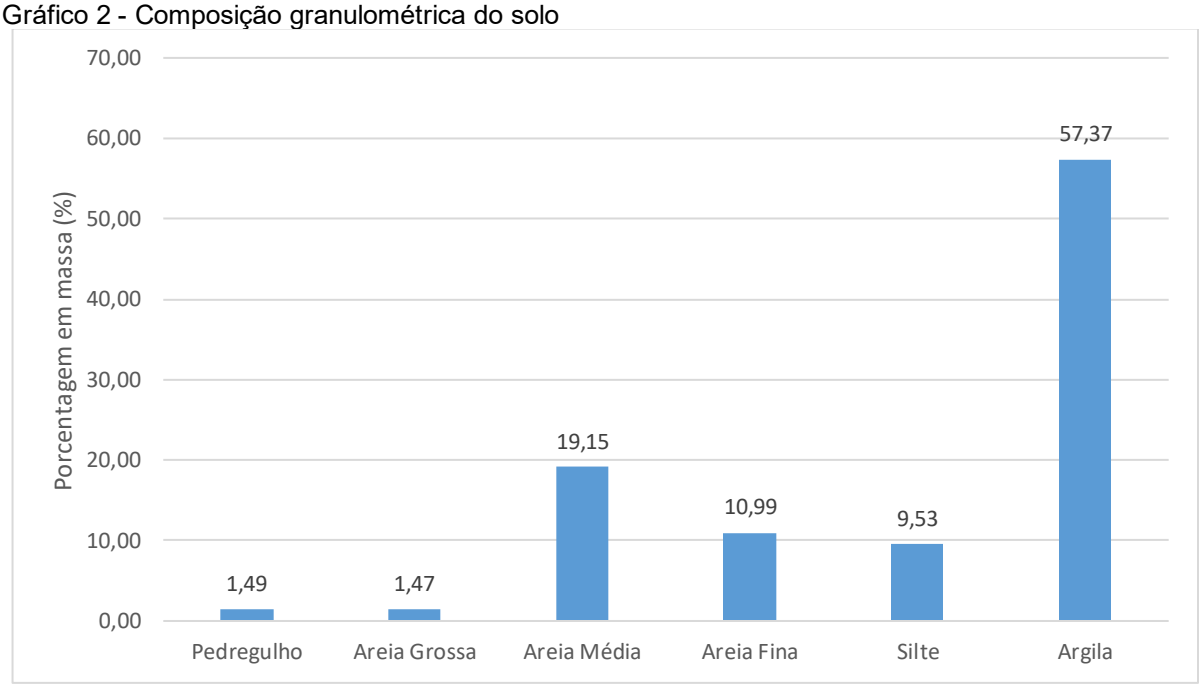
Fonte: A autora (2026).

Para a identificação das frações granulométricas, adotaram-se os limites de tamanho estabelecidos pela ABNT NBR 6502 (2022). O pedregulho compreende partículas entre 2,0 e 60,0 mm, enquanto a areia se subdivide em grossa, entre 0,60 e 2,0 mm; média, entre 0,20 e 0,60 mm; e fina, entre 0,06 e 0,20 mm. A fração silte corresponde às partículas entre 0,002 e 0,06 mm, e a fração argila compreende partículas menores que 0,002 mm (ABNT, 2022).

Os percentuais de cada fração foram estimados por interpolação do percentual passante em função do logaritmo do diâmetro, nos limites de 0,002; 0,06 e 0,20 mm. O gráfico 2 apresenta a distribuição percentual das frações na composição granulométrica do solo.

A amostra apresentou 57,37% de argila, 9,53% de silte, 10,99% de areia fina, 19,15% de areia média, 1,47% de areia grossa e 1,49% de pedregulho. As frações argila e silte totalizaram 66,9%, evidenciando a predominância de partículas menores que 0,06 mm. As frações arenosas corresponderam a 31,61% do material, com maior participação da areia média. Dessa forma, os resultados indicam uma composição predominantemente fina, com participação expressiva da fração arenosa e reduzida presença de pedregulho.

Gráfico 2 - Composição granulométrica do solo



Fonte: A autora (2026).

4.1.4 Limites de consistência

O limite de liquidez representa o teor de umidade que delimita a transição entre os estados plástico e líquido do solo (DNIT, 2006). O ensaio foi realizado com o aparelho de Casagrande, utilizando o solo homogeneizado com água em diferentes teores de umidade. Em cada determinação, o material foi colocado na concha do aparelho e dividido por uma ranhura central. Em seguida, registrou-se o número de golpes necessário para o fechamento da ranhura e retirou-se uma porção do solo dessa região para a determinação do teor de umidade, por meio das pesagens antes e após a secagem em estufa. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Limite de liquidez

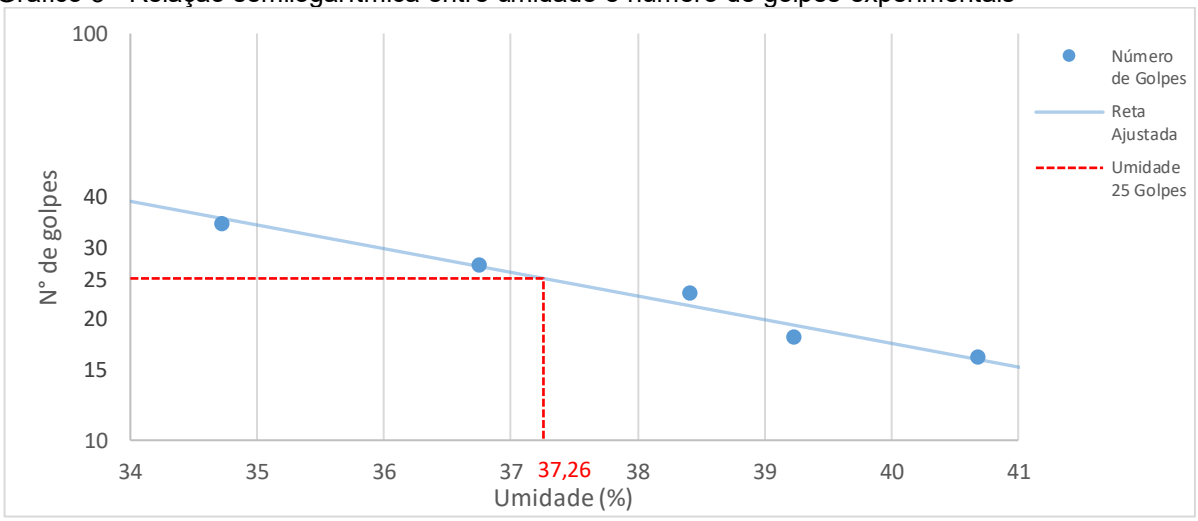
Peso cápsula (g)	17,35	18,31	14,88	16,58	14,38
Cápsula + solo úmido(g)	25,89	27,75	22,59	24,84	23,07
Cápsula + solo seco (g)	23,42	25,09	20,45	22,62	20,83
Umidade (%)	40,69	39,23	38,42	36,75	34,73
Número de golpes	16	18	23	27	34

Fonte: A autora (2026).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 8, foi elaborado um gráfico, relacionando o número de golpes, em escala logarítmica, aos respectivos teores de

umidade. Aos pontos experimentais foi ajustada uma reta, utilizada para determinar a umidade correspondente a 25 golpes. Esse valor, expresso em porcentagem aproximado para o número inteiro mais próximo, representa o limite de liquidez do solo. O Gráfico 3 apresenta a reta obtida e a identificação desse teor de umidade.

Gráfico 3 - Relação semilogarítmica entre umidade e número de golpes experimentais



Fonte: A autora (2026).
Nota: LL a 25 golpes ≈ 37,26%.

A leitura da reta apresentada no Gráfico 3, para o número de 25 golpes, indicou um limite de liquidez de aproximadamente 37%.

O limite de plasticidade (LP) corresponde ao menor teor de umidade em que o solo apresenta comportamento plástico, delimitando a transição para o estado semissólido. Para sua determinação o material foi moldado manualmente sobre uma placa de vidro, formando cilindros que apresentassem fragmentação ao atingir aproximadamente 3 mm de diâmetro. Os fragmentos foram recolhidos para a determinação do teor de umidade por meio das pesagens antes e após a secagem em estufa, foi realizada a média dos teores de umidade das determinações válidas (DNIT, 2006). Os resultados das determinações são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Limite de plasticidade

Peso da cápsula (gf)	Peso da cáps. + solo úmido (gf)	Peso da cáps. + solo seco (gf)	Peso da água (g)	Solo seco (g)	Teor de umidade (%)
18,75	20,76	20,25	0,51	1,5	34,00
14,97	17,91	17,16	0,75	2,19	34,25
14,89	17,97	17,18	0,79	2,29	34,50
				Limite de plasticidade médio (%)	34,25

Fonte: A autora (2026).

Os resultados apresentados na Tabela 9 indicaram um limite de plasticidade de aproximadamente 34%. Os resultados dos limites de consistência foram expressos em porcentagem e aproximados ao inteiro mais próximo, conforme as respectivas normas. A amplitude desse intervalo é quantificada pelo índice de plasticidade (IP), calculado pela diferença entre os dois limites, conforme a ABNT NBR 7180 (2016).

$$IP = 37 - 34 \rightarrow IP = 3\%$$

Segundo os descritores de plasticidade apresentados por Samtani e Nowatzki (2006, p. 4-25), valores de IP entre 1% e 10% correspondem à baixa plasticidade. Dessa forma, o resultado de 3% enquadra a amostra nessa faixa e evidencia que seu comportamento plástico se manifesta em um intervalo reduzido de umidade entre os limites de plasticidade e de liquidez.

A baixa plasticidade observada, apesar da predominância de partículas de dimensão argila, é compatível com a descrição apresentada pelo DNIT (2006, p. 24), segundo a qual determinados solos lateríticos podem apresentar textura fina e ser pouco ou nada ativos. Essa comparação auxilia a interpretação dos resultados, embora não constitua, isoladamente, comprovação do comportamento da amostra.

Quanto ao comportamento volumétrico, o IP é como um indicador preliminar de expansibilidade. Samtani e Nowatzki (2006, p. 5-66) indicam que, em geral, solos com IP inferior a 15% não apresentam comportamento expansivo. Com base nessa indicação, o IP de 3% obtido para o solo natural sugere, preliminarmente, reduzido potencial de expansão por umedecimento.

Os autores ressaltam, ainda, que a expansão depende de fatores como a quantidade e o tipo de argila, a umidade de compactação e a massa específica seca. Assim, no presente estudo, essa interpretação deve ser confrontada com os resultados de expansão medidos durante a imersão dos corpos de prova, considerando as condições de moldagem adotadas no programa experimental.

4.1.5 Classificação geotécnica do solo

A classificação geotécnica do solo natural foi realizada mediante a análise conjunta dos resultados da distribuição granulométrica e dos limites de consistência, considerando o SUCS e o sistema AASHTO.

No SUCS, o percentual de 67,04% passante na peneira nº 200 caracteriza a amostra como solo de granulação fina. Considerando o material inorgânico, os resultados de limite de liquidez (LL = 37%) e índice de plasticidade (IP = 3%) permitem seu enquadramento no grupo ML (silte de baixa plasticidade), uma vez que o limite de liquidez é inferior a 50% e o índice de plasticidade é inferior a 4% (Samtani; Nowatzki, 2006, p. 4-15).

Esse comportamento também foi observado por Tonus *et al*. (2022) na caracterização geotécnica do solo do Campo Experimental da UEPG, que identificaram a predominância de solos classificados como ML nas camadas superficiais investigadas.

Para o enquadramento no sistema AASHTO, determinou-se o índice de grupo (IG), considerando o percentual passante na peneira nº 200, o limite de liquidez e o índice de plasticidade, conforme a expressão apresentada pelo DNIT (2006, p. 37):

$$IG = 0{,}2a + 0{,}005ac + 0{,}01bd$$

Nota: Para o cálculo dos coeficientes, considera-se o percentual de material passante na peneira nº 200, de abertura de 0,075 mm, representado por F. A partir desse valor, determinam-se os coeficientes a = F − 35 e b = F − 15 são limitados ao intervalo de 0 a 40, enquanto c = LL − 40 e d = IP − 10 são limitados ao intervalo de 0 a 20. Na aplicação desses critérios, os resultados negativos são considerados nulos, e os valores superiores aos limites estabelecidos são substituídos pelos respectivos máximos.

Aplicando-se os critérios de cálculo aos dados da amostra, obtiveram-se a = 32,04; b = 40; c = 0 e d = 0.

$$\mathrm{IG} = 0{,}2 \times 32{,}04 \rightarrow IG = 6{,}408 \approx 6$$

Considerando o percentual de 67,04% passante na peneira nº 200, LL = 37% e IP = 3%, a amostra atende aos critérios de enquadramento no grupo A-4 do sistema AASHTO. Associando-se esse grupo ao IG calculado, igual a 6, a classificação do solo natural é expressa como A-4(6), conforme os critérios apresentados pelo DNIT (2006, p. 56).

O IG obtido foi determinado pela contribuição do percentual passante na peneira nº 200, uma vez que as parcelas envolvendo os coeficientes c e d foram nulas. Dessa forma, o resultado evidencia a influência da proporção de finos no índice, mesmo diante da baixa plasticidade da amostra.

Esse enquadramento fornece uma indicação preliminar para a avaliação rodoviária do material. A interpretação conjunta das classificações ML (solo com predominância de silte e baixa plasticidade) no SUCS, e A-4(6), no sistema AASHTO, é coerente com a predominância de partículas finas e a baixa plasticidade da amostra. Enquanto o SUCS agrupa os solos segundo suas características granulométricas e de plasticidade, o AASHTO orienta sua avaliação como materiais de subleito rodoviário (Samtani; Nowatzki, 2006, p. 4-14). Essa associação encontra respaldo nas inter-relações apresentadas pelo DNIT (2006, p. 74), que incluem ML entre as classificações mais prováveis para solos pertencentes ao grupo A-4.

Quanto à aplicação como subleito, os solos do grupo A-4 apresentam comportamento classificado de “sofrível a mau”, conforme a Tabela 4 do Manual de Pavimentação do DNIT (2006, p. 56). Esse enquadramento indica uma expectativa de desempenho menos favorável em comparação aos materiais granulares dos grupos mais bem avaliados. Portanto, a baixa plasticidade identificada pelo IP de 3% não assegura, isoladamente, capacidade de suporte adequada às solicitações do pavimento.

A interpretação dessas classificações deve considerar, ainda, suas limitações na representação dos solos tropicais. Segundo o DNIT (2006), diferenças de propriedades entre solos lateríticos não são adequadamente refletidas pelo gráfico de plasticidade ou pelos grupos das classificações tradicionais. Para o material estudado, os enquadramentos obtidos devem, portanto, ser complementados pelos resultados de compactação, ISC e expansão após imersão, permitindo avaliar sua capacidade de suporte e seu comportamento volumétrico nas condições experimentais adotadas.

4.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO NATURAL

O ensaio de compactação permitiu estabelecer a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo. A curva obtida possibilitou determinar a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima do solo natural, parâmetro utilizado como referência para a moldagem de corpos de prova (DNIT, 2006).

Para os cálculos do ensaio de compactação, consideraram-se o volume do molde, a massa do molde vazio e a massa da amostra de solo. Esses valores foram

utilizados como dados de referência para os cálculos e a elaboração dos resultados apresentados na Tabela 10.

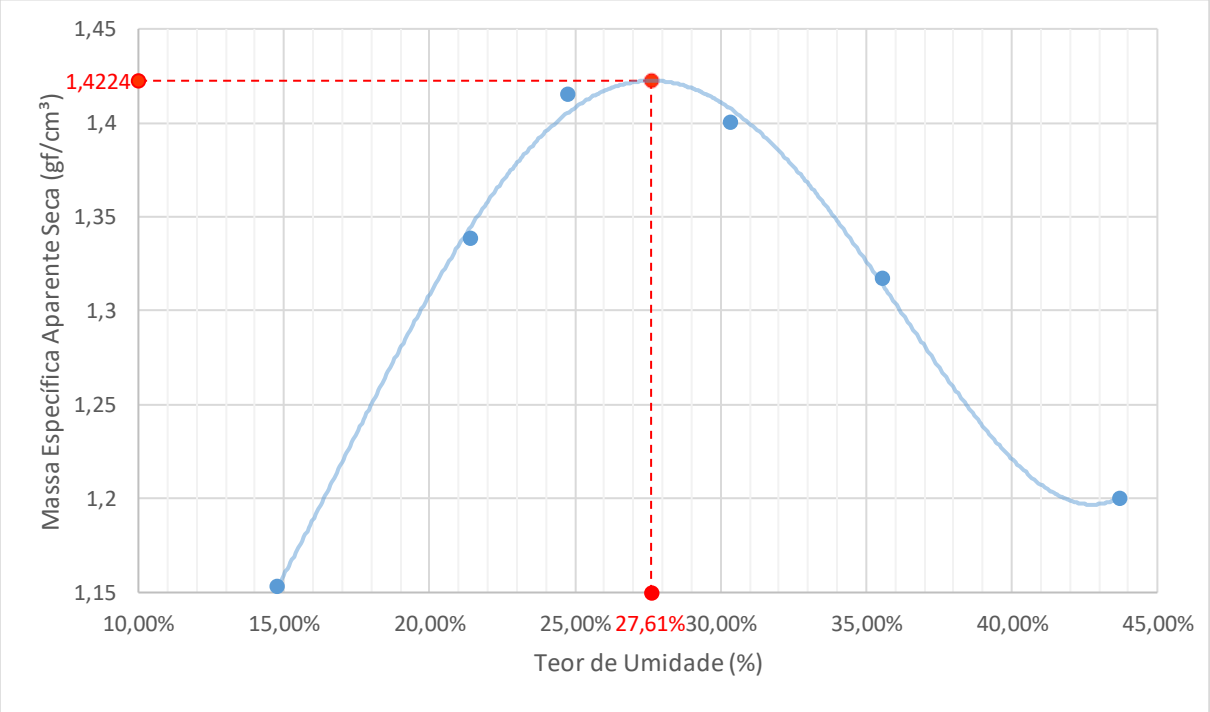
Tabela 10 - Pontos da curva de compactação do solo natural

Adição de água (L)	P1 (gf)	P2 (g)	γ (gf/cm³)	Teor de umidade (%)	Umidade Média (h) (%)	γd (gf/cm³)
0,5	6320	1320	1,32382586	15,58%	14,77%	1,153
				13,62%		
				15,12%		
0,2	6620	1620	1,62469537	21,49%	21,40%	1,338
				21,14%		
				21,58%		
0,2	6760	1760	1,76510114	24,59%	24,73%	1,415
				24,83%		
				24,76%		
0,1	6820	1820	1,82527504	30,57%	30,35%	1,400
				30,26%		
				30,22%		
0,2	6780	1780	1,78515911	36,48%	35,54%	1,317
				35,47%		
				34,68%		
0,4	6720	1720	1,72498521	44,77%	43,72%	1,200
				43,58%		
				42,80%		

Fonte: A autora (2026).
Nota: P1 = Peso amostra compactada + molde; P2 = Peso amostra compactada; γ = Peso específico solo úmido e γd = Peso específico aparente seco

A partir dos resultados apresentados na Tabela 10, foi elaborada a curva de compactação do solo natural, apresentada no Gráfico 4, relacionando o teor de umidade à massa específica aparente seca. Por meio dessa curva, determinou-se a umidade ótima, correspondente ao teor de água associado à máxima massa específica aparente seca para a energia Proctor Normal empregada. Esse ponto representa a condição de maior densificação alcançada pelo solo natural no ensaio.

Gráfico 4 - Curva de compactação



Fonte: A autora (2026).

A curva de compactação apresentada no Gráfico 4 indicou uma umidade ótima de aproximadamente 27,6%, associada à massa específica aparente seca máxima de 1,422 g/cm³. Esses valores foram estimados a partir do ponto máximo do ajuste e representam a condição de máxima densificação estimada para o solo natural sob a energia Proctor Normal empregada no ensaio.

A influência da umidade na compactação está relacionada ao rearranjo das partículas. Conforme o DNIT (2006), o acréscimo inicial de água favorece a trabalhabilidade do solo, permitindo alcançar maiores massas específicas aparentes secas. Acima da umidade ótima, o aumento do teor de água passa a ser acompanhado pela redução da massa específica aparente seca para a mesma energia de compactação, comportamento observado no ramo úmido da curva obtida.

Em pavimentação, a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima constituem referências para o controle da compactação. A execução adequada desse processo contribui para a estabilidade do material e para a redução de deformações e recalques associados às solicitações do tráfego (DNIT, 2006).

No presente estudo, a umidade de referência para a moldagem das condições com 0%, 3% e 5% de cal foi definida a partir desse gráfico de compactação do solo natural, conforme estabelecido na metodologia. A adoção dessa referência e da

mesma energia de compactação estabeleceu condições comuns de preparação dos corpos de prova. A interpretação dos resultados de ISC e expansão considera, também, as massas específicas aparentes secas efetivamente obtidas na moldagem, uma vez que os parâmetros determinados pela curva de compactação caracterizam especificamente o solo natural.

4.3 EXPANSÃO E ISC

4.3.1 Apresentação das condições de moldagem

A Tabela 11 apresenta os teores de umidade determinados na moldagem e as massas específicas aparentes secas obtidas para cada corpo de prova, organizados conforme o teor de cal e o período de pré-cura. Esses parâmetros auxiliam a interpretação dos resultados de expansão e ISC, considerando a adoção da mesma energia de compactação e da umidade de referência do solo natural.

Tabela 11 - Condições de moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios de expansão e ISC

Cal (%)	Pré-cura (dias)	Corpo de prova	Umidade na moldagem (%)	Massa específica aparente seca (g/cm³)
0	0	CP1	27,71%	1,427
		CP2	27,55%	1,438
3	0	CP1	26,25%	1,368
		CP2	26,77%	1,441
	7	CP1	25,59%	1,390
		CP2	25,96%	1,354
	28	CP1	26,99%	1,490
		CP2	26,66%	1,435
5	0	CP1	27,36%	1,435
		CP2	27,31%	1,421
	7	CP1	26,16%	1,332
		CP2	26,45%	1,338
	28	CP1	26,61%	1,245
		CP2	25,97%	1,382

Fonte: A autora (2026).

4.3.2 Expansão após imersão

A resposta dos corpos de prova ao umedecimento foi avaliada pela medição da variação de altura durante 96 horas de imersão em água. O acompanhamento foi realizado individualmente com extensômetro, cuja leitura foi ajustada para zero no início do ensaio. Dessa forma, a leitura final correspondeu ao deslocamento vertical acumulado em relação à condição inicial, expresso em milímetros. A expansão percentual foi calculada pela relação entre esse deslocamento e a altura inicial de cada corpo de prova, conforme a expressão apresentada na norma DNIT 172 (2016).

A Tabela 12 apresenta as alturas iniciais, os deslocamentos verticais registrados ao final da imersão e as expansões individuais dos dois corpos de prova de cada condição experimental, juntamente com a média e o desvio-padrão amostral das expansões.

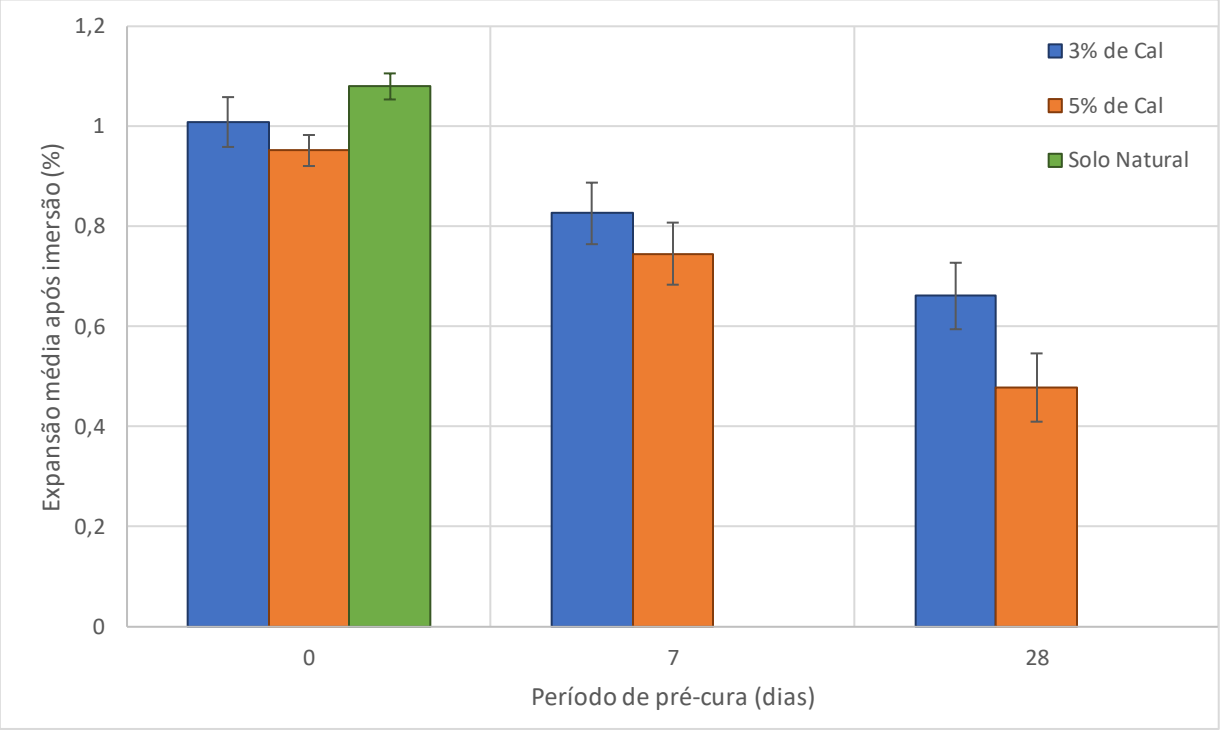
Tabela 12 - Deslocamento vertical e expansão dos corpos de prova após 96 horas de imersão

Cal (%)	**Pré-cura (dias)**	**h_0 CP1 (mm)**	**Δh CP1 (mm)**	**E CP1 (%)**	**h_0 CP2 (mm)**	**Δh CP2 (mm)**	**E CP2 (%)**	**Média das Expansões (%)**	**DP (p.p.)**
0	0	112	1,23	1,10	114	1,21	1,06	1,08	0,026
3	0	113	1,1	0,97	114	1,19	1,04	1,01	0,050
	7	115	0,9	0,78	115	1	0,87	0,83	0,061
	28	113	0,8	0,71	114	0,7	0,61	0,66	0,066
5	0	114	1,11	0,97	114	1,06	0,93	0,95	0,031
	7	114	0,8	0,70	114	0,9	0,79	0,75	0,062
	28	114	0,49	0,43	114	0,6	0,53	0,48	0,068

Fonte: A autora (2026).
Nota: h_0 = altura inicial do corpo de prova; Δh = deslocamento vertical após 96 horas de imersão; E = expansão; CP = corpo de prova; DP = desvio-padrão amostral; p.p. = pontos percentuais. As médias e os desvios-padrão foram calculados com as expansões sem arredondamento.

O Gráfico 5 apresenta a comparação entre as expansões médias das misturas com 3% e 5% de cal nos diferentes períodos de pré-cura, incluindo o solo natural como referência na condição de 0 dias.

Gráfico 5 - Expansão após 96 horas de imersão em função do período de pré-cura



Fonte: A autora (2026).

O solo natural apresentou expansão média de 1,08% após 96 horas de imersão. Nas misturas sem pré-cura, os valores médios foram de 1,01% para o teor de 3% de cal e de 0,95% para o teor de 5%, ambos inferiores à média do controle.

O aumento do período de pré-cura foi acompanhado pela redução das expansões médias nas duas misturas. Para o teor de 3% de cal, foram obtidos valores de 0,83% e 0,66% aos 7 e 28 dias, respectivamente. Para o teor de 5%, as médias correspondentes foram de 0,75% e 0,48%.

Em todos os períodos investigados, a mistura com 5% de cal apresentou menor expansão média que aquela com 3%. Aos 28 dias de pré-cura, as reduções relativas em relação à expansão média do solo natural foram de aproximadamente 38,8% para a mistura com 3% de cal e de 55,7% para aquela com 5%. Esses percentuais foram calculados com os valores anteriores ao arredondamento. Entre as condições avaliadas, a combinação de 5% de cal e 28 dias de pré-cura apresentou a menor expansão média.

Esse comportamento é compatível com os efeitos descritos na literatura para o tratamento de solos com cal. Christopher, Schwartz e Boudreau (2006) relatam que, em solos suscetíveis ao tratamento, as trocas catiônicas e a aglomeração das

partículas podem contribuir para a redução do potencial de expansão. Os autores também destacam a importância das condições de cura para o desenvolvimento das reações pozolânicas. Entretanto, os resultados de expansão, isoladamente, não permitem identificar os mecanismos responsáveis pelas diferenças observadas neste estudo.

Os desvios-padrão amostrais variaram entre 0,026 e 0,068 ponto percentual, caracterizando a dispersão entre as duas determinações de cada condição. A comparação entre as condições experimentais baseou-se nas médias e na variabilidade dos resultados obtidos para os dois corpos de prova de cada grupo.

Conforme apresentado na Tabela 11, as umidades determinadas na moldagem variaram entre 25,59% e 27,71%. Portanto, embora tenha sido adotada uma umidade de referência comum, foram verificadas diferenças entre os teores efetivamente obtidos. Essas diferenças, juntamente com as massas específicas aparentes secas de cada corpo de prova, devem ser consideradas na interpretação do comportamento expansivo. A avaliação do aproveitamento das misturas em pavimentação deve integrar os resultados de expansão à capacidade de suporte, analisada pelos valores de ISC apresentados na sequência.

4.3.3 ISC

A capacidade de suporte do solo natural e das misturas solo-cal foi avaliada pelo ensaio de Índice de Suporte Califórnia, realizado em prensa automática após as 96 horas de imersão em água. Nesse equipamento, o acionamento motorizado promove o deslocamento da base que sustenta o corpo de prova, mantido no molde, em direção a um pistão padronizado permitindo sua penetração de forma gradual e controlada (DNIT, 2016).

Durante o ensaio, foram registradas as forças aplicadas e as respectivas penetrações do pistão. As forças obtidas foram convertidas em pressão por meio da divisão pela área da seção transversal do pistão permitindo elaborar as curvas de pressão-penetração para cada corpo de prova.

Conforme a norma DNIT 172/2016-ME, quando necessária, a correção da origem consiste no traçado de uma tangente no ponto de inflexão do trecho inicial da curva, prolongada até interceptar o eixo das penetrações. Essa interseção define a nova origem, sendo a distância em relação à origem inicial representada por c. As

pressões corrigidas são obtidas na curva original nas posições correspondentes a 2,54 + c e 5,08 + c (DNIT, 2016).

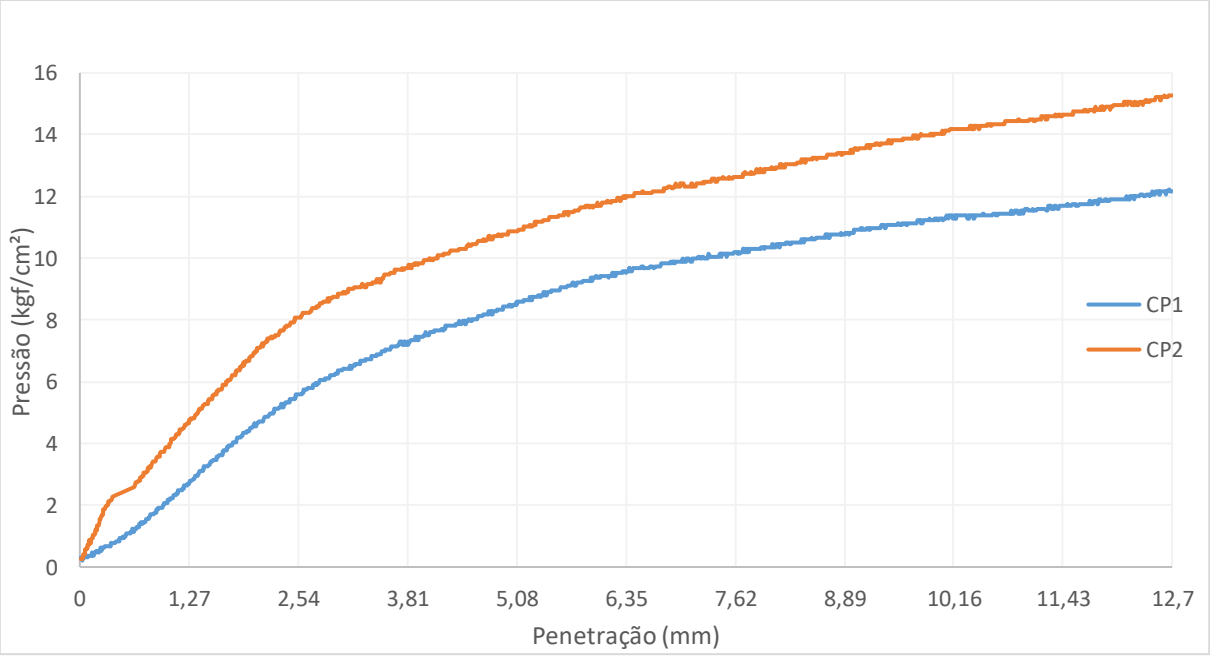
Nos casos em que se aplicaram a correção da origem, o deslocamento c foi estimado por regressão linear local, ajustada a trechos selecionados da porção inicial das curvas. Os valores estimados de c, as pressões, os índices individuais de ISC, as médias e os desvios-padrão amostrais foram calculados sem arredondamentos intermediários. O arredondamento foi aplicado somente na apresentação dos resultados nas tabelas.

Para cada corpo de prova, adotou-se o maior valor de ISC entre os calculados para as penetrações de referência de 2,54 e 5,08 mm. Os gráficos apresentam as curvas originais dos ensaios, enquanto as tabelas reúnem os parâmetros utilizados nos cálculos e os resultados individuais.

4.3.3.1 Solo natural

Inicialmente, são apresentados os resultados de ISC do solo natural, sem adição de cal e sem período de pré-cura. Os resultados dessa condição constituem a referência para a comparação da capacidade de suporte das misturas com 3% e 5% de cal nos diferentes períodos de pré-cura.

Gráfico 6 - Curvas pressão–penetração dos corpos de prova do solo natural



Fonte: A autora (2026).

A Tabela 13 apresenta os parâmetros utilizados na determinação do ISC do solo natural e os resultados individuais de cada corpo de prova. As pressões foram obtidas a partir dos registros experimentais, considerando o deslocamento estimado da origem, quando aplicável. Quando a penetração de interesse não coincidiu com uma leitura registrada, a pressão correspondente foi determinada por interpolação linear entre os pontos experimentais adjacentes.

Tabela 13 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo natural

Corpo de prova (CP)	c (mm)	Leitura p/ 2,54 (mm)	Pressão (kgf/cm²)	ISC 2,54 (%)	Leitura p/ 5,08 (mm)	Pressão (kgf/cm²)	ISC 5,08 (%)	ISC adotado (%)
CP1	0,182	2,722	5,901	8,39	5,262	8,706	8,26	8,39
CP2	0,000	2,540	8,075	11,48	5,080	10,870	10,31	11,48

Fonte: A autora (2026).

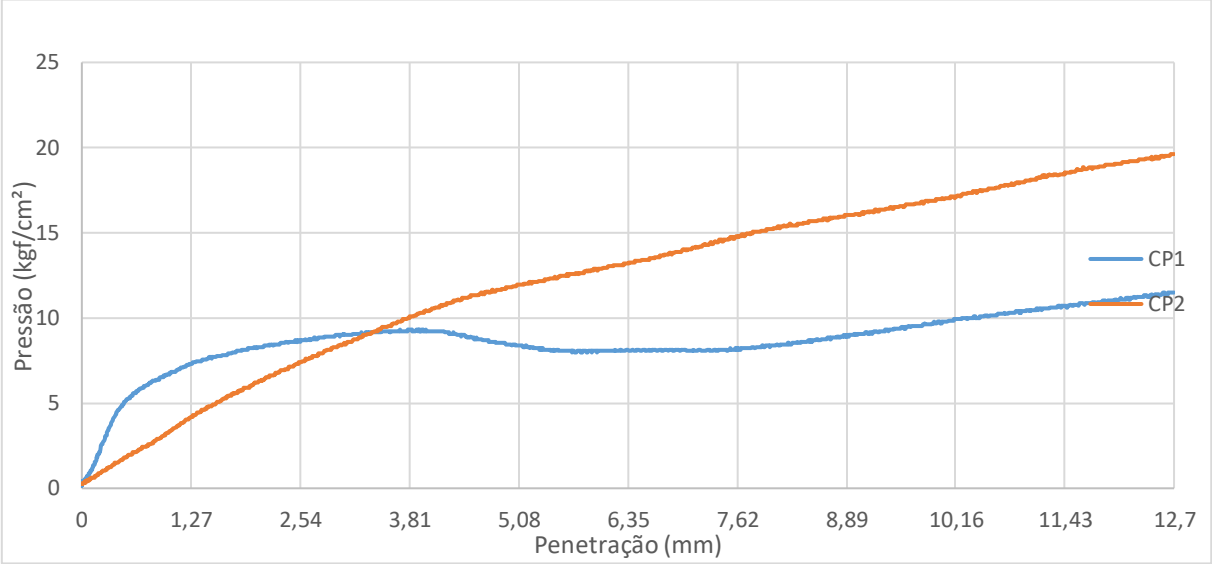
Os valores de ISC adotados para o solo natural foram de 8,39% para o CP1 e de 11,48% para o CP2, resultando em uma média de 9,94% e desvio-padrão amostral de 2,19 pontos percentuais. A diferença entre os resultados evidencia a variabilidade entre as duas determinações, que deve ser considerada na interpretação dos resultados. A média obtida constitui a referência para a comparação da capacidade de suporte das misturas com 3% e 5% de cal nos diferentes períodos de pré-cura.

4.3.3.2 Misturas com 3% de cal

A capacidade de suporte das misturas com 3% de cal foi avaliada para os períodos de 0, 7 e 28 dias de pré-cura, com dois corpos de prova por condição experimental. A comparação entre esses períodos permite examinar as diferenças na resposta à penetração das misturas submetidas à mesma energia de compactação e moldadas com a umidade de referência do solo natural.

Inicialmente, são apresentados os resultados da mistura com 3% de cal sem pré-cura (0 dias). O gráfico 7 apresenta as curvas originais dos corpos de prova CP1 e CP2.

Gráfico 7 – Curvas pressão-penetração da mistura com 3% de cal sem pré-cura



Fonte: A autora (2026).

Na sequência, a Tabela 14 reúne os parâmetros utilizados no cálculo e os valores individuais de ISC dessa condição.

Tabela 14 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo-cal 3% aos 0 dias

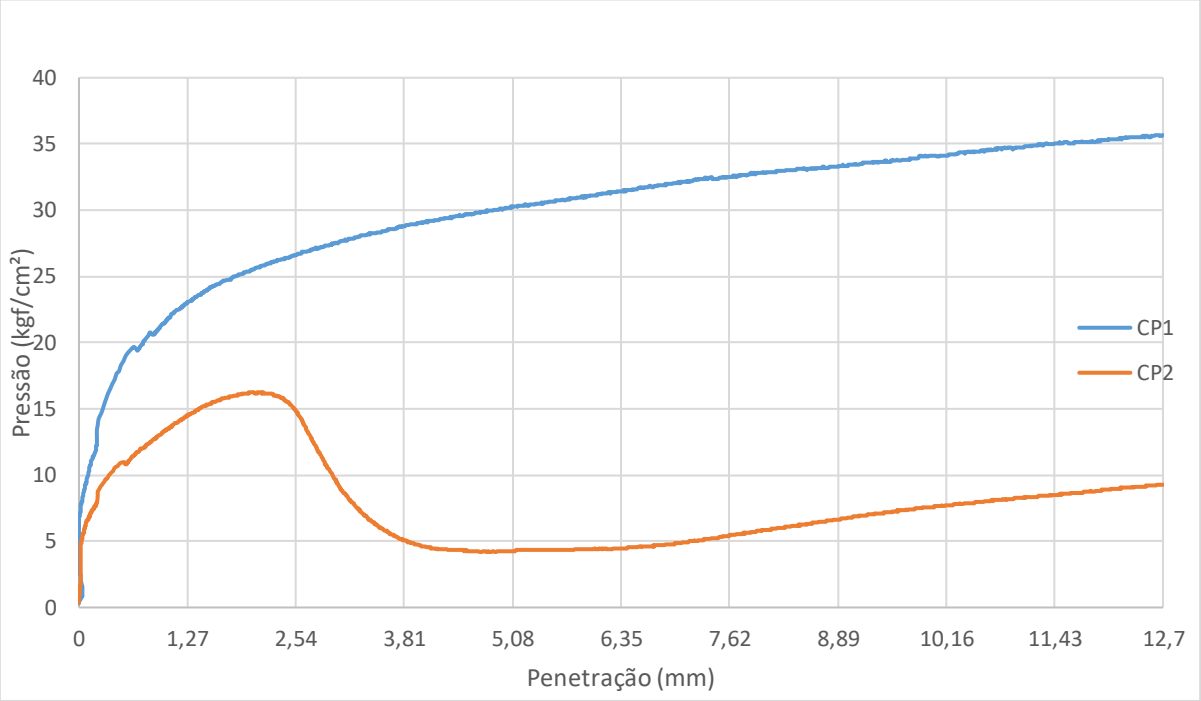
Corpo de prova	c (mm)	Leitura p/ 2,54 (mm)	Pressão 2,54 (kgf/cm²)	ISC 2,54 (%)	Leitura p/ 5,08 (mm)	Pressão 5,08 (kgf/cm²)	ISC 5,08 (%)	ISC adotado (%)
CP1	0,030	2,570	8,696	12,37	5,110	8,385	7,95	12,37
CP2	0,000	2,540	7,402	10,53	5,080	11,957	11,34	11,34

Fonte: A autora (2026).

Para a mistura com 3% de cal sem pré-cura, os valores de ISC adotados foram de 12,37% para o CP1 e de 11,34% para o CP2, resultando em uma média de 11,85% e desvio-padrão amostral de 0,73 ponto percentual. Os resultados individuais foram próximos, embora os índices adotados tenham correspondido a penetrações distintas: 2,54 mm para o CP1 e 5,08 mm para o CP2.

O gráfico 8 apresenta as curvas pressão–penetração originais dos dois corpos de prova da mistura com 3% de cal submetida a 7 dias de pré-cura.

Gráfico 8 - Curvas pressão-penetração da mistura com 3% de cal com 7 dias de pré-cura



Fonte: A autora (2026).

Os parâmetros de cálculo e os valores individuais de ISC são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo-cal 3% aos 7 dias

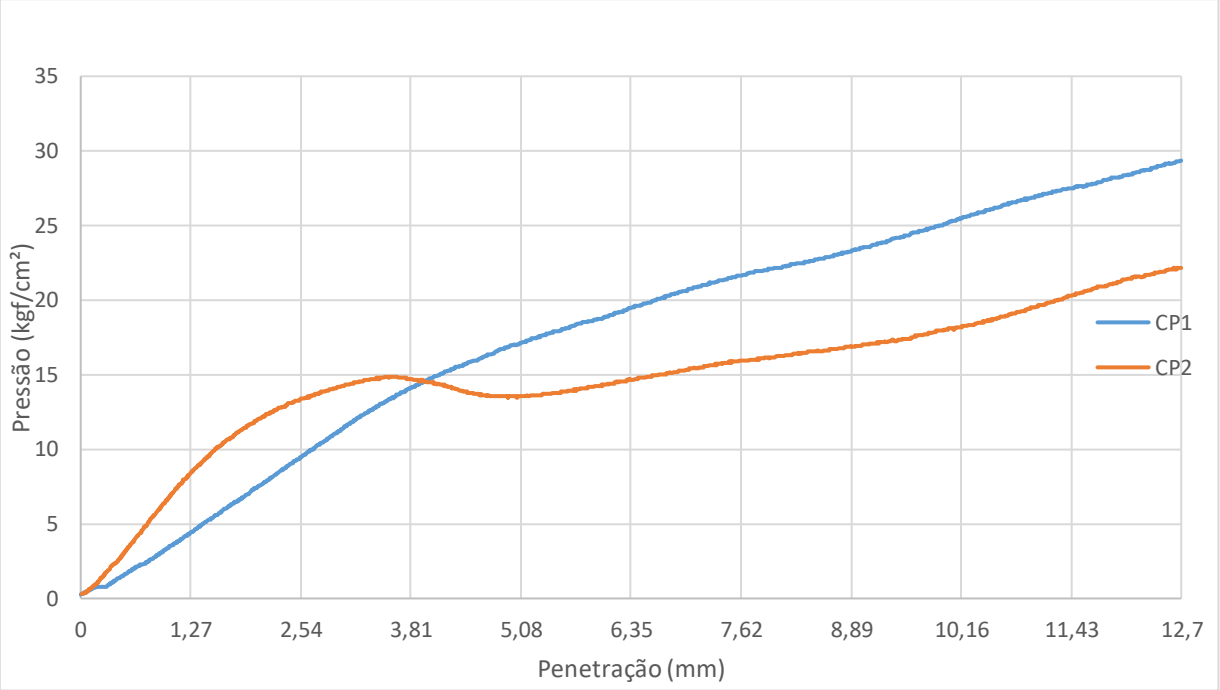
Corpo de prova	c (mm)	Leitura p/ 2,54 (mm)	Pressão 2,54 (kgf/cm²)	ISC 2,54 (%)	Leitura p/ 5,08 (mm)	Pressão 5,08 (kgf/cm²)	ISC 5,08 (%)	ISC adotado (%)
CP1	0,000	2,540	26,605	37,84	5,080	30,280	28,71	37,84
CP2	0,000	2,540	14,881	21,16	5,080	4,244	4,02	21,16

Fonte: A autora (2026).

Após 7 dias de pré-cura, a mistura com 3% de cal apresentou valores de ISC de 37,84% para o CP1 e de 21,16% para o CP2. A média foi de 29,50%, com desvio-padrão amostral de 11,79 pontos percentuais. A diferença acentuada entre as duas determinações evidencia a dispersão dos resultados nessa condição experimental, de modo que a média deve ser interpretada em conjunto com os valores individuais. Em ambos os corpos de prova, o ISC adotado correspondeu à penetração de 2,54 mm.

Para a mistura com 3% de cal e 28 dias de pré-cura, as curvas pressão–penetração originais do CP1 e do CP2 são apresentadas no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Curvas pressão-penetração da mistura com 3% de cal com 28 dias de pré-cura



Fonte: A autora (2026).

A Tabela 16 reúne os parâmetros utilizados na determinação do ISC e os resultados individuais dessa condição.

Tabela 16 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo-cal 3% aos 28 dias

Corpo de prova	c (mm)	Leitura p/ 2,54 (mm)	Pressão 2,54 (kgf/cm²)	ISC 2,54 (%)	Leitura p/ 5,08 (mm)	Pressão 5,08 (kgf/cm²)	ISC 5,08 (%)	ISC adotado (%)
CP1	0,187	2,727	10,248	14,58	5,267	17,487	16,58	16,58
CP2	0,080	2,620	13,508	19,21	5,160	13,561	12,86	19,21

Fonte: A autora (2026).

Para a mistura com 3% de cal submetida a 28 dias de pré-cura, os valores de ISC adotados foram de 16,58% para o CP1 e de 19,21% para o CP2, obtendo-se uma média de 17,90% e desvio-padrão amostral de 1,86 ponto percentual. No CP1, o índice adotado correspondeu à penetração de 5,08 mm, enquanto no CP2 prevaleceu

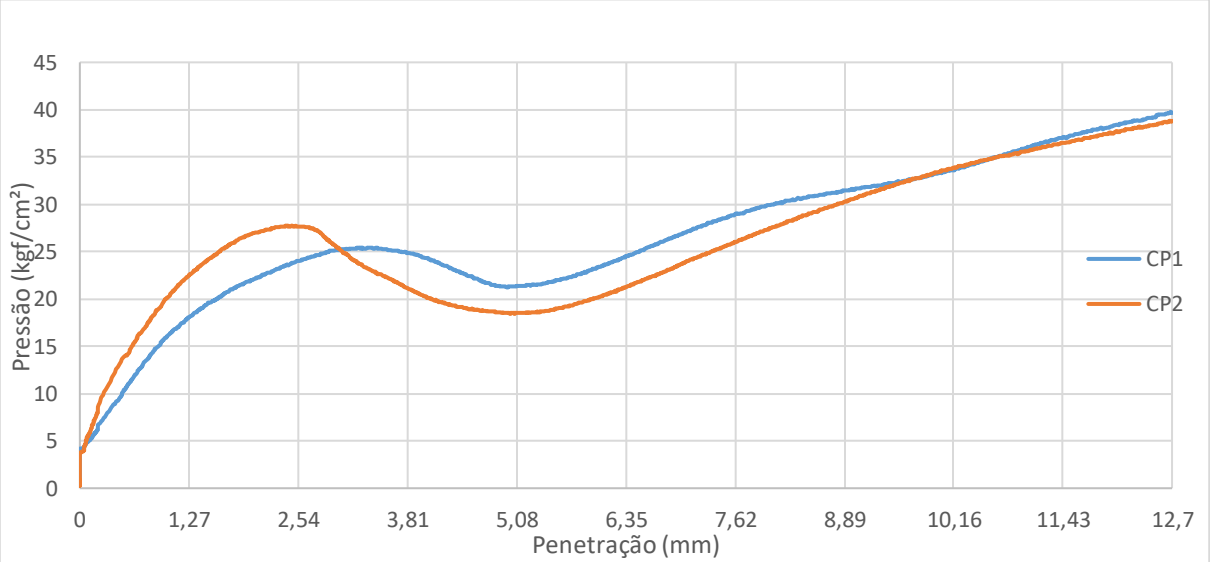
o valor determinado em 2,54 mm. Esses resultados mostram diferenças na resposta individual dos corpos de prova nas penetrações de referência.

4.3.3.3 Misturas com 5% de cal

A capacidade de suporte das misturas com 5% de cal também foi avaliada para os períodos de 0, 7 e 28 dias de pré-cura, com dois corpos de prova por condição experimental, o confronto desses períodos viabiliza a avaliação das variações na resistência à penetração das misturas.

Inicialmente, são apresentados os resultados da mistura com 5% de cal sem pré-cura. O gráfico 10 apresenta as curvas originais dos corpos de prova.

Gráfico 10 - Curvas pressão-penetração da mistura com 5% de cal sem pré-cura



Fonte: A autora (2026).

A Tabela 17 apresenta os parâmetros adotados nos cálculos, bem como os valores individuais de ISC obtidos para essa condição.

Tabela 17 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo-cal 5% sem pré-cura

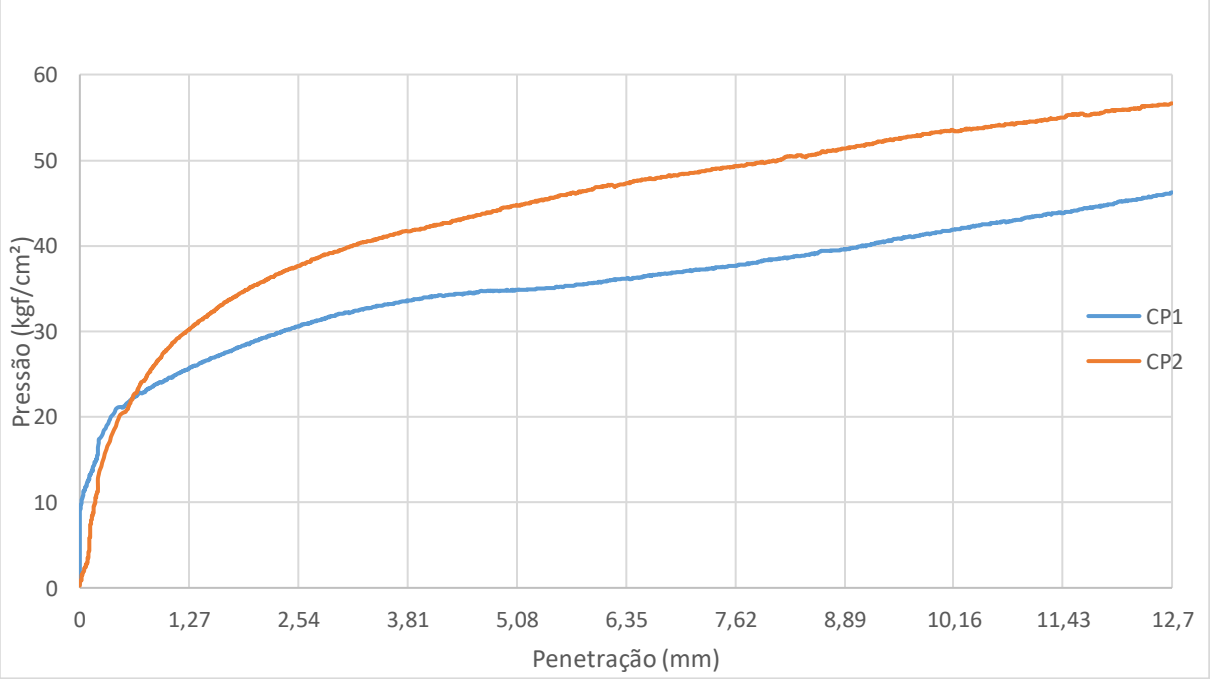
Corpo de prova	c (mm)	Leitura p/ 2,54 (mm)	Pressão 2,54 (kgf/cm²)	ISC 2,54 (%)	Leitura p/ 5,08 (mm)	Pressão 5,08 (kgf/cm²)	ISC 5,08 (%)	ISC adotado (%)
CP1	0,000	2,540	24,017	34,16	5,080	21,351	20,25	34,16
CP2	0,000	2,540	27,640	39,31	5,080	18,530	17,57	39,31

Fonte: A autora (2026).

A mistura com 5% de cal sem pré-cura apresentou valores de ISC de 34,16% para o CP1 e de 39,31% para o CP2, resultando em uma média de 36,73% e desvio-padrão amostral de 3,64 pontos percentuais. Os dois corpos de prova apresentaram os maiores índices na penetração de 2,54 mm. O resultado superior do CP2 e a dispersão entre as determinações caracterizam a variabilidade observada nessa condição de ensaio.

O gráfico 11 apresenta as curvas originais para os dois corpos de prova da mistura com 5% de cal, submetida a um período de 7 dias de pré-cura.

Gráfico 11 - Curvas pressão-penetração da mistura com 5% de cal com 7 dias de pré-cura



Fonte: A autora (2026).

Os parâmetros e valores individuais de ISC obtidos são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo-cal 5% aos 7 dias

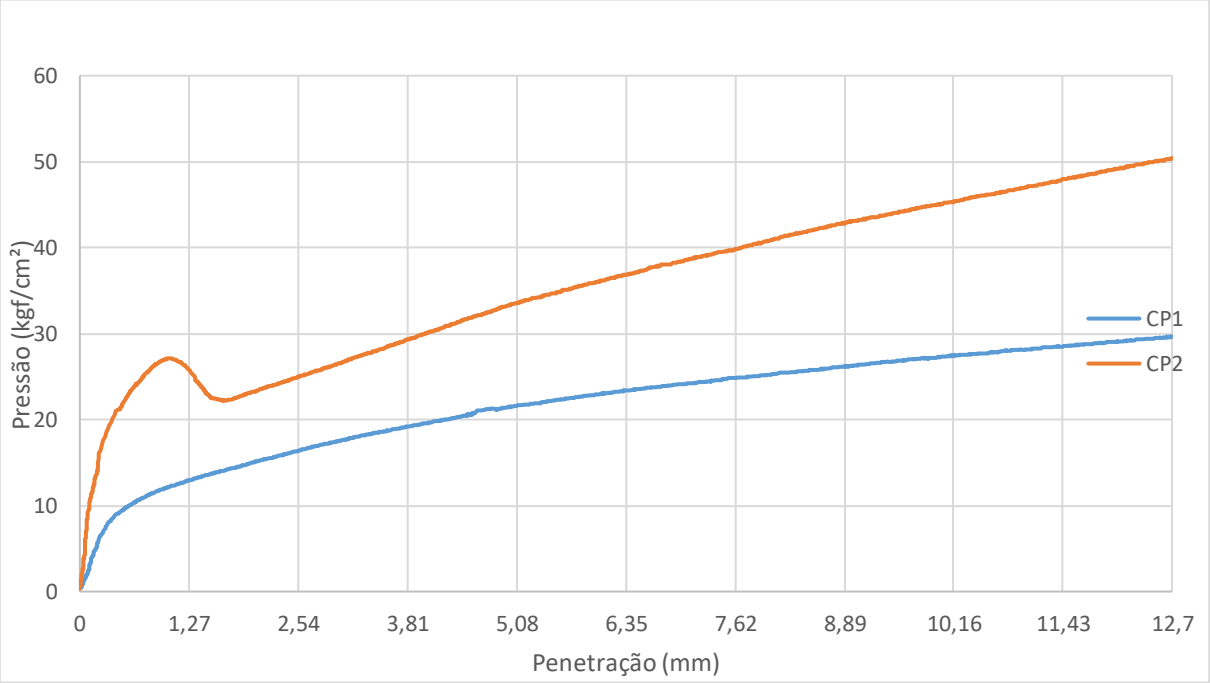
Corpo de prova	c (mm)	Leitura p/ 2,54 (mm)	Pressão 2,54 (kgf/cm²)	ISC 2,54 (%)	Leitura p/ 5,08 (mm)	Pressão 5,08 (kgf/cm²)	ISC 5,08 (%)	ISC adotado (%)
CP1	0,000	2,540	30,538	43,43	5,080	34,834	33,03	43,43
CP2	0,030	2,570	37,746	53,69	5,110	44,669	42,36	53,69

Fonte: A autora (2026).

Para a mistura com 5% de cal e 7 dias de pré-cura, foram obtidos valores de ISC de 43,43% para o CP1 e de 53,69% para o CP2. A média foi de 48,56%, com desvio-padrão amostral de 7,25 pontos percentuais. Em ambos os corpos de prova, o índice adotado correspondeu à penetração de 2,54 mm. A diferença entre os resultados individuais indica variabilidade na resistência à penetração dos corpos de prova preparados sob essa condição experimental.

Por fim, para a mistura com 5% de cal e 28 dias de pré-cura o Gráfico 12 apresenta as curvas de pressão-penetração.

Gráfico 12 - Curvas pressão-penetração da mistura com 5% de cal com 28 dias de pré-cura



Fonte: A autora (2026).

E na Tabela 19 constam os dados utilizados para essa condição na determinação do ISC.

Tabela 19 - Parâmetros e resultados da determinação do ISC do solo-cal 5% aos 28 dias

Corpo de prova	c (mm)	Leitura p/ 2,54 (mm)	Pressão 2,54 (kgf/cm²)	ISC 2,54 (%)	Leitura p/ 5,08 (mm)	Pressão 5,08 (kgf/cm²)	ISC 5,08 (%)	ISC adotado (%)
CP1	0,000	2,540	16,408	23,34	5,080	21,584	20,47	23,34
CP2	0,000	2,540	24,974	35,52	5,080	33,540	31,80	35,52

Fonte: A autora (2026).

Após 28 dias de pré-cura, a mistura com 5% de cal apresentou valores de ISC de 23,34% para o CP1 e de 35,52% para o CP2, com média de 29,43% e desvio-padrão amostral de 8,62 pontos percentuais. O CP2 apresentou pressões superiores às do CP1 nas duas penetrações de referência, resultando em maior ISC individual. A dispersão entre as duas determinações deve ser considerada na interpretação do valor médio obtido para essa condição.

4.3.3.4 Comparação do comportamento do solo natural e das misturas solo-cal

O solo natural, ensaiado sem pré-cura, foi adotado como referência para as misturas com 3% e 5% de cal, considerando os valores médios de ISC, os desvios-padrão amostrais e as expansões após 96 horas de imersão avaliando conjuntamente a capacidade de suporte e a resposta ao umedecimento das condições investigadas. A Tabela 20 reúne as informações obtidas para cada condição experimental.

Tabela 20 - Síntese dos resultados de ISC e expansão após 96 horas de imersão

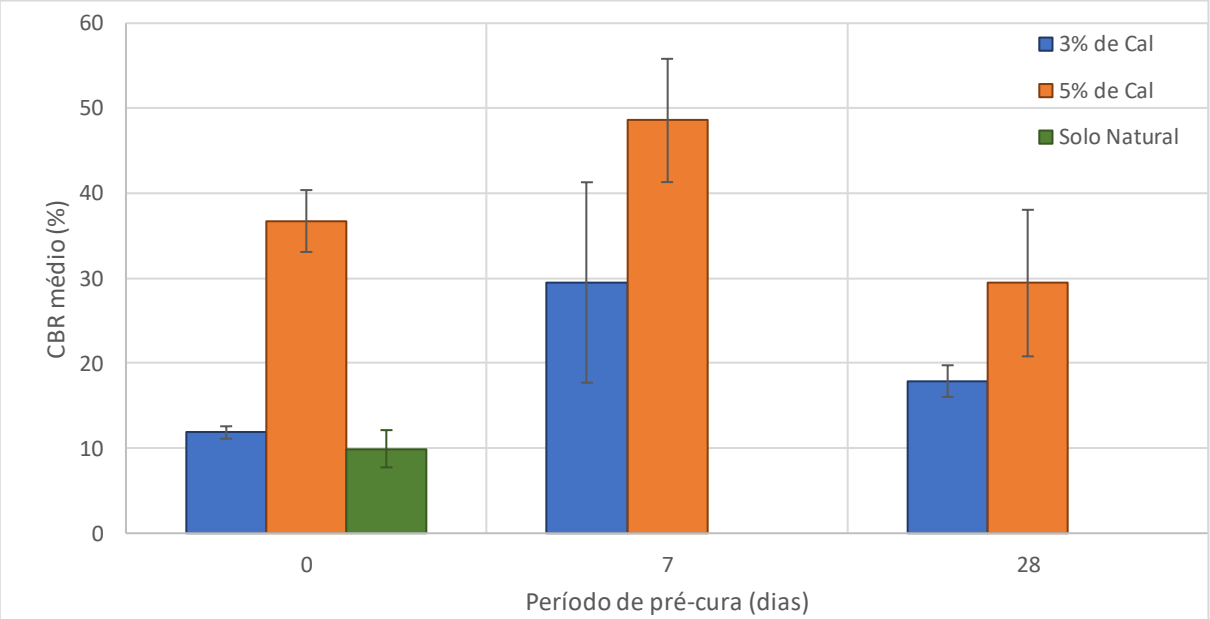
Cal (%)	Pré-cura (dias)	ISC médio (%)	DP do ISC (p.p.)	Expansão média (%)	DP da expansão
0	0	9,94	2,19	1,08	0,026
3	0	11,85	0,73	1,01	0,050
	7	29,50	11,79	0,83	0,061
	28	17,90	1,86	0,66	0,066
5	0	36,73	3,64	0,95	0,031
	7	48,56	7,25	0,75	0,062
	28	29,43	8,62	0,48	0,068

Fonte: A autora (2026).

Nota: DP = desvio-padrão amostral; p.p. = pontos percentuais. Cada condição foi representada por dois corpos de prova. As médias e os desvios-padrão foram calculados com os valores anteriores ao arredondamento.

O Gráfico 13 apresenta os resultados de ISC das misturas com 3% e 5% de cal nos períodos de 0, 7 e 28 dias de pré-cura, incluindo o solo natural somente na condição de 0 dias, correspondente ao controle experimental. Essa apresentação permite avaliar as diferenças entre os teores de cal e o comportamento observado com o prolongamento da pré-cura.

Gráfico 13 – ISC médio após 96 horas de imersão em função do período de pré-cura



Fonte: A autora (2026).

Todas as misturas apresentaram ISC médio superior ao do solo natural. Na comparação entre os teores de cal para um mesmo período de pré-cura, as misturas com 5% apresentaram médias superiores às obtidas com 3%, esses resultados indicam maior resistência à penetração nas condições experimentais avaliadas.

O maior ISC médio foi registrado para a mistura com 5% de cal e 7 dias de pré-cura, com 48,56%, correspondente a aproximadamente 4,89 vezes a média do solo natural. O aumento do ISC médio das misturas em relação ao solo natural é coerente com os resultados de Amadi e Okeiyi (2017), que observaram melhoria da capacidade de suporte de um solo laterítico tratado com cal hidratada. A concordância refere-se à tendência de melhoria com a incorporação do estabilizante. Entretanto, os

valores absolutos não devem ser diretamente equiparados, considerando as diferenças entre os materiais e os procedimentos de preparação.

A evolução das médias do ISC evidencia que o prolongamento da pré-cura não produziu crescimento contínuo do ISC. Para ambos os teores de cal, as médias aumentaram entre 0 e 7 dias e diminuíram aos 28 dias. Entre 7 e 28 dias, as médias diminuíram de 29,50% para 17,90% nas misturas com 3% de cal e de 48,56% para 29,43% naquelas com 5%, correspondendo a reduções relativas de aproximadamente 39% nos dois casos. Essa evolução difere da tendência relatada por Portelinha et al. (2012), que observaram maiores resistências à compressão simples aos 28 dias do que aos 7 dias em misturas de solo laterítico com cal. Essa comparação deve ser interpretada qualitativamente, pois a resistência à compressão simples e o ISC representam respostas a solicitações distintas.

Uma diferença metodológica relevante é que Portelinha et al. (2012) moldaram os corpos de prova na umidade ótima e na massa específica seca máxima correspondentes a cada mistura. No presente estudo, adotou-se a umidade ótima do solo natural como referência, mantendo-se a energia de compactação. Não foram determinadas curvas de compactação específicas para as misturas com cal em razão da quantidade limitada de solo destorroado disponível e do tempo estabelecido no cronograma experimental. A realização de uma curva para cada teor de cal exigiria uma quantidade adicional de material, uma vez que o ensaio demanda diferentes porções de solo para a obtenção dos pontos de compactação. Considerando essas limitações operacionais e a necessidade de cumprir as demais etapas da pesquisa, optou-se por utilizar a umidade ótima determinada para o solo natural como referência para a moldagem de todos os corpos de prova, mantendo-se a energia de compactação Proctor Normal.

Como não foram determinadas curvas de compactação específicas para as misturas, não é possível estabelecer sua posição em relação às respectivas condições ótimas. Essa diferença limita a comparação direta entre os estudos, mas não comprova que a umidade adotada tenha causado a redução do ISC aos 28 dias.

Os dados da Tabela 11 também não sustentam uma explicação única baseada na massa específica seca. Nas misturas com 3% de cal, os corpos de prova ensaiados aos 28 dias apresentaram massas específicas aparentes secas superiores às daqueles avaliados aos 7 dias, apesar do menor ISC médio. Portanto, a redução

da capacidade de suporte não pode ser atribuída, de maneira generalizada, a uma menor densificação dos corpos de prova.

Considerando as diferenças de moldagem e a utilização de dois corpos de prova por condição, os resultados permitem descrever a redução das médias, mas não identificar sua causa ou isolar o efeito do tempo de pré-cura. A diminuição do ISC aos 28 dias, por si só, não demonstra interrupção das reações pozolânicas ou deterioração química das misturas. Sua interpretação requer considerar conjuntamente a variabilidade experimental e as condições físicas dos corpos de prova.

Quanto à expansão, todas as misturas apresentaram médias inferiores à do solo natural, com redução progressiva ao longo dos períodos de pré-cura avaliados conforme Gráfico 5.

A análise conjunta do ISC e da expansão demonstra que a condição de maior capacidade de suporte média foi distinta daquela de menor expansão. A mistura com 5% de cal e 7 dias apresentou ISC médio de 48,56% e expansão média de 0,75%. Com o mesmo teor aos 28 dias, o ISC médio foi de 29,43%, enquanto a expansão atingiu 0,48%, o menor valor médio observado. Em relação à expansão média do solo natural, de 1,08%, essa última condição representou redução relativa de aproximadamente 55,7%, calculada com os valores sem arredondamento. Portanto, a redução da expansão com o prolongamento da pré-cura não foi acompanhada por aumento correspondente do ISC.

Quanto à aplicação em pavimentação, os resultados devem ser relacionados aos requisitos da camada pretendida. Como referência geral para subleito no método do DNER, o Manual de Pavimentação estabelece ISC mínimo de 2% e expansão máxima de 2% (DNIT, 2006). O solo natural apresentou valores médios numericamente compatíveis com esses dois parâmetros. Assim, o tratamento investigado proporcionou aumento do ISC médio e redução da expansão de um material que já atendia numericamente a essa referência geral, cabendo ao projeto definir a necessidade e a finalidade de sua melhoria. Essa comparação, isoladamente, não representa a verificação completa de sua adequação para execução em campo.

Para as misturas solo-cal, as normas do DNIT 420; 421 e 422 (2019) vinculam a seleção da mistura aos requisitos do dimensionamento, abrangendo ISC, resistência à compressão simples e módulo de resiliência. Dessa forma, os resultados obtidos

constituem subsídios favoráveis à investigação do tratamento como alternativa de melhoria do suporte do subleito. A indicação para base ou sub-base requer avaliação específica, pois o aumento do ISC e a redução da expansão, por si sós, não demonstram o atendimento às exigências dessas camadas, a durabilidade em serviço ou a viabilidade econômica da solução.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a influência da adição de cal e do período de pré-cura sobre o comportamento de um solo destinado à investigação de aplicações em pavimentação. Foram comparados o solo natural, ensaiado sem pré-cura, e as misturas com 3% e 5% de cal, submetidas aos períodos de 0, 7 e 28 dias de pré-cura.

A avaliação baseou-se nos resultados do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e da expansão após 96 horas de imersão, mantendo-se a mesma energia de compactação e utilizando-se a umidade ótima do solo natural como referência para a preparação dos corpos de prova.

A caracterização do solo natural evidenciou predominância de partículas finas e baixa plasticidade, com índice de plasticidade de 3%. Para essa condição, foram obtidos ISC médio de 9,94%, com desvio-padrão amostral de 2,19 pontos percentuais, e expansão média de 1,08%. Esses resultados constituíram a referência para a comparação das misturas e foram discutidos à luz dos parâmetros de ISC e expansão aplicáveis ao subleito.

Todas as misturas com cal apresentaram ISC médio superior ao do solo natural. Para os mesmos períodos de pré-cura, o teor de 5% de cal apresentou médias de ISC superiores às obtidas com 3%. O maior valor médio foi registrado na mistura com 5% de cal e 7 dias de pré-cura, atingindo 48,56%, com desvio-padrão amostral de 7,25 pontos percentuais. Esse resultado correspondeu a um aumento relativo de aproximadamente 388,6% em relação ao solo natural, indicando maior resistência à penetração nas condições de moldagem e imersão investigadas.

A evolução do ISC não foi contínua com o prolongamento da pré-cura. Para ambos os teores de cal, as médias aumentaram entre 0 e 7 dias e diminuíram aos 28 dias. Dessa forma, o período de 7 dias apresentou o maior ISC médio entre as condições avaliadas, mas não pode ser considerado um tempo ótimo de pré-cura para outras condições de preparação ou aplicação. A variabilidade observada entre os corpos de prova, especialmente na mistura com 3% de cal aos 7 dias, reforça a necessidade de interpretar as diferenças de forma descritiva.

As expansões médias das misturas foram inferiores à do solo natural e diminuíram com o prolongamento da pré-cura. A menor expansão média foi obtida com 5% de cal e 28 dias, atingindo 0,48%, com desvio-padrão amostral de 0,068 ponto percentual. Esse valor representou uma redução relativa de aproximadamente 55,7%

em relação ao solo natural. Nessa condição, o ISC médio foi de 29,43%, evidenciando que o maior ISC e a menor expansão ocorreram em condições distintas. Portanto, a seleção da mistura deve considerar conjuntamente a capacidade de suporte e a resposta ao umedecimento.

Os resultados indicam potencial de melhoria do suporte do solo com a adição de cal, especialmente para o teor de 5%, que apresentou valores médios mais favoráveis de ISC e expansão nos períodos avaliados. Entretanto, a definição da mistura mais adequada depende dos requisitos de projeto e da verificação das propriedades exigidas para a camada de pavimento pretendida. O programa experimental não permite confirmar, isoladamente, a aptidão do material para aplicação em base ou sub-base, a possibilidade de redução das espessuras do pavimento, a durabilidade em serviço ou a viabilidade econômica do tratamento.

A interpretação dos resultados deve considerar as limitações do estudo, incluindo a utilização de apenas dois corpos de prova por condição, a adoção de uma única curva de compactação para o solo natural e as diferenças de umidade e massa específica aparente seca efetivamente obtidas durante a moldagem. A influência da umidade de referência sobre o comportamento das misturas permanece como hipótese interpretativa, não sendo possível atribuir a ela, de forma conclusiva, a redução do ISC aos 28 dias ou afirmar que houve deficiência de água para as reações envolvidas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se determinar curvas de compactação específicas para cada mistura, ampliar o número de corpos de prova e acompanhar a variação da umidade durante a pré-cura. Ensaios complementares de resistência à compressão simples, módulo de resiliência e durabilidade, associados à avaliação econômica e à verificação em campo, poderão aprofundar a análise do desempenho do material em aplicações rodoviárias.

Conclui-se que o aumento do teor de cal de 3% para 5% esteve associado a maiores valores médios de ISC, enquanto o efeito do período de pré-cura variou conforme a condição avaliada. O período de 7 dias proporcionou o maior ISC médio, ao passo que 28 dias resultaram na menor expansão média. Assim, a influência conjunta do teor de cal e da pré-cura evidencia que a seleção da mistura deve equilibrar capacidade de suporte e expansão, respeitando as condições experimentais e os requisitos da aplicação pretendida.

REFERÊNCIAS

AHMADULLAH, Tasneem; CHRYSOCHOOU, Maria. **Relationship between strength development and pozzolanic reactions in lime stabilized kaolinite. International Journal of Geo-Engineering**, v. 15, artigo 11, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s40703-024-00212-6. Acesso em: 1 mar. 2026.

ALCÂNTARA, Marco Antônio de Morais; LIMA, Dario Cardoso de; BUENO, Benedito de Souza; COSTA, Liovando Marciano. **Estabilização de solos com cal em regiões tropicais:** aplicação a solos de Ilha Solteira-SP, Brasil**.** *In*: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 6., 1997, Lisboa. Anais [...]. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 1997. v. 1, p. 211-220.

AMADI, A. A.; OKEIYI, A. **Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data**. International Journal of Geo-Engineering, [s. l.], v. 8, artigo 3, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s40703-017-0041-3. Acesso em: 05 mar.2026

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS**. AASHTO M 145-91(2021):** standard specification for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. Washington, DC: AASHTO, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2487-17(2025): **Spractice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System).** West Conshohocken: ASTM International, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1520/D2487-17R25.Acesso em: 25 mar. 2026.

ARAÚJO, Arielton Fonteles. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do Estado do Ceará**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/1447/1/2009_dis_afaraujo.pdf.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457:** amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459:** solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502:** solos e rochas — terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180:** solo: determinação do limite de plasticidade**.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181:** solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182:** solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9895:** solo: índice de suporte Califórnia: ISC: método de ensaio**.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica:** materiais, projeto e restauração. São Paulo: Grupo A, 2007. *E-book*. Disponível em: https://leitor.bvirtual.com.br. Acesso em: 25 abr. 2026.

BELL, F. G. **Lime stabilization of clay minerals and soils. Engineering Geology**, v. 42, n. 4, p. 223-237, 1996. DOI: 10.1016/0013-7952(96)00028-2. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2. Acesso em: 25 abr. 2026.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros**.** 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2022. 750

BHATTACHARJA, Sankar; BHATTY, Javed I.; TODRES, H. Alan. **Stabilization of clay soils by Portland cement or lime:** a critical review of literature. Skokie: Portland Cement Association, 2003. PCA R&D Serial No. 2066. Disponível em: https://www.cement.org/wp-content/uploads/2024/08/sn2066.pdf. **Acesso em: 25 mar. 2026.**

CABRAL, Felipe Melo. **Estabilização de solo com adição de cal e cimento para fins de pavimentação na região de Uberlândia.** 2018. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/22237/1/Estabiliza%C3%A7%C3%A3oSoloAdi%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em: 25 mar. 2026.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações:** fundamentos. 6. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: LTC, 1988. v. 1.

CARPENTER, S. H. et al. ***Soil and base stabilization and associated drainage considerations*****.** Volume II: Mixture Design Considerations. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1992. (FHWA-SA-93-005).

CHRISTOPHER, Barry R.; SCHWARTZ, Charles W.; BOUDREAU, Richard. **Geotechnical aspects of pavements**: reference manual. Washington, DC: Federal Highway Administration: National Highway Institute, 2006. (FHWA-NHI-05-037).

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2025**. Brasília: CNT; SEST SENAT; ITL, 2025. 219 p.

CONSOLI, Nilo Cesar; LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva; HEINECK, Karla Salvagni. Key, **Parameters for the strength control of lime stabilized soils. Journal of Materials in Civil Engineering,** v. 21, n. 5, p. 210–216, 2009. Disponível

em: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:5(210). Acesso em: 12 abr.2026

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Principles of geotechnical engineering**. 9. ed. Boston: Cengage Learning, 2018

DASH, Sujit Kumar; HUSSAIN, Monowar. **Lime stabilization of soils**: reappraisal. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 24, n. 6, p. 707-714, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000431. Acesso em:14 mar. 2026

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO PARANÁ. **Várias são as camadas que compõem a estrutura dos pavimentos que nos permitem viajar entre as cidades do nosso estado, do nosso país, e até transitar entre continentes!** LinkedIn, 5 jan. 2023. Disponível em: https://pt.linkedin.com/posts/der-pr_várias-são-as-camadas-que-compõem-a-estrutura-activity-7016881705319829504-HF0v. Acesso em: 25 abr. 2026.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093/94:** solos — determinação da densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

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: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 138/2010-ES:** pavimentação: reforço do subleito: especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES**. DNIT 172/2016-ME:** solos — determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas: método de ensaio. Brasília, DF: DNIT, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES**. DNIT 419/2019-ME:** pavimentação: solo-cal: estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo: método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ***Manual de implantação básica de rodovia***. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DIAMOND, S.; KINTER, E. B. **Mechanisms of soil-lime stabilization:** an interpretive review. Highway Research Record, Washington, n. 92, p. 83-102, 1965.

DIAMOND, S.; WHITE, J. L.; DOLCH, W. L. **Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack. West Lafayette:** Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation; Purdue University, 1963. Technical Paper. Publication FHWA/IN/JHRP-63/31.Disponível em: https://doi.org/10.5703/1288284313640. Acesso em: 25 mar. 2026.

DINIZ, B. C.; FEDRIGO, W.; KLEINERT, T. R.; BATISTA, G. S.; NÚÑEZ, W. P.; CORREA, B. M.; BRITO, L. A. T. **Lime stabilization of tropical soil for resilient pavements:** mechanical, microscopic, and mineralogical characteristics. Materials, v. 17, n. 19, 4720, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ma17194720. Acesso em: 25 mar. 2026.

ELKADY, Tamer; AL-MAHBASHI, Ahmed; AL-SHAMRANI, Mosleh. **Resilient modulus lime-treated expansive subgrade.** In: MANZANAL, Diego; SFRISO, Alejo O. (ed.). From fundamentals to applications in geotechnics. Amsterdam: IOS Press, 2015. p. 1631-1638. Disponível em: https://doi.org/10.3233/978-1-61499-603-3-1631. Acesso em: 25 mar. 2026.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GUIMARÃES, Antonio Carlos Rodrigues. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009. 367 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: https://coc.ufrj.br/lista-teses-de-doutorado/um-metodo-mecanistico-empirico-para-a-previsao-da-deformacao-permanente-em-solos-tropicais-constituintes-de-pavimentos/. Acesso em: 02 jun. 2026.

HUANG, Yang H**. Pavement analysis and design**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004. Disponível em: https://archive.org/details/pavementanalysis0000yang. Acesso em: 07 abr. 2026.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization:** principles and practice. Sydney: Butterworths, 1972. Disponível em: https://archive.org/details/soilstabilizatio0000ingl. Acesso em: 13 mar. 2026.

LEKARP, Fredrick; ISACSSON, Ulf; DAWSON, Andrew. **State of the art. I:** resilient response of unbound aggregates. Journal of Transportation Engineering, v. 126, n. 1, p. 66-75, 2000. Disponível em: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66). Acesso em: 13 mar. 2026.

LIMA, Jairo Salim Pinheiro de; SOUZA, Ândria Carolina Leite de; LEMOS, Bárbara; DEZEN, Lucas Eduardo; MARTARELLO, Yule Anni Dourado. **Estabilização de solo com rejeito da produção de celulose.** Revista Científica ANAP Brasil, v. 16, n. 40, p. 116-128, 2023. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/anap_brasil/article/view/4607. Acesso em: 11 mar. 2026.

LITTLE, Dallas N. **Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. [**S. l.]: Lime Association of Texas, 1995.

LITTLE, Dallas N.; NAIR, Syam. **Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials.** Washington, DC: Transportation Research Board, 2009. (NCHRP Web-Only Document, 144). 67 p. Disponível em: https://doi.org/10.17226/22999. Acesso em: 14 jun. 2026

LUVIZÃO, Gislaine. **Avaliação do ciclo de vida de pavimentos:** análise comparativa entre diferentes alternativas de restauração a partir de estudos de casos. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/251070. Acesso em: 08 abr.2026

MAKUSA, Gregory Paul. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: state of the art review.** Luleå: Luleå University of Technology, 2012.
MALLELA, Jagannath; VON QUINTUS, Harold; SMITH, Kelly L. **Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design**. Arlington: National Lime Association, 2004. Disponível em: https://www.lime.org/wp-content/uploads/mech-emp-pavement.pdf. Acesso em: 19 mar. 2026.

MANZOOR, Shahzada Omer; YOUSUF, Aadil. **Stabilisation of soils with lime:** a review. Journal of Materials and Environmental Science, v. 11, n. 9, p. 1538-1551, 2020. Disponível em: https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol11/vol11_N9/JMES-2020-11133-Manzoor.pdf. Acesso em : 16 jun.2026.

MARTINS, K. H.; PUNHAGUI, K. R. G.; JOHN, V. M. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção:** cal. São Paulo: Sidac, 2022. Disponível em: https://sidac.org.br/documentos/Sidac_Cal.pdf. Acesso em: 17 jun. 2026.

MEDEIROS, Alexandre Simas de; SANTANA, Claudeny Simone Alves; SILVA, Marcelino Aurélio Vieira da. **Avaliação do comportamento mecânico do solo estabilizado com asfalto utilizando emulsão asfáltica.** Matéria, Rio de Janeiro, v. 29, n. 4, p. 1-13, 2024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/fqzz8b7npvFnKgWVLx9bXTR/?lang=pt. Acesso em: 15 set. 2026.

MEDEIROS, Luana Dantas; FERREIRA, Silvio Romero de Melo; BELLO, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira. **Evolution of chemical stabilization in expansive soils. Journal of Environmental Analysis and Progress**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 123–139, 2023. Disponível em: https://www.journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/5294. Acesso em: 15 set. 2026.

NATIONAL LIME ASSOCIATION. **Lime-treated soil construction manual:** lime stabilization & lime modification. Arlington: National Lime Association, 2004. Bulletin 326. Disponível em: https://www.lime.org/publication/lime-treated-soil-construction-manual-lime-stabilization-lime-modification/. Acesso em: 01 jul. 2026.

NOGAMI, Job Shuji; VILLIBOR, Douglas Fadul. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Villibor, 1995. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/6a2a9cc1-8df7-4583-8528b4f98a64e35/Nogami-1995-pavimentacao.pdf. Acesso em: 13 jun. 2026.

PAUL, Shantanu; ISLAM, Md. Monirul; ISLAM, Mohammad Shariful. **Sustainable stabilization of expansive clay using lime and steel slag.** Advances in Materials Science and Engineering, [S. l.], v. 2026, n. 1, art. 2024022, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1155/amse/2024022. Acesso em: 01 jun. 2026.

PAULA, Gisandra Faria de; TEIXEIRA, Dan Imbroisi Brant; LEVAY, Vinícius Silveira; GOMES, Alessandra dos Santos; SILVA, Rafael Cerqueira. **Mapeamento geológico-geotécnico de uma obra de infraestrutura viária no Distrito Federal do Brasil**. Labor e Engenho, Campinas, SP, v. 18, n. 00, p. e024017, 2024. DOI: https://doi.org/10.20396/labore.v18i00.8677948. Disponível em: https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/labore/article/view/8677948. Acesso em: 25 mar. 2026.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PORTELINHA, F. H. M.; LIMA, D. C.; FONTES, M. P. F.; CARVALHO, C. A. B. **Modification of a lateritic soil with lime and cement:** an economical alternative for flexible pavement layers. Soils and Rocks, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 51-63, jan./abr. 2012. Disponível em: https://doi.org/10.28927/SR.351051. Acesso em: 19 jun. 2026.

SAMTANI, Naresh C.; NOWATZKI, Edward A. **Soils and foundations reference manual.** Washington, DC: Federal Highway Administration; National Highway Institute, 2006. (FHWA-NHI-06-088 e FHWA-NHI-06-089, volumes I e II).

SANTOS, Humberto Gonçalves dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SENÇO, Wlastermiler de**. Manual de técnicas de pavimentação:** volume 1. 2. ed. ampl. São Paulo: Pini, 2007. v. 1.

SILVANI, Carina; SANTANA JUNIOR, Pedro Raimundo; GUIMARÃES, Samuel Gadelha; VARELA, Gilson Gabriel Teixeira. **Efeito do tempo de cura na expansão de um solo estabilizado com cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal**. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 21., 2024, Balneário Camboriú. Anais [...]. [S. l.]: Editora Omnis Scientia, 2024. p. 5076-5083. DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/619. Disponível em: https://doi.org/10.47094/COBRAMSEG2024/619. Acesso em: 18 jul. 2026.

SUNKARA, Yashwant; RAO, B. Someswara; RAO, G. Venkata**. Experimental studies on laterite soil stabilized with cement and aggregate**. International Journal of Research in Engineering and Technology, v. 4, n. 8, p. 187–192, 2015. Disponível em:https://www.researchgate.net/publication/370184022_EXPERIMENTAL_STUDIES_ON_LATERITE_SOIL_STABILIZED_WITH_CEMENT_AND_AGGREGATE. Acesso em: 23 set. 2026.

TONUS, Bianca Penteado de Almeida; BLOINSKI, Matheus Henrique Quadros; LAUTENSCHLÄGER, Carlos Emanuel Ribeiro; OLAVO, Luiz Henrique Felipe; FARO, Vítor Pereira. **Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta**

Grossa (CEEG-PG): classificação do solo local e parâmetros de resistência ao cisalhamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2022, Campinas. Anais [...]. Campinas: ABMS, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0484. Acesso em: 7 jul. 2026.

USANGA, K. N.; EDET, A. E. **Durability performance of Onna expansive subgrade soil stabilized with rice husk ash geopolymer for road pavement construction.** International Journal of Transportation Engineering and Technology, v. 11, n. 2, p. 64-74, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20251102.12. Acesso em: 13 jul. 2026.

VERTEMATTI, José Carlos. **Manual brasileiro de geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. Disponível em: https://www.blucher.com.br/manual-brasileiro-de-geossinteticos_9788521209263. Acesso em: 13 jul. 2026.