

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS MELHORADOS COM  
CIMENTO PORTLAND UTILIZANDO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DE  
MISTURAS E ANÁLISE DE CARBONATAÇÃO**

Hugo Silva Cardoso  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2024**

**HUGO SILVA CARDOSO**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS MELHORADOS COM  
CIMENTO PORTLAND UTILIZANDO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DE  
MISTURAS E ANÁLISE DE CARBONATAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Taciano Oliveira da Silva

Coorientador: Klaus H. de P. Rodrigues

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C268c  
2024

Cardoso, Hugo Silva, 1985-

Comportamento mecânico de solos tropicais melhorados com cimento Portland utilizando planejamento experimental de misturas e análise de carbonatação / Hugo Silva Cardoso. – Viçosa, MG, 2024.

1 dissertação eletrônica (112 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Taciano Oliveira da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.105>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solo-cimento. 2. Concreto - Mistura. 3. Mecânica do solo. 4. Cimento Portland. 5. Carbonatação. 6. Projeto experimental. I. Silva, Taciano Oliveira da, 1975-.

II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

III. Título.

CDD 22. ed. 620.136

HUGO SILVA CARDOSO

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS MELHORADOS COM  
CIMENTO PORTLAND UTILIZANDO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DE  
MISTURAS E ANÁLISE DE CARBONATAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 4 de novembro de 2024.

Assentimento:

---

Hugo Silva Cardoso  
Autor

---

Taciano Oliveira da Silva  
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 12/03/2025 às 10:31:56 e pelo orientador em 12/03/2025 às 10:42:23. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **USJD.4YM6.WLLH** e clique no botão 'Validar documento'.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

Aos meus pais, Sebastiana Silva Cardoso e Francisco Cardoso, a quem devo a minha vida, exemplo de amor incondicional.

A minha esposa, Juliana Alexandrino Santos Cardoso: companheira, amiga, amor da minha vida e incentivadora, principalmente nas horas mais difíceis.

Aos meus filhos, Davi Santos Cardoso e Miguel Santos Cardoso, amados para sempre, motivos do meu esforço em tudo nessa vida.

Aos meus demais familiares e amigos que contribuíram de alguma forma nesta jornada acadêmica.

Aos meus amigos e professores, Taciano Oliveira da Silva, Klaus Henrique de Paula Rodrigues, Heraldo Nunes Pitanga e Emerson Cordeiro Lopes, pelas orientações, incentivos, amizade, correções e, principalmente, pela força em momentos de desânimo.

Aos professores que me ajudaram na busca pelo conhecimento ao longo do processo.

Ao companheiro e amigo, Marcos José Miranda Filho, pela ajuda em tudo durante os trabalhos de pesquisa, fundamental para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos que contribuíram durante os experimentos, Giovani, José Carlos, Marcelo e Bruno, pelas dicas e orientações no laboratório.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de realizar uma pós-graduação de excelência nacional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

CARDOSO, Hugo Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2024. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS MELHORADOS COM CIMENTO PORTLAND UTILIZANDO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DE MISTURAS E ANÁLISE DE CARBONATAÇÃO.** Orientador: Taciano Oliveira da Silva. Coorientador: Klaus Henrique de Paula Rodrigues.

A aplicação de solos tropicais compactados em obras de infraestrutura, principalmente em camada de base de pavimentos asfálticos, é amplamente realizada, sendo tais solos muitas vezes melhorados com cimento Portland de modo a obter melhor desempenho mecânico, conforme especificações requeridas em determinados projetos. Técnicas de melhoramento geotécnico de solos com cimento Portland são amplamente usadas e estudadas, sendo uma excelente opção, visto que o transporte deste material para diversos locais é relativamente fácil e sua incorporação aos solos locais pode ser executada *in loco* de forma simples. A dosagem adequada (aqui denominada dosagem ótima) de solo-cimento para uso em obras de engenharia de pavimentação é fundamental para o melhor aproveitamento dos materiais locais, sendo desejável a adoção de uma metodologia que considere os efeitos das interações entre os diversos componentes da mistura, analisando várias propriedades mecânicas simultaneamente. Neste contexto, a metodologia de planejamento experimental em vértices extremos foi a solução proposta neste estudo para a determinação da mistura de solo melhorado com cimento (SMC) relativa à dosagem ótima. Tal proposição tem se mostrado uma excelente opção em relação aos métodos empíricos, que são normalmente muito limitados quanto aos tipos de materiais e às propriedades de engenharia analisadas no protocolo de dosagem. Adicionalmente, ressalta-se que o fenômeno da carbonatação, que ocorre quando materiais à base de cálcio reagem com o gás carbônico para formar a calcita, pode influenciar a resposta mecânica e a durabilidade destes materiais de forma negativa, afetando o desempenho nos diversos usos em obras de engenharia de pavimentos, razão pela qual tal fenômeno precisa ser estudado e conhecido. Assim, o presente trabalho apresentou o desenvolvimento de uma dosagem ótima de mistura de SMC através do método de planejamento experimental em vértices extremos, para uso em camada de base de pavimentos asfálticos, utilizando dois tipos de solos tropicais típicos da região da Zona da Mata de Minas Gerais [S1 (argiloso) e S2 (arenoso)] e cimento Portland, limitando a dosagem do cimento entre 2% e 4% e utilizando as propriedades mecânicas de Resistência à Compressão Simples (RCS) e Índice de Suporte Califórnia

(CBR) como critério de dosagem, definindo-se valores alvos a serem atingidos para estas propriedades. Buscou-se também entender melhor o eventual impacto da carbonatação em SMC para uso em camada de base de pavimentos asfálticos, considerando as propriedades mecânicas de RCS e mini-CBR (*mini-California Bearing Ratio*) e de Durabilidade por Molhagem e Secagem (DMS), utilizando a mistura relativa à dosagem ótima (3,30% de cimento, 76,70% de solo S1 e 20,00% de solo S2). O planejamento experimental em vértices extremos mostrou-se tecnicamente útil na dosagem de SMC. Sua versatilidade, ao permitir o uso de vários materiais e análises de diversas propriedades de engenharia, mostrou ser sua aplicação uma excelente opção em relação a outros métodos empíricos. A análise da carbonatação da mistura relativa à dosagem ótima mostrou que, embora a formação da calcita tenda a melhorar as propriedades mecânicas, o contato com a umidade, ao promover a dissolução da calcita em bicarbonato de cálcio, prejudica a durabilidade do material. Portanto, o fenômeno da carbonatação que ocorre com os materiais à base de cálcio tende a ser prejudicial, visto que, em uma situação de campo, as intempéries, como a variação de umidade, degradariam rapidamente o material, comprometendo toda a estrutura do pavimento.

Palavras-chave: solo melhorado com cimento; planejamento experimental em vértices extremos; otimização de misturas; carbonatação; carbonatação acelerada; pavimentação

## ABSTRACT

CARDOSO, Hugo Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2024. **MECHANICAL BEHAVIOR OF TROPICAL SOILS IMPROVED WITH PORTLAND CEMENT THROUGH EXPERIMENTAL MIXTURE DESIGN AND CARBONATION ANALYSIS**. Adviser: Taciano Oliveira da Silva. Co-adviser: Klaus Henrique de Paula Rodrigues.

The application of compacted tropical soils in infrastructure projects, particularly as base layers in asphalt pavements, is a well-established practice. These soils are often improved with Portland cement to achieve enhanced mechanical performance, as specified in certain project requirements. Geotechnical improvement techniques involving Portland cement are extensively used and studied, constituting an excellent option due to the relatively easy transportation of this material to various locations and its straightforward incorporation into local soils, which can be performed in situ. Proper dosage (here referred to as optimal dosage) of soil-cement mixtures for use in pavement engineering projects is critical for maximizing the utilization of local materials. It is desirable to adopt a methodology that considers the effects of interactions between the various mixture components, analyzing multiple mechanical properties simultaneously. In this context, the experimental design methodology of extreme vertices was proposed in this study to determine the optimal cement-improved soil (CIS) mixture. This approach has proven to be an excellent alternative to empirical methods, which are often limited regarding the types of materials and engineering properties analyzed in the dosage protocol. Moreover, it should be emphasized that the carbonation phenomenon, which occurs when calcium-based materials react with carbon dioxide to form calcite, can negatively influence the mechanical response and durability of these materials, thereby affecting their performance in various applications within pavement engineering projects. Therefore, understanding and addressing this phenomenon is essential. This study developed the optimal dosage of a CIS mixture using the experimental design method of extreme vertices for application as a base layer in asphalt pavements. Two typical tropical soils from the Zona da Mata region of Minas Gerais, Brazil [S1 (clayey soil) and S2 (sandy soil)] were used alongside Portland cement, with cement dosage constrained between 2% and 4%. The mechanical properties of Unconfined Compressive Strength (UCS) and California Bearing Ratio (CBR) were employed as dosage criteria, defining target values for these properties. Furthermore, the potential impact of carbonation on CIS used as base layers in asphalt pavements was examined, considering the following mechanical properties: UCS, mini-CBR (mini-California Bearing Ratio), and

Durability by Wetting and Drying (DWD). The optimal mixture (3.30% cement, 76.70% S1, and 20.00% S2) was utilized in this analysis. The experimental design methodology of extreme vertices proved technically effective for designing CIS. Its versatility, allowing the incorporation of various materials and the analysis of multiple engineering properties, demonstrated its superiority over other empirical methods. The analysis of carbonation in the optimal mixture revealed that although calcite formation tends to enhance mechanical properties, contact with moisture, promoting the dissolution of calcite into calcium bicarbonate, detrimentally affects the material's durability. Consequently, the carbonation phenomenon in calcium-based materials is generally detrimental, as environmental factors such as moisture variations in field conditions would rapidly degrade the material, compromising the entire pavement structure.

Keywords: cement-improved soil; experimental design of extreme vertices; mixture optimization; carbonation; accelerated carbonation; pavement

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Curvas granulométricas dos solos* .....	35
Figura 2.2: Difratoograma da amostra de solo S1 .....	36
Figura 2.3: Difratoograma da amostra de solo S2.....	37
Figura 2.4: Micrografias do solo S1: (a)x100; (b)x10.000.....	38
Figura 2.5: Micrografias do solo S2: (a)x100; (b)x10.000.....	38
Figura 2.6: Pontos experimentais definidos pelo planejamento de misturas. ....	41
Figura 2.7: Fluxograma com o procedimento para a determinação da dosagem ótima. .....	44
Figura 2.8: RCS em relação ao teor de cimento das misturas. ....	49
Figura 2.9: CBR em relação ao teor de cimento das misturas. ....	50
Figura 2.10: Gráfico de otimização.....	52
Figura 2.11: Curva de compactação na energia Proctor modificada da mistura correspondente à dosagem ótima. ....	54
Figura 2.12: Difratoograma da mistura referente à dosagem ótima. ....	57
Figura 2.13: Micrografias da mistura referente à dosagem ótima. ....	57
Figura 3.1: Curvas granulométricas dos solos* .....	76
Figura 3.2: Difratoograma da amostra de solo S1.....	77
Figura 3.3: Difratoograma da amostra de solo S2.....	78
Figura 3.4: Micrografias do solo S1: (a)x100; (b)x10.000.....	79
Figura 3.5: Micrografias do solo S2: (a)x100; (b)x10.000.....	79
Figura 3.6: Croqui e imagem da câmara de carbonatação acelerada: Fonte (Martins <i>et al.</i> , 2018). ....	82
Figura 3.7: Variação de volume (%) dos corpos de prova expostos aos processos de cura carbonatada e cura úmida.....	91
Figura 3.8: Variação de umidade (%) dos corpos de prova expostos aos processos de cura carbonatada e cura úmida.....	92
Figura 3.9: Perda de massa (%) determinada no último ciclo de molhagem e secagem. .....	93
Figura 3.10: Corpos de prova na fase de secagem do 3º ciclo. ....	94
Figura 3.11: Corpo de prova carbonatado no 4º ciclo de molhagem e secagem. ....	94
Figura 3.12: Difratoogramas das amostras dos corpos de prova moldados para o ensaio de RCS e submetidos às curas carbonatada e úmida. ....	95

Figura 3.13: Difractogramas das amostras dos corpos de prova moldados para o ensaio de mini-CBR e submetidos às curas carbonatada e úmida.....	96
Figura 3.14: Micrografias das amostras dos corpos de prova moldados para o ensaio de RCS e submetidos à cura carbonatada (a) e à cura úmida (b). .....	97
Figura 3.15: Micrografias das amostras dos corpos de prova moldados para o ensaio de mini-CBR submetidos à cura carbonatada (a) e à cura úmida (b).....	97
Figura 3.16: Corpos de prova moldados nos padrões para o ensaio de RCS submetidos à aspensão com fenolftaleína: cura carbonatada (a); cura úmida (b)..	100
Figura 3.17: Corpos de prova moldados nos padrões para o ensaio de mini-CBR submetidos à aspensão com fenolftaleína: cura carbonatada (a); cura úmida (b)..	100
Figura 3.18: Valores médios com intervalo de confiança a 95% pelo teste t de <i>Student</i> para os resultados de RCS dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada e úmida. ....	103
Figura 3.19: Valores médios com intervalo de confiança a 95% pelo teste t de <i>Student</i> para os resultados de mini-CBR dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada e úmida.....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Caracterização e classificação geotécnicas dos solos. ....	35
Tabela 2.2: Composição química obtida pela FRX dos solos S1 e S2.....	36
Tabela 2.3: Elementos químicos presentes nas amostras de solo S1 e S2.....	39
Tabela 2.4: Caracterização física do cimento Portland. ....	40
Tabela 2.5: Proporções de cada componente nas misturas de SMC do planejamento experimental.....	40
Tabela 2.6: Misturas experimentais definidas pelo <i>software</i> Minitab 18.....	41
Tabela 2.7: Valores alvo para as propriedades mecânicas consideradas no procedimento de dosagem das misturas SMC.....	44
Tabela 2.8: Parâmetros ótimos do ensaio de compactação na energia Proctor modificada das misturas SMC definidas no planejamento experimental.....	47
Tabela 2.9: Propriedades mecânicas RCS e CBR e expansão das misturas SMC definidas no planejamento experimental (aos 7 dias de cura).....	48
Tabela 2.10: Equações de regressão de RCS e CBR.....	52
Tabela 2.11: Dosagem ótima obtida com a função desejabilidade do <i>software</i> Minitab 18. ....	53
Tabela 2.12: Parâmetros do ponto de ótimo da curva de compactação na energia Proctor modificada da mistura correspondente à dosagem ótima.....	54
Tabela 2.13: Resultados de RCS e CBR da mistura relativa à dosagem ótima. ....	55
Tabela 2.14: Desvio do valor de RCS encontrado em relação ao RCS esperado. ...	55
Tabela 2.15: Desvio do valor de CBR encontrado em relação ao CBR esperado. ...	55
Tabela 2.16: Resultados do EDS das regiões apresentadas na Figura 2.13. ....	58
Tabela 3.1: Caracterização e classificação geotécnicas dos solos. ....	76
Tabela 3.2: Composição química obtida pela FRX dos solos S1 e S2.....	77
Tabela 3.3: Elementos químicos presentes nas amostras de solo S1 e S2.....	80
Tabela 3.4: Caracterização física do cimento Portland. ....	81
Tabela 3.5: Valores alvo para as propriedades mecânicas consideradas no procedimento de dosagem das misturas SMC.....	81
Tabela 3.6: Dosagem ótima obtida com a função otimizador de resposta do <i>software</i> Minitab 18.....	82
Tabela 3.7: Parâmetros de ótimo do ensaio de compactação da dosagem ótima. ...	84
Tabela 3.8: Resultados de RCS. ....	89

Tabela 3.9: Resultados de mini-CBR e expansão.....	90
Tabela 3.10: EDS das regiões apresentadas na Figura 3.14 (a) e (b). ....	98
Tabela 3.11: EDS das regiões apresentadas na Figura 3.15 (a) e (b). ....	98
Tabela 3.12: Valores de pH dos corpos de prova usados para determinação da RCS. .....	99
Tabela 3.13: Valores de pH dos corpos de prova usados para determinação do mini- CBR.....	99
Tabela 3.14: Análises de normalidade pelo teste de <i>Shapiro-Wilk</i> para os resultados das propriedades mecânicas RCS e mini-CBR dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada e úmida. ....	101
Tabela 3.15: Análises de variância pelo teste F para os resultados das propriedades mecânicas RCS e mini-CBR dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada e úmida. ....	102
Tabela 3.16: Análises do teste t de <i>Student</i> para os resultados das propriedades mecânicas RCS e mini-CBR dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada e úmida. ....	102

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials.</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
C <sub>2</sub> S	Silicato Dicálcico.
C <sub>3</sub> A	Aluminato Tricálcico.
C <sub>3</sub> S	Silicato Tricálcico.
C <sub>4</sub> (A,F)H <sub>x</sub>	Ferroaluminato de Cálcio Hidratado.
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato Tetracálcico.
C-A-H	Aluminato de Cálcio Hidratado.
C-A-S-H	Sílicoaluminato de Cálcio Hidratado.
CBR	<i>California Bearing Ratio.</i>
CH	Portlandita.
CLA	Classificação.
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado.
DMS	Durabilidade por Molhagem e Secagem.
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
DRX	Difração de Raios-X.
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva.
ES	Especificação de Serviço.
FRX	Fluorescência de Raios-X.
IP	Índice de Plasticidade.
ISO	<i>International Organization for Standardization.</i>
LL	Limite de Liquidez.
LP	Limite de Plasticidade.
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical.
MCV	<i>Moisture Condition Value.</i>
ME	Método de Ensaio.
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura.
MR	Módulo de Resiliência.
NBR	Norma Técnica Brasileira.
PF	Perda ao Fogo.
pH	Potencial hidrogeniônico.

PRO	Procedimento.
$R^2$	Coeficiente de determinação.
RCS	Resistência à Compressão Simples.
TRB	<i>Transportation Research Board.</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa.
USC	<i>Unified Soil Classification.</i>
$w_{ot}$	Umidade Ótima.
$\rho_{dmáx}$	Massa Específica Aparente Seca Máxima.
$\rho_s$	Massa Específica dos Grãos do Solo.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	17
1.1	Contextualização do objeto de pesquisa .....	17
1.2	Objetivos.....	20
1.3	Estrutura do trabalho .....	21
	Referências .....	22
2	DOSAGEM DE SOLOS TROPICAIS MELHORADOS COM CIMENTO ATRAVÉS DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL EM VÉRTICES EXTREMOS .....	24
2.1	Introdução.....	27
2.2	Materiais e métodos.....	34
2.2.1	Materiais .....	34
2.2.1.1	Solos.....	34
2.2.1.2	Cimento Portland.....	39
2.2.2	Métodos.....	40
2.2.2.1	Planejamento experimental .....	40
2.2.2.2	Parâmetros de compactação das misturas.....	41
2.2.2.3	Moldagem, cura e aceitabilidade dos corpos de prova das misturas..	42
2.2.2.4	Ensaio de RCS das misturas .....	42
2.2.2.5	Ensaio de CBR das misturas .....	43
2.2.2.6	Dosagem ótima.....	43
2.2.2.7	Caracterização da mistura relativa à dosagem ótima .....	45
2.2.2.7.1	Parâmetro de compactação da mistura relativa à dosagem ótima .....	45
2.2.2.7.2	Moldagem, cura e aceitabilidade dos corpos de prova da mistura relativa à dosagem ótima .....	45
2.2.2.7.3	Ensaio de RCS da mistura relativa à dosagem ótima .....	46

2.2.2.7.4	Ensaio de CBR da mistura relativa à dosagem ótima .....	46
2.2.2.7.5	Ensaio de DRX e MEV/EDS da mistura relativa à dosagem ótima .....	46
2.3	Resultados e Discussões.....	47
2.3.1	Ensaio de compactação das misturas .....	47
2.3.2	Propriedades mecânicas analisadas .....	48
2.3.3	Obtenção da dosagem ótima através de planejamento experimental em vértices extremos.....	51
2.3.4	Determinação dos parâmetros de compactação da mistura relativa à dosagem ótima.....	53
2.3.5	Determinação das propriedades mecânicas da mistura relativa à dosagem ótima.....	54
2.3.6	Ensaio de DRX e MEV/EDS da mistura relativa à dosagem ótima.....	56
2.4	Conclusões .....	58
	Referências .....	60
3	ANÁLISE DE CARBONATAÇÃO DE MISTURA DE SOLO MELHORADO COM CIMENTO OTIMIZADA POR PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	66
3.1	Introdução .....	70
3.2	Materiais e métodos.....	74
3.2.1	Materiais .....	74
3.2.1.1	Solos.....	74
3.2.1.2	Cimento Portland .....	80
3.2.2	Métodos.....	81
3.2.2.1	Determinação da mistura relativa à dosagem ótima.....	81
3.2.2.2	Procedimento de carbonatação acelerada .....	82
3.2.2.3	Parâmetros de compactação da mistura relativa à dosagem ótima ...	83
3.2.2.4	Moldagem, cura e aceitabilidade dos corpos de prova.....	84

3.2.2.5 Resistência à compressão simples (RCS).....	85
3.2.2.6 Índice mini-CBR e expansão .....	86
3.2.2.7 Durabilidade por molhagem e secagem (DMS) .....	86
3.2.2.8 Ensaios de DRX e MEV/EDS .....	86
3.2.2.9 Medida de pH .....	87
3.2.2.10 Verificação da carbonatação com fenolftaleína .....	88
3.2.2.11 Análise estatística.....	88
3.3 Resultados e Discussões.....	89
3.3.1 Propriedades mecânicas e de durabilidade.....	89
3.3.1.1 Resistência à compressão simples (RCS).....	89
3.3.1.2 Índice mini-CBR e expansão .....	89
3.3.1.3 Durabilidade por molhagem e secagem (DMS) .....	90
3.3.2 Ensaios de DRX e MEV/EDS .....	95
3.3.3 Medida de valores de pH.....	99
3.3.4 Verificação da carbonatação com fenolftaleína .....	99
3.3.5 Análise estatística.....	101
3.4 Conclusões .....	105
Referências .....	107
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	112

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 Contextualização do objeto de pesquisa

Devido ao crescimento populacional e à urbanização, as estruturas de obras de engenharia precisam ser construídas frequentemente em locais onde os solos possuem baixa capacidade de suporte. Assim sendo, alguns métodos visando a melhoria ou estabilização mecânica desses materiais, como substituição e tratamentos com materiais cimentícios, precisam ser aplicados para viabilizar a execução das obras de engenharia. A utilização de solos melhorados com cimento Portland é um método eficiente e amplamente utilizado para melhorar as propriedades de engenharia de fundações, aterros, barragens e diques (Ho *et al.*, 2017).

O solo é frequentemente utilizado como matéria prima para a construção de estradas. Nas rodovias de baixo a médio volume de tráfego, esses materiais podem ser utilizados na estrutura do pavimento, sendo comumente aplicados nas camadas de sub-base e/ou base. A qualidade do material a ser aplicado pode variar a depender do grau de intemperismo, decomposição e laterização. Materiais de baixa capacidade de suporte geralmente não são suficientemente resistentes para suportar as cargas impostas pelo tráfego, o que resulta em danos estruturais e colapso precoce da estrutura do pavimento. Portanto, a estabilização do solo com a adição de materiais, como cinzas volantes, cal e cimento, tem provado ser uma alternativa econômica para melhorar as propriedades mecânicas de solos em obras de pavimentação (Nitnara; Pongmuksuwan; Kitisatorn, 2022).

Buscando tornar solos de baixa capacidade de suporte viáveis tecnicamente para aplicação em obras de engenharia, muitos estudos têm sido realizados analisando as melhorias nas propriedades mecânicas ao adicionar a estes solos produtos como a cal (Hossen; Gallant; Ashraf, 2020; Vitale; Deneele; Russo, 2021; Xu *et al.*, 2020), o cimento Portland (Chaiyaput *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2017; Nitnara; Pongmuksuwan; Kitisatorn, 2022; Tsige; Korita; Beyene, 2022), resíduos industriais (Rodrigues *et al.*, 2023), óxido de magnésio (Estabragh *et al.*, 2020), dentre outros.

A estabilização química de solos busca melhorar as propriedades de engenharia ao fazer sua mistura com determinados produtos, prática que garante a otimização no uso dos materiais locais, minimizando assim as distâncias de transporte, fator que pode inviabilizar economicamente um empreendimento de engenharia. Diversos

materiais têm sido usados para a estabilização química de solos, dos quais o cimento Portland e a cal são os mais utilizados, respaldados por uma longa experiência prática e extensos estudos científicos (Rodrigues *et al.*, 2024).

Atualmente, o solo natural tem sido misturado com o cimento Portland para melhorar as suas características mecânicas visando sua utilização em rodovias, principalmente em locais onde há falta de materiais adequados (Chaiyaput *et al.*, 2022).

O melhoramento dos solos de baixa qualidade mecânica com a adição de cimento Portland visando sua aplicação em obras de engenharia é muito importante, pois a estabilização aumenta a resistência ao cisalhamento e reduz a deformação (Tsighe; Korita; Beyene, 2022).

Os teores de cimento para as misturas com solos, que são denominados solos melhorados com cimento (SMC), usualmente estão situados na faixa de 2% a 4%, têm como objetivo principal a modificação do solo no que se refere à plasticidade e sensibilidade à água, sem cimentação acentuada. A partir de maiores teores de cimento, na faixa de 5% a 8%, os solos tendem a ser estabilizados, passando a ser denominados solo-cimento, que apresentam acentuada rigidez à flexão. Ambos, SMC e estabilizados (solo-cimento), podem ser utilizados em camadas de sub-base e/ou base de pavimentos, a depender do cumprimento das exigências mínimas normatizadas para cada camada do pavimento e do método de dimensionamento adotado [Manual de Pavimentação (DNIT, 2006); ES 140 (DNIT, 2022a); ES 142 (DNIT, 2022b); ES 143 (DNIT, 2022c)].

Rodrigues *et al.* (2023), ao perceberem a ausência na literatura científica de um método fundamentado em planejamentos experimentais para a determinação de dosagens otimizadas para misturas, propuseram um método técnico-científico, baseado em um modelo estatístico de planejamento de experimentos em rede simplex-centróide, para misturas solo-resíduos com o objetivo de uso em camadas de pavimentos, de modo a otimizar as contribuições de cada componente e, conseqüentemente, as propriedades de engenharia do produto final. Embora haja na literatura técnico-científica uma grande quantidade de estudos de solos melhorados e estabilizados com cimento Portland (Chaiyaput *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2017; Nitnara; Pongmuksuwan; Kitisatorn, 2022; Tsighe; Korita; Beyene, 2022), ainda há uma lacuna de um método de dosagem de misturas SMC e estabilizados (solo-cimento) que realize uma otimização das propriedades de engenharia de interesse com poucos

experimentos através da variação das porcentagens de cada componente, visando o melhor aproveitamento destes na mistura.

Vale ressaltar que há um método brasileiro de dosagem de solo-cimento, especificado pela NBR 12253 de 2012c, baseado no atingimento de determinado valor da propriedade de resistência à compressão simples (RCS) (2,1 MPa), que sugere teores de cimento a partir de 4% e determinados tipos de solos. Há ainda outro método, denominado como dosagem físico-química de solo-cimento, apresentado pela norma técnica ME 414 (DNIT, 2019), que busca o teor de cimento que satisfaça quimicamente um solo, ou seja, sua aplicação tende a apresentar teores elevados de cimento que sejam suficientes para estabilizar o solo, garantindo matriz contínua de ligações, tal método auxilia na escolha de teores de cimento a serem testados pela resistência mecânica e deformabilidade. Embora a utilização destes métodos, encontrados na literatura técnico-científica, seja importante para direcionar a definição de teores de cimento de acordo com o uso pretendido, há evidente lacuna de um método que possa ser aplicado para qualquer teor de cimento, principalmente teores menores ou iguais a 4% (SMC), que considere o uso de outras propriedades mecânicas de interesse na engenharia de pavimentos (além da RCS) e que possa ser utilizado a qualquer tipo de solo.

O segundo capítulo deste trabalho visa preencher essa lacuna técnico-científica, propondo a utilização de um planejamento experimental em vértices extremos de mistura de SMC de modo a otimizar o teor de cada componente da mistura, visando atingir parâmetros mecânicos mínimos exigidos em camadas de base de pavimentos asfálticos.

Em uma outra perspectiva da presente pesquisa, ressalta-se que estudos atuais têm analisado o efeito da carbonatação no comportamento de solos, usando misturas de solo com materiais aglomerantes, como o cimento, a cal, o óxido de magnésio, dentre outros. A carbonatação é um processo que ocorre em longo prazo no campo e precisa ser conhecida e estudada, pois está intimamente relacionada à durabilidade de materiais à base de cimento, cal, óxido de magnésio, escória de aciaria elétrica primária, dentre outros (Estabragh *et al.*, 2020; Ho *et al.*, 2017; Hossen; Gallant; Ashraf, 2020; Rodrigues, 2022; Vitale; Deneele; Russo, 2021; Xu *et al.*, 2020). Assim sendo, a segunda proposição deste trabalho se enquadra no contexto de avaliar o efeito da carbonatação em misturas de SMC, ou seja, com teor de cimento variando

de 2% a 4%, no que diz respeito à durabilidade e à parâmetros mecânicos importantes na engenharia de pavimentos.

A carbonatação em materiais cimentícios consiste em uma reação dos produtos hidratados, especialmente o hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  (também conhecido como portlandita, cuja abreviatura é CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que estão dissolvidos na água dos poros, com o  $\text{CO}_2$  do ambiente, formando o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), também conhecido como calcita. Em materiais à base de cimento, não armados, a reação de carbonatação pode ser considerada positiva, pois o produto desta reação ( $\text{CaCO}_3$ ) apresenta maior volume que o CH, e isso faz com que haja um aumento na resistência devido ao preenchimento dos poros do material, diminuindo a porosidade e, conseqüentemente, aumentando a durabilidade. Ainda, ocorre uma redução do pH na solução dos poros em função do consumo de OH presente no CH (Sella, 2022).

Estabragh *et al.* (2020) estudaram o efeito da carbonatação induzida no comportamento de um solo argiloso estabilizado com óxido de magnésio (MgO) e perceberam que, à medida em que foi aumentada a intensidade da pressão de aplicação do dióxido de carbono nas amostras, a resistência aumentou em um curto espaço de tempo. Portanto, a carbonatação pode produzir aumento na resistência nas primeiras idades de cura, nas condições de exposição ao ar ( $\text{CO}_2$ ), de misturas solo-cimento, no entanto, no decorrer do tempo, a contribuição da carbonatação para o desenvolvimento de resistência pode diminuir em função da possível carbonatação de C-S-H ao invés de CH, visto ser as interações químicas no composto C-S-H mais fortes que no CH (Ho *et al.*, 2017).

Entende-se, portanto, que o desenvolvimento de uma metodologia que busca uma mistura otimizada através de um planejamento experimental de misturas para SMC, aliado ao estudo da carbonatação do produto final, verificada a sua influência através de parâmetros mecânicos, de durabilidade e de análises químicas, mineralógicas e microestruturais, contribuem para difundir e complementar o conhecimento técnico-científico na área de aplicação de SMC no âmbito da engenharia de pavimentação.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho de pesquisa foram:

- ✓ a proposição de uma metodologia para determinação de uma dosagem ótima, através de planejamento experimental de misturas, para SMC, fundamentada em propriedades mecânicas relacionadas ao seu uso em obras de pavimentação (RCS e CBR);
- ✓ a avaliação do efeito da carbonatação da mistura otimizada por meio de parâmetros derivados de ensaios mecânicos (RCS, mini-CBR), de durabilidade (DMS) e de análises complementares subsidiadas por dados de ensaios químicos (EDS, pH, Fenolftaleína), mineralógicos (DRX) e microestruturais (MEV).

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Este trabalho de pesquisa está organizado em 4 capítulos, conforme detalhado na sequência:

- Capítulo 1: consiste no capítulo de Introdução Geral, no qual se apresenta uma contextualização do tema e do objeto de pesquisa, seguida da definição dos objetivos da pesquisa e da forma pela qual o presente trabalho está organizado;
- Capítulo 2: apresenta um estudo para a determinação da dosagem ótima de SMC através da metodologia de planejamento experimental em vértices extremos, baseada na otimização das propriedades mecânicas CBR e RCS com o menor teor de cimento possível;
- Capítulo 3: apresenta um estudo do efeito da carbonatação da mistura otimizada de SMC fundamentado em resultados de ensaios mecânicos, de durabilidade, químicos, mineralógicos e microestruturais;
- Capítulo 4: são apresentadas as conclusões e discussões finais deste trabalho.

## Referências

CHAIYAPUT, S. *et al.* Effect of curing conditions on the strength of soil cement. **Case Studies in Construction Materials**, 16, p. e01082, 2022/06/01/ 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 140**: Sub-base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Brasília: DNIT, 2022a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 142**: Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Brasília: DNIT, 2022b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 143**: Base de solo-cimento – Especificação de serviço. Brasília: DNIT, 2022c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-IPR 719**: Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 414**: Pavimentação – Solo-Cimento – Dosagem físico-química de solo-cimento – Método de ensaio. Brasília: DNIT, 2019.

ESTABRAGH, A. R. *et al.* Effect of forced carbonation on the behaviour of a magnesia-stabilised clay soil. **International Journal of Pavement Engineering**, 23, n. 5, p. 1691-1705, 2020.

HO, L. S. *et al.* Strength development of cement-treated soils: Effects of water content, carbonation, and pozzolanic reaction under drying curing condition. **Construction and Building Materials**, 134, p. 703-712, 2017/03/01/ 2017.

HOSSEN, S. B.; GALLANT, A. P.; ASHRAF, W. Elemental testing of carbonated silty sand treated with lime. In: **Geo-Congress 2020**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. p. 562-571.

NITNARA, P.; PONGMUKSUWAN, P.; KITISATORN, W. Development of polymer binder for properties enhancement of soil cement. **Materials Today: Proceedings**, 57, p. 975-979, 2022/01/01/ 2022.

RODRIGUES, K. H. d. P. **Utilização de Resíduos Industriais na estabilização de solos tropicais para aplicação em pavimentação**. 2022. (Doutorado) -, Universidade Federal de Viçosa.

RODRIGUES, K. H. d. P. *et al.* Experimental study of mixtures soil-industrial waste using simplex design for application in paving. **Journal of Building Engineering**, 78, p. 107761, 2023/11/01/ 2023.

RODRIGUES, K. H. d. P. *et al.* Effect of carbonation of soil-slag mixtures on the resilient behaviour and structural response of an asphalt pavement. **Road Materials and Pavement Design**, p. 1-20, 2024.

SELLA, D. C. N. **Capacidade de Captura de CO<sub>2</sub> em Matrizes à Base de Cimentos LC<sup>3</sup> por meio da Carbonatação Acelerada**. 2022. (Mestrado) -, Universidade Federal da Integração Latino-Americana.

TSIGE, D.; KORITA, M.; BEYENE, A. Deformation analysis of cement modified soft clay soil using finite element method (FEM). **Heliyon**, 8, n. 6, 2022.

VITALE, E.; DENELE, D.; RUSSO, G. Effects of carbonation on chemo-mechanical behaviour of lime-treated soils. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 80, n. 3, p. 2687-2700, 2021/03/01 2021.

XU, L. *et al.* Experimental Investigation on Carbonation Behavior in Lime-Stabilized Expansive Soil. **Advances in Civil Engineering**, 2020, n. 1, p. 7865469, 2020.

## 2 DOSAGEM DE SOLOS TROPICAIS MELHORADOS COM CIMENTO ATRAVÉS DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL EM VÉRTICES EXTREMOS

**Resumo:** O uso de solos tropicais compactados em camadas de pavimentos asfálticos é muito comum, sendo frequentemente necessária a melhoria destes solos com materiais aglomerantes, a depender dos requisitos de projeto. Para o caso de tráfego pesado, no uso em camadas de base, pode ser necessário o melhoramento destes solos com outros materiais, sendo a adição de cimento Portland uma excelente opção. A dosagem adequada de solo com cimento para obras de engenharia é fundamental para o melhor aproveitamento de solos tropicais regionais, sendo desejável a adoção de uma metodologia de dosagem que considere os efeitos das interações entre os diversos componentes da mistura, analisando simultaneamente várias propriedades de engenharia intervenientes na sua resposta estrutural. Neste contexto, ao perceber-se a ausência de métodos normatizados para a dosagem de solos melhorados com cimento (SMC) (teores menores ou iguais a 4%), ou seja, na literatura técnico-científico encontram-se apenas métodos de dosagem de solo-cimento, limitados quanto à granulometria, teores de cimento e propriedades mecânicas consideradas. A metodologia de planejamento experimental em vértices extremos foi a solução proposta para a determinação da mistura de SMC relativa à dosagem ótima, de modo a preencher tal lacuna. Os materiais utilizados foram dois tipos de solos tropicais típicos da região da Zona da Mata de Minas Gerais [S1 (argiloso) e S2 (arenoso)] e cimento Portland. Para a proposição e aplicação da metodologia de dosagem, utilizou-se o *software* Minitab 18, sendo geradas 9 misturas que foram avaliadas segundo as propriedades mecânicas de resistência à compressão simples (RCS) e índice de suporte California (CBR), sendo os corpos de prova compactados na energia Proctor modificada e submetidos à cura selada por 7 dias. O teor de cimento nas misturas variou de 2% a 4%. Através da função desejabilidade, determinou-se a dosagem ótima, tomando-se por alvos os valores mínimos de RCS = 2,1 MPa e CBR = 80%. A dosagem ótima obtida foi, em relação à massa seca total da mistura, 3,30% de cimento, 76,70% de solo S1 e 20,00% de solo S2. Os valores obtidos das propriedades mecânicas avaliadas para a dosagem ótima foram RCS = 1,94 MPa e CBR = 164,36%. As equações de regressão geraram, para as propriedades mecânicas,  $R^2 = 76,84$ , para o RCS, e  $R^2 = 98,92$ , para o CBR. Houve formação de compostos cimentícios, o que pôde ser comprovado pelos ensaios de

difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura/espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS).

**Palavras-chave:** solo melhorado com cimento; planejamento experimental em vértices extremos; otimização de misturas; pavimentação.

**Abstract:** The use of compacted tropical soils in asphalt pavement layers is very common, often requiring the improvement of these soils with binding materials depending on project requirements. For heavy traffic applications, particularly in base layers, the enhancement of these soils with other materials may be necessary, with Portland cement being an excellent option. The proper design of soil-cement mixtures for engineering works is essential to maximize the use of regional tropical soils. It is desirable to apply a design methodology that considers the effects of interactions between various components of the mixture, simultaneously analyzing multiple engineering properties affecting its structural response. In this context, the lack of standardized methods to design cement-improved soils (CIS) (cement content less than or equal to 4%) was identified. The existing technical and scientific literature offers soil-cement design methods that are limited in terms of particle size distribution, cement content, and mechanical properties. The experimental design methodology using extreme vertices was proposed as a solution to determine the optimal CIS mixture, thereby addressing this research gap. The materials used in this work were two types of typical tropical soils from the Zona da Mata region of Minas Gerais [S1 (clayey) and S2 (sandy)] and Portland cement. For the development and application of the design methodology, Minitab 18 software was employed, generating nine mixtures that were evaluated for their mechanical properties, including unconfined compressive strength (UCS) and California Bearing Ratio (CBR). The specimens were compacted using modified Proctor energy and subjected to sealed curing for seven days. The cement content of the mixtures ranged from 2% to 4%. Using the desirability function, the optimal dosage was determined, targeting minimum values of UCS = 2.1 MPa and CBR = 80%. The optimal dosage obtained in this research, relative to the total dry mass of the mixture, consisted of 3.30% cement, 76.70% soil S1, and 20.00% soil S2. The mechanical properties evaluated for the optimal dosage yielded UCS = 1.94 MPa and CBR = 164.36%. Regression equations produced coefficients of determination of  $R^2 = 76.84$  for UCS and  $R^2 = 98.92$  for CBR. The formation of cementitious compounds was confirmed through X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy/energy-dispersive spectroscopy (SEM/EDS) analyses.

**Keywords:** cement-improved soil; extreme vertices experimental design; mixture optimization; paving.

## 2.1 Introdução

Classificações tradicionais de materiais geotécnicos (ASTM, 2020; ASTM, 2024; DNIT, 2006) para uso em rodovias, que foram desenvolvidas para ambientes de clima temperado e não tropical, indicam que os materiais habilitados para usos nas camadas mais nobres do pavimento (base e sub-base) devem ser essencialmente granulares, com valores mínimos de CBR (Índice de Suporte Califórnia) para sub-base e base de 30% e 80%, respectivamente, considerando tráfego pesado. Para os limites de consistência, são indicados valores de LL (limite de liquidez) menores que 25% e de IP (índice de plasticidade) menores que 6% para os materiais destinados à base de pavimentos. Sob esta perspectiva, solos finos tropicais, embora possam apresentar bom desempenho mecânico, poderão ser descartados para uso em base e sub-base pelas classificações tradicionais (Sousa; Motta; Coutinho, 2021).

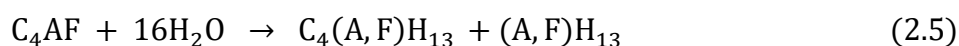
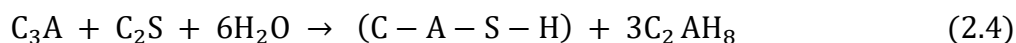
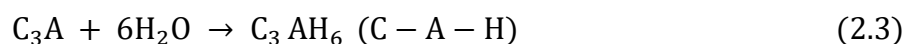
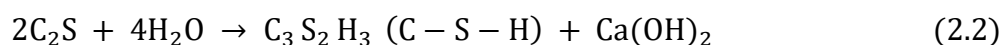
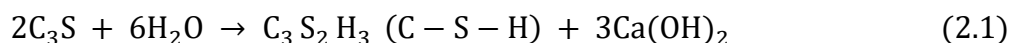
Sousa, Motta e Coutinho (2021) estudaram solos tropicais com comportamento laterítico segundo a classificação brasileira MCT [(M - Miniatura; C – Compactado; T – Tropical) - CLA 259 (DNIT, 2023a)] para uso em sub-base e base de pavimentos flexíveis, em misturas com outros materiais e/ou produtos. Os pesquisadores realizaram simulações de estruturas de pavimentos através do método mecanístico-empírico MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos), sendo possível perceber que o uso de solos finos tropicais em sub-base (no caso de tráfegos médio e pesado) e base (no caso de tráfego leve) de pavimentos flexíveis pode ser tecnicamente viável.

No caso de uso de solos tropicais finos em camadas de base, ainda que estes materiais possuam excelente desempenho mecânico, é recomendável, para tráfego pesado, o melhoramento geotécnico do material. O emprego de cimento Portland é uma solução adequada para promover modificações nas propriedades físico-químicas necessárias para viabilizar tecnicamente a aplicação destes materiais (De Souza Junior *et al.*, 2022).

A estabilização química de solos visa aprimorar suas propriedades de engenharia por meio da mistura com determinados produtos, otimizando o uso de materiais locais e reduzindo a necessidade de transporte, o que é essencial para a viabilidade econômica de projetos de engenharia de solos, como os de pavimentação. O cimento Portland e a cal, tradicionais na estabilização química de solos, são os produtos mais

utilizados, devido à longa experiência prática e muitos estudos científicos (Rodrigues *et al.*, 2024).

O cimento Portland resulta da moagem de um produto denominado clínquer, que é constituído pelos seguintes compostos: silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato dicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ), onde C é o CaO (óxido de cálcio), S é o  $SiO_2$ , A é o  $Al_2O_3$  e F é o  $Fe_2O_3$ . Tais compostos reagem com a água, gerando o hidróxido de cálcio [ $Ca(OH)_2$ ] (também conhecido como portlandita, cuja abreviatura é CH), o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o aluminato de cálcio hidratado (C-A-H), o sílicoaluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) e o ferroaluminato de cálcio hidratado [ $(C_4(A,F)H_x)$ ], onde H representa o  $H_2O$ , conforme as Equações 2.1 a 2.5 (Barman; Dash, 2022; Chaiyaput *et al.*, 2022; Rodrigues, 2022).



Os estudos de dosagens de misturas de materiais para uso em pavimentação, tradicionalmente, são realizados pelo monitoramento de um fator (componente da mistura) por vez, fazendo variar o nível (proporção do fator na mistura) e observando sua influência na resposta de uma propriedade de engenharia (variável resposta). Assim sendo, enquanto o nível de um fator é alterado, os demais são mantidos constantes, e, como consequência, estas técnicas não possibilitam a avaliação dos efeitos das interações entre os componentes, e as análises tornam-se mais complicadas quando se busca a influência dos componentes da mistura (em diversos níveis) em várias propriedades de engenharia, simultaneamente. Logo, a combinação de muitos fatores, em vários níveis, e diversas variáveis resposta faz com que o estudo se torne extenso e inviável, com muitos experimentos, daí a necessidade da realização de métodos mais eficientes. O planejamento de experimentos permite obter

bons resultados com poucos experimentos, possibilitando uma melhor relação entre os níveis de diferentes fatores e suas correlações com as respostas almejadas (Galindo *et al.*, 2024).

Como exemplo de método de dosagem de solo-cimento para camadas de pavimento, fundamentado em base empírica que busca o teor mínimo de cimento capaz de garantir uma resistência mínima à compressão simples (RCS) de 2,1 MPa, tem-se a norma técnica NBR 12253 (ABNT, 2012c). Esta norma se aplica a solos que se enquadrem nos grupos A1, A2, A3 e A4 da classificação TRB (AASHTO, 2021) e atendam a determinados requisitos granulométricos (Rodrigues *et al.*, 2023). O teor de cimento sugerido varia de 4% a 7%, conforme a classificação do solo. Percebe-se que a norma é limitada para determinadas granulometrias de solos, ou seja, não considera o uso de solos finos, não sugere teores menores de cimento e condiciona a estabilização do material levando em conta apenas uma propriedade mecânica (RCS).

Outro exemplo de método de dosagem de solo-cimento, denominado como dosagem físico-química de solo-cimento, da norma técnica ME 414 (DNIT, 2019), busca o teor de cimento que satisfaça quimicamente um solo, ou seja, sua aplicação tende a apresentar teores elevados de cimento, sendo suficientes para estabilizar o solo, garantindo assim uma matriz contínua de ligações, este método auxilia na escolha de teores de cimento a serem testados pela resistência mecânica e deformabilidade.

Tais métodos de dosagem, encontrados na literatura técnico-científica, são fundamentais para direcionar a definição de teores de cimento em misturas de solo-cimento, no entanto há evidente lacuna de um método que possa ser aplicado para qualquer teor de cimento, principalmente teores menores ou iguais a 4% (SMC), e que ainda considere no estudo de dosagem outras propriedades mecânicas de interesse na engenharia de pavimentos (além da RCS) e que possa ser utilizado a qualquer tipo de solo.

O planejamento de experimentos, que é uma técnica que busca estudar o efeito de diversos fatores sobre uma variável resposta de interesse, utilizando modelos matemáticos e estatísticos que descrevem o comportamento do sistema estudado, é uma excelente alternativa para aplicação à dosagem de SMC, almejando assim suprir a lacuna já evidenciada anteriormente (Rodrigues *et al.*, 2023).

Vários tipos de planejamento de experimentos foram utilizados em pesquisas científicas em diversas áreas do conhecimento, dentre as quais citam-se: método de Taguchi, planejamento composto central, misturas (vértices extremos, simplex-centróide, simplex-lattice), planejamento ótimo, dentre outros (Alaneme *et al.*, 2021; Aleisa; Heijungs, 2020; Chen *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2021; Yıldırım; Karacasu; Okur, 2020; Yildizel; Tayeh; Calis, 2020).

No planejamento experimental de misturas, a composição da maioria dos sistemas multicomponentes é restrita por condições de contorno (porcentagem limite na mistura) superiores, inferiores ou ambas, ou seja, a variação do percentual de cada componente nem sempre pode ser de 0 a 100%. Quando os materiais de uma mistura possuem essas restrições de porcentagem, eles passam a ser denominados de pseudocomponentes (Ding *et al.*, 1999).

A área experimental do planejamento de misturas em vértices extremos admite polígonos irregulares de diversas formas, como, por exemplo, a de um trapézio. Isto ocorre quando os limites inferiores e superiores de algum componente da mistura não são proporcionais em relação aos dos demais componentes. Ao contrário do planejamento experimental em vértices extremos, os do tipo simplex-centróide e simplex-lattice mantêm a proporção dos limites dos componentes ou pseudocomponentes iguais, formando triângulos equiláteros, por exemplo, no caso de misturas com 3 componentes (Coscione; Andrade; May, 2005; Ding *et al.*, 1999; Novaes *et al.*, 2018; Rodrigues, 2022).

O planejamento experimental em vértices extremos aplicado às misturas tem como objetivo definir uma dosagem ótima, considerando determinadas propriedades que se desejam atingir, minimizar ou maximizar, evitando que as proporções dos materiais usados nas misturas sejam definidas por tentativas e erros. As misturas podem apresentar restrições, como limites superiores e/ou inferiores, e a soma dos componentes deve atingir o valor de 100% (Dutra de Lima, 2022).

A proporção de cada componente no planejamento de experimentos é calculada usando a Equação 2.6:

$$L_i \leq x_i \leq U_i \text{ (para } i = 1, 2, 3 \dots, n), x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1 \quad (2.6)$$

Onde:  $L_i \geq 0$  e  $U_i \leq 1$ . Sendo que:  $L_i$  e  $U_i$  representam os limites inferiores e superiores do  $i$ -ésimo componente, respectivamente.

Buscando prever a otimização da variável resposta (propriedade estudada), é necessário que uma equação de regressão polinomial seja estimada. Por meio da superfície de resposta gerada pela equação, pode-se encontrar regiões de maximização e/ou minimização de cada propriedade, dentro dos limites desejados (Rodrigues *et al.*, 2023).

Os modelos matemáticos mais utilizados no planejamento experimental podem ser do tipo linear (Equação 2.7), quadrático (Equação 2.8), cúbico completo (Equação 2.9) e cúbico especial (Equação 2.10). Para uma mistura com três componentes, as Equações 2.7 a 2.10 descrevem cada tipo de modelo, respectivamente:

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (2.7)$$

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (2.8)$$

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{12}x_1x_2(x_1-x_2) + b_{13}x_1x_3(x_1-x_3) + b_{23}x_2x_3(x_2-x_3) + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (2.9)$$

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (2.10)$$

Onde:  $b_i$  são constantes do modelo e  $x_i$  são as proporções de cada componente da mistura.

Nas Equações 2.7 a 2.10, a constante  $b_1$  é o valor da variável resposta (propriedade analisada) quando a proporção do componente  $x_1$  é a máxima na mistura, ou seja 1 (100%). Já a constante  $b_{13}$ , que representa a interação entre os componentes  $x_1$  e  $x_3$ , quando é positiva indica sinergia entre os componentes, ou seja, a interação entre eles contribui para o aumento da variável resposta, e quando tal constante é negativa, indica redução da variável resposta (Montgomery, 2017).

Os pontos que representam as diversas misturas a serem analisadas dentro do planejamento experimental devem ser testados para as propriedades que se buscam estudar. Para cada propriedade, deve-se obter funções polinomiais que descrevem o seu comportamento em função dos componentes das misturas. A busca por misturas que atendam a determinados valores para todas as propriedades estudadas, simultaneamente, é obtida pela função desejabilidade. Este recurso então é utilizado

para determinar a melhor dosagem de componentes para otimizar as propriedades desejadas (Rodrigues *et al.*, 2023). A função desejabilidade terá valores variando de 0 a 1. O valor será 1 quando a variável resposta atingir o objetivo ou alvo, e será 0 se estiver fora do aceitável (Khoobbakht *et al.*, 2020; Yildirim; Karacasu; Okur, 2020).

Diversos estudos têm sido realizados utilizando planejamento experimental de misturas na engenharia de materiais. Ding *et al.* (1999) avaliaram a resistência à compressão de um concreto cujo sistema aglutinante foi uma mistura de três componentes: cimento, cinza volante e zeólita. Utilizando planejamento em vértices extremos, os pesquisadores verificaram uma boa precisão da equação de regressão a partir de apenas nove pontos experimentais.

Yildirim, Karacasu e Okur (2020) buscaram otimizar o método *Marshall*, usando o método de planejamento de experimentos composto central, com quantidades bem reduzidas de amostras (corpos de prova). Neste estudo, seriam necessários moldar e ensaiar 126 corpos de prova utilizando o método tradicional, enquanto que, utilizando o método de planejamento composto central, apenas 30 foram suficientes.

Yildizel, Tayeh e Calis (2020) estudaram a otimização de materiais para a confecção de concreto reforçado com fibra de vidro (para utilização em painéis de fachadas, paredes, revestimentos, elementos ornamentais, dentre outros usos) através dos métodos Taguchi, ANOVA (análise de variância) e vértices extremos. Com a confecção de 16 misturas, as propriedades mecânicas de resistência à compressão e resistência à tração na flexão foram testadas, sendo possível otimizar os resultados.

Onyelowe (2017) estudou a otimização do CBR de solos lateríticos tratados com cinza de papel de resíduos através do método simplex, obtendo, então, o melhor resultado possível através das equações de regressão geradas.

Onyelowe *et al.* (2019) estudaram diversas misturas para produção de concretos, asfaltos e solos melhorados com pó de pedra, utilizando o planejamento em vértices extremos para demonstrar como formular as restrições, projetar o espaço de fatores, projetar as proporções de misturas e validar os modelos resultantes.

Alaneme *et al.* (2021) estudaram a otimização de propriedades mecânicas, resistência à compressão simples (RCS) e CBR, de um solo expansivo melhorado com poeira de forno de cimento para uso em sub-base de pavimentos de baixo volume de tráfego, utilizando o planejamento experimental em vértices extremos, sendo que,

através da função desejabilidade, foi possível encontrar a solução ótima que maximizou as respostas mecânicas.

Rodrigues *et al.* (2021) estudaram misturas de solos com escória de forno panela e cinza volante, visando maximizar a RCS, utilizando o método simplex-lattice. Foi possível projetar misturas experimentais e reduzir o número de ensaios para obter um modelo de resposta. O método se mostrou eficaz, sendo viável a obtenção de uma mistura ótima para maximizar a propriedade RCS.

Rodrigues *et al.* (2023) apresentaram um estudo experimental sobre a estabilização química de duas amostras de solos tropicais, usando escória de forno elétrico a arco e cinza volante para uso em pavimentação. As propriedades mecânicas avaliadas foram RCS, CBR e Módulo de Resiliência (MR), através do planejamento experimental em rede simplex-centróide, sendo a função desejabilidade utilizada para otimizar a mistura com quantidades reduzidas de ensaios.

Nos projetos de engenharia rodoviária, é fundamental a determinação das melhores proporções entre os materiais disponíveis para uso em camadas de pavimentos. Portanto, a dosagem correta que garanta os melhores resultados mecânicos é sempre almejada. A disponibilidade de um método que seja adequado a todo tipo de material e que tenha capacidade de analisar diversas propriedades mecânicas torna os resultados mais assertivos, garantindo alta qualidade nos pavimentos. Assim sendo, este estudo buscou propor uma metodologia viável para dosar misturas que poderão ser especificadas em projetos de excelência técnica, conforme a necessidade local.

À luz do que foi previamente apresentado, percebe-se que existem muitos estudos utilizando o planejamento experimental para uso na engenharia de materiais, contudo a utilização da técnica de planejamento experimental em misturas de SMC para uso em camadas estruturais de pavimentos ainda é pouco utilizada e estudada, constituindo-se uma lacuna na literatura técnico-científica no âmbito da engenharia de pavimentação. Neste contexto, este trabalho buscou auxiliar no preenchimento desta lacuna, de forma a ser útil na proposição de uma metodologia de dosagem eficiente de misturas de SMC para fins de uso em projetos de engenharia rodoviária.

## 2.2 Materiais e métodos

### 2.2.1 Materiais

#### 2.2.1.1 Solos

As amostras de solos utilizadas neste estudo foram provenientes de jazidas localizadas no município de Viçosa, região da Zona da Mata, estado de Minas Gerais, Brasil. Foram utilizadas duas amostras de solos, uma com predominância de partículas de tamanho argila (S1) e outra com predominância de partículas de tamanho areia (S2). A amostra S1 apresenta coloração avermelhada, e a amostra S2 apresenta coloração esbranquiçada.

Conforme o procedimento PRO 003 (DNER, 1994), as referidas amostras de solos foram coletadas no estado deformado, mediante escavação com ferramenta manual. Posteriormente, foram armazenadas e transportadas em tonéis (bombonas) adequadamente vedados até o Laboratório de Engenharia Civil (LEC) pertencente ao Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). A norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2024) foi utilizada para a preparação das amostras de solo visando a realização dos ensaios de caracterização geotécnica e de compactação.

Os ensaios realizados para fins de caracterização e posterior classificação geotécnicas das amostras de solo foram:

- i) Granulometria conjunta, conforme a norma técnica NBR 7181 (ABNT, 2018b);
- ii) Limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), conforme as normas técnicas NBR 6459 (ABNT, 2017c) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente;
- iii) Massa específica dos grãos do solo ( $\rho_s$ ), conforme a norma técnica NBR 6458 (ABNT, 2017b).

As amostras de solos S1 e S2 foram classificadas segundo a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), de acordo com a CLA 259 (DNIT, 2023a), e segundo os sistemas de classificação de solos TRB (*Transportation Research Board*), conforme a M 145-91 (AASHTO, 2021), e USC (*Unified Soil Classification*), conforme a D2487 (ASTM, 2020).

Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 2.1.

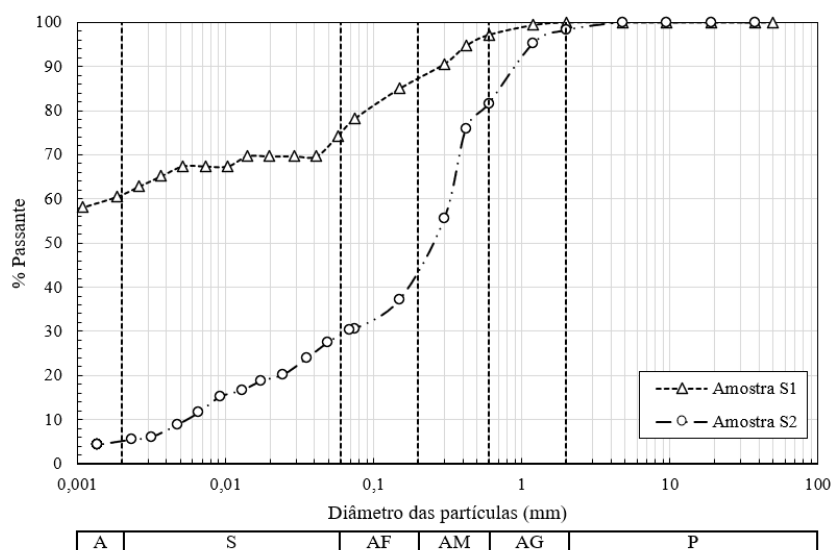
Tabela 2.1: Caracterização e classificação geotécnicas dos solos.

Parâmetro	S1	S2
% argila ( $\phi^* < 0,002$ mm)	61	5
% silte ( $0,002$ mm $< \phi < 0,06$ mm)	14	24
% areia ( $0,06$ mm $< \phi < 2$ mm)	25	68
% pedregulho ( $2$ mm $< \phi < 60$ mm)	0	3
LL (%)	78	36
LP (%)	43	18
IP* (%)	35	18
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,869	2,657
TRB	A-7-5 (20)	A-2-6 (1)
USC	MH	SC
MCT	LG'	NA'

\*:  $\phi$  – Diâmetro das Partículas do Solo; IP – Índice de Plasticidade.

A Figura 2.1 apresenta as curvas de distribuição granulométrica referentes às duas amostras de solo, sendo possível observar que a amostra de solo S1 possui elevado teor de argila (argila areno-siltosa) em sua composição e que a amostra de solo S2 (areia silto-argilosa) possui elevado teor de areia.

Figura 2.1: Curvas granulométricas dos solos\*.



\*: A – Argila; S – Silte; AF – Areia Fina; AM – Areia Média; AG – Areia Grossa; e P – Pedregulho.

Através da técnica de fluorescência de raios-X (FRX), foram obtidas informações em relação à composição química dos solos, seguindo os procedimentos da norma ISO/TR 18336 (ABNT, 2022). Na Tabela 2.2, são apresentados os resultados, inclusive os percentuais de perda ao fogo.

Tabela 2.2: Composição química obtida pela FRX dos solos S1 e S2.

Material	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Cl (%)	Outros compostos (%)	PF* (%)
S1	27,11	24,52	12,47	0,02	1,28	0,07	1,55	1,53	0,04	0,27	31,14	11,49
S2	36,27	24,31	1,92	0,17	1,41	1,30	2,40	0,18	0,03	0,22	31,79	4,19

\*Perda ao fogo.

Através do ensaio de difração de raios-X (DRX), foram obtidos dados mineralógicos das amostras dos solos, sendo realizadas medidas teta-2teta na faixa de 5 a 80 graus, utilizando passo de 0,05 graus, com 1 segundo por passo. O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios-X, da marca Brucker, modelo D8 DISCOVER, localizado no Laboratório de Difração de Raios-X, no Departamento de Física (DEF) da UFV. Os resultados são apresentados nas Figuras 2.2 e 2.3.

Figura 2.2: Difratograma da amostra de solo S1.

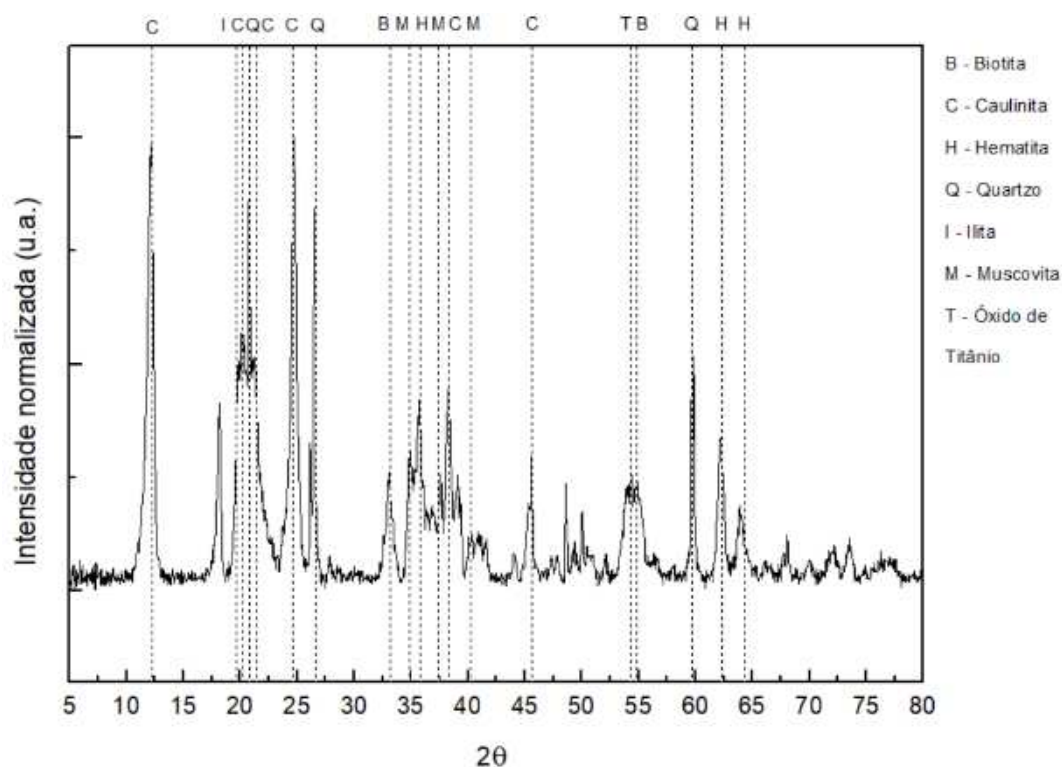
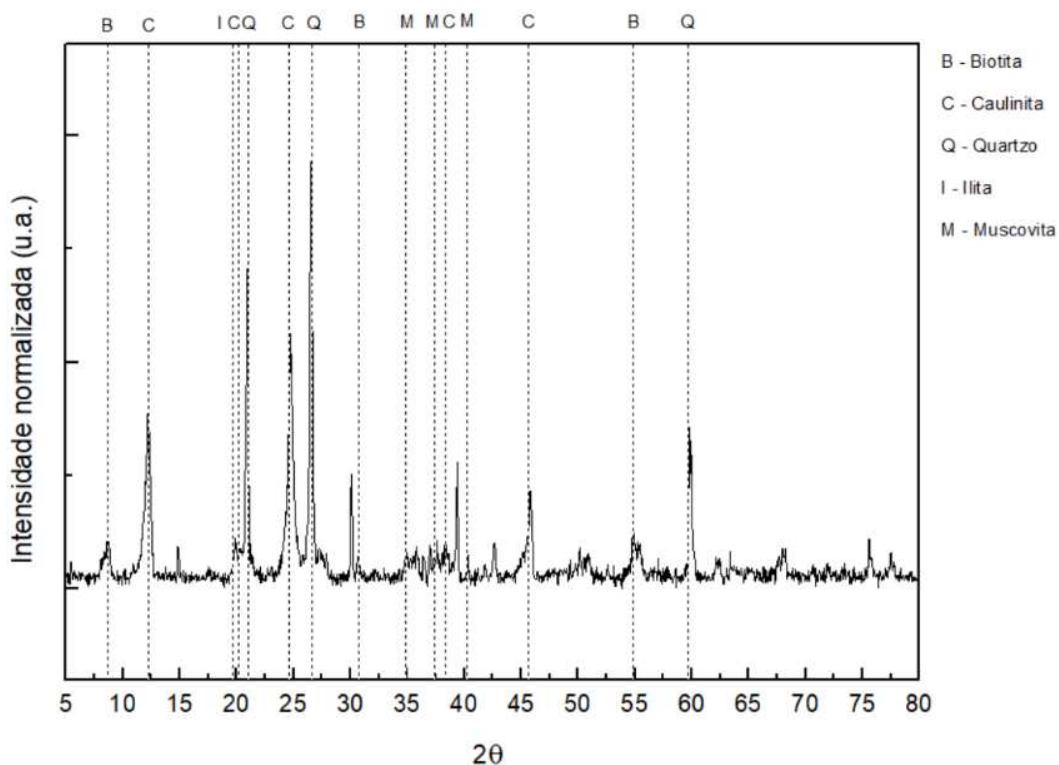


Figura 2.3: Difratoograma da amostra de solo S2.



Pode-se observar, no solo S1, a predominância dos elementos químicos silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe), nas formas de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) (sílica/quartzo), caulinita e hematita, que é o principal composto relacionado à coloração vermelha do material. Interessante notar que os elementos Si, Al e Fe encontrados no solo S1 são considerados os constituintes químicos mais importantes dos solos lateríticos, confirmando a classificação MCT, que indicou o solo como argiloso com comportamento laterítico (LG') (Borba, 1984). Vale ressaltar que a presença do titânio (Ti) através do dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), no percentual de 1,53%, confirma a indicação de que o solo S1 se encontra em processo de laterização, visto ser muito recorrente a presença deste composto em solos lateríticos em percentuais elevados, podendo chegar em até 7,00% (Araújo, 2022; Borba, 1984; Franco, 2012; Martinez, 2003).

A amostra de solo S2, de coloração clara, possui predominância dos elementos Si e Al, nas formas de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) (sílica/quartzo) e caulinita, sendo que o percentual de Si, na forma de  $\text{SiO}_2$ , é superior em relação aos demais elementos encontrados no material. A caulinita, presente na amostra de solo S2, é um silicato de alumínio hidratado que pode ser o composto relacionado à coloração esbranquiçada do solo (Rodrigues, 2022).

Através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível obter características microestruturais das amostras dos solos S1 e S2 (Figuras 2.4 e 2.5). O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura, da marca JEOL, modelo JSM-6010LA, localizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, no DEF da UFV.

A amostra S1 apresentou granulação fina com grãos de diâmetros em torno de 2  $\mu\text{m}$  na forma lamelar [Figura 2.4(b)], tendo estrutura mais compacta, ao compará-la à estrutura da amostra S2, devido ao efeito da agregação de suas partículas através dos óxidos de ferro e alumínio [Figura 2.4(a)]. Na amostra S2, foi possível observar grãos maiores que 100  $\mu\text{m}$  [Figura 2.5(a)], de forma cúbica, sendo que seus grãos finos apresentaram formas lamelares e prismáticas [Figura 2.5(b)] (Rodrigues, 2022).

Figura 2.4: Micrografias do solo S1: (a)x100; (b)x10.000.

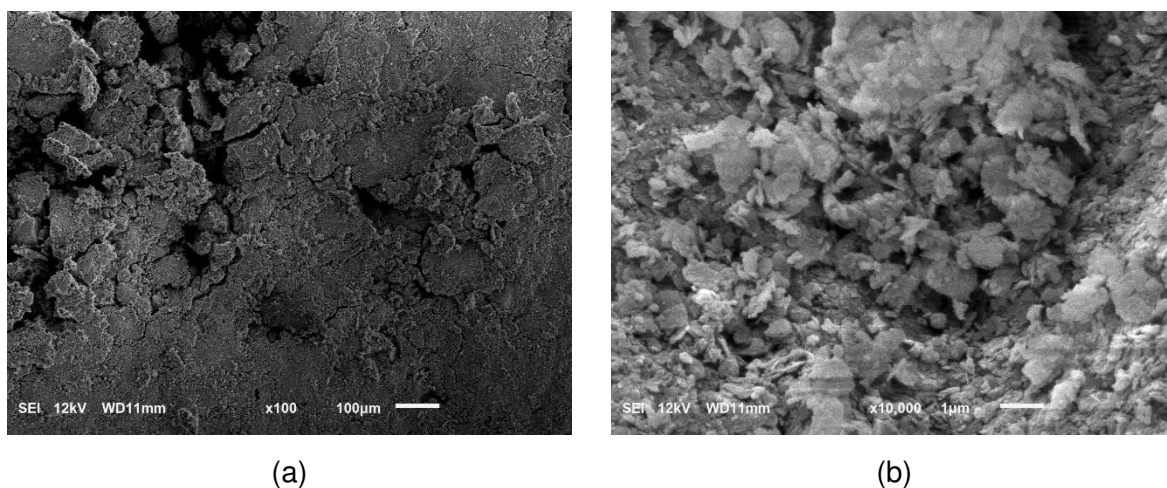
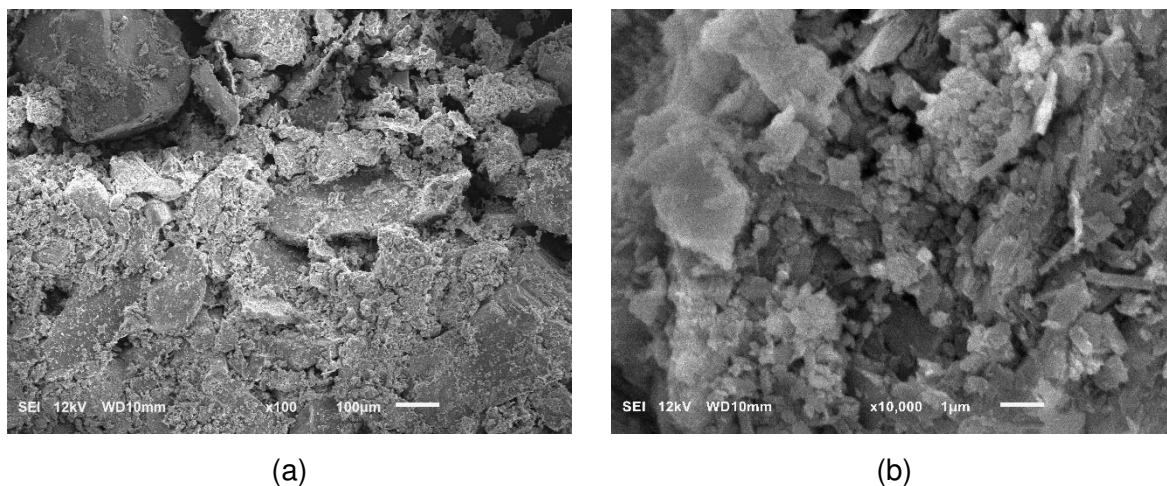


Figura 2.5: Micrografias do solo S2: (a)x100; (b)x10.000.



Também foi realizado o ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), conforme a norma E1508-12a (ASTM, 2019), objetivando determinar os elementos químicos presentes nas amostras S1 e S2 (Tabela 2.3). Os dados obtidos no FRX foram coerentes com os obtidos por EDS, ou seja, a amostra S1 possui predominância do elemento Fe em relação à amostra S2 que, por sua vez, apresenta maior percentual de Si em relação à amostra S1.

Tabela 2.3: Elementos químicos presentes nas amostras de solo S1 e S2.

Fórmula química	% em massa	
	S1	S2
C	9,39	9,94
O	39,89	41,58
Al	19,42	20,90
Si	16,07	23,77
Fe	15,22	-
Mg	-	0,82
K	-	3,00

### 2.2.1.2 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado na pesquisa foi adquirido em uma casa de materiais de construção em Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil, sendo do tipo CII-E-32. Esse tipo de cimento foi definido por sua facilidade de obtenção no mercado de materiais de construção em diversos locais do país.

Os ensaios para a caracterização física das amostras de cimento Portland foram:

- i) Índice de finura por peneiramento na peneira 75  $\mu\text{m}$  (n.º 200), conforme a norma técnica NBR 11579 (ABNT, 2013);
- ii) Superfície específica, conforme a norma técnica NBR 16372 (ABNT, 2015);
- iii) Massa específica, determinada com o emprego do frasco volumétrico de *Le Chatelier*, conforme a norma técnica NBR 16605 (ABNT, 2017a).

Os resultados e exigências, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018a), destes ensaios são apresentados na Tabela 2.4:

Tabela 2.4: Caracterização física do cimento Portland.

Propriedades	Resultados	Exigências (ABNT-NBR 16697, 2018a)
Índice de finura (%)	0,62	≤ 12,00
Superfície específica (m <sup>2</sup> /kg)	178,58	-
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,91	-

## 2.2.2 Métodos

### 2.2.2.1 Planejamento experimental

Utilizando-se da metodologia de planejamento experimental em vértices extremos, realizou-se a determinação da dosagem ótima de uma mistura entre as amostras de solo S1 e S2 e cimento Portland. O teor de cimento variou de 2% a 4% em relação à massa seca da mistura (DNIT, 2006). Estes limites mínimo e máximo de cimento para as misturas estão de acordo com as especificações de serviço para camadas de base [ES 142 (DNIT, 2022b)] e sub-base [ES 140 (DNIT, 2022a)] de pavimentos flexíveis de SMC.

Os limites das porcentagens de cada componente (cimento Portland, amostra S1 e amostra S2) das misturas foram estabelecidos conforme a Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Proporções de cada componente nas misturas de SMC do planejamento experimental

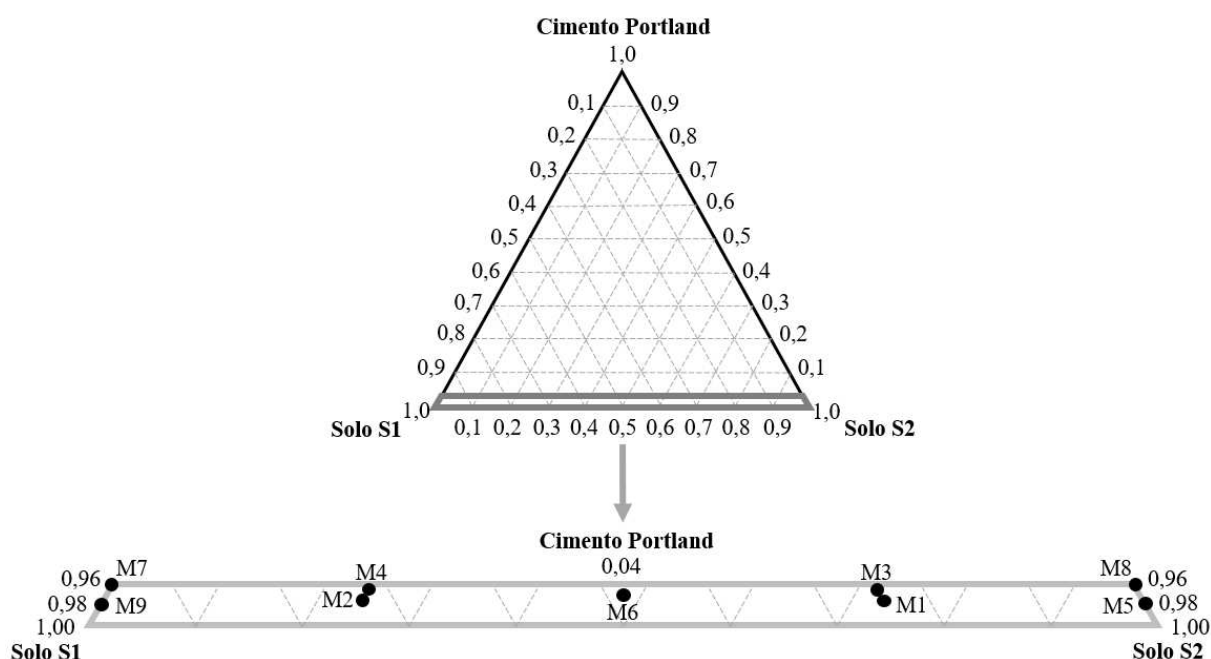
Componentes	Limites inferiores (%)	Limites superiores (%)
Cimento Portland	2	4
S1	0	98
S2	0	98

Os limites inferiores e superiores foram inseridos no *software* Minitab 18, que gerou 9 (nove) misturas experimentais, que são apresentadas na Tabela 2.6 e podem ser visualizadas na Figura 2.6, sob a forma de pontos experimentais.

Tabela 2.6: Misturas experimentais definidas pelo *software* Minitab 18.

Misturas	Cimento Portland (%)	Solo S1 (%)	Solo S2 (%)
M1	2,50	24,25	73,25
M2	2,50	73,25	24,25
M3	3,50	24,25	72,25
M4	3,50	72,25	24,25
M5	2,00	0,00	98,00
M6	3,00	48,50	48,50
M7	4,00	96,00	0,00
M8	4,00	0,00	96,00
M9	2,00	98,00	0,00

Figura 2.6: Pontos experimentais definidos pelo planejamento de misturas.



### 2.2.2.2 Parâmetros de compactação das misturas

Para moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios, foram determinados os parâmetros massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ) e teor de umidade ótimo ( $w_{ot}$ ), através do ensaio de compactação na energia Proctor modificada, segundo a NBR 7182 (ABNT, 2020). O ensaio de compactação foi realizado para as 9 misturas determinadas no planejamento experimental. A escolha

da energia Proctor modificada teve por objetivo a viabilização do material em estudo para aplicação em camadas de base em pavimentos asfálticos.

### **2.2.2.3 Moldagem, cura e aceitabilidade dos corpos de prova das misturas**

Definidos os parâmetros ótimos de compactação ( $\rho_{dm\acute{a}x}$  e  $w_{ot}$ ) de cada mistura definida no planejamento experimental, na energia Proctor modificada, foram moldados corpos de prova, em moldes cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, compactados através de prensa hidráulica em 4 camadas, submetidos à cura selada em filme de PVC, em câmara úmida por 7 dias, para a determinação da RCS.

Para o ensaio CBR, para os mesmos parâmetros ótimos, os corpos de prova de cada mistura foram moldados nas dimensões e especificações estabelecidas na NBR 9895 (ABNT, 2017d), submetidos à cura selada na câmara úmida por 7 dias, com os corpos de prova envoltos em sacos plásticos, seguido de posterior imersão por 96 horas para determinação da expansão e do índice CBR.

A cura em câmara úmida dos corpos de prova de RCS e CBR seguiu as recomendações da NBR 12024 (ABNT, 2012a).

Para a determinação das propriedades mecânicas de RCS e CBR, todos os corpos de prova foram moldados em triplicata para cada mistura analisada. Para a aceitabilidade dos corpos de prova, foi determinado, em relação ao  $\rho_{dm\acute{a}x}$ , um grau de compactação variando de 97% a 103%, e a diferença de teor de umidade em relação ao  $w_{ot}$  variando de 1,00% para cima ou para baixo [ES 140 (DNIT, 2022a); ES 142 (DNIT, 2022b)].

### **2.2.2.4 Ensaios de RCS das misturas**

Os ensaios de RCS das misturas previstas no planejamento experimental foram realizados de acordo com a norma técnica NBR 12025 (ABNT, 2012b), para cada mistura analisada. Não houve imersão em água por 4 horas, pois, em teste preliminar, constatou-se que os corpos de prova se desfaziam quando submetidos à imersão.

### **2.2.2.5 Ensaaios de CBR das misturas**

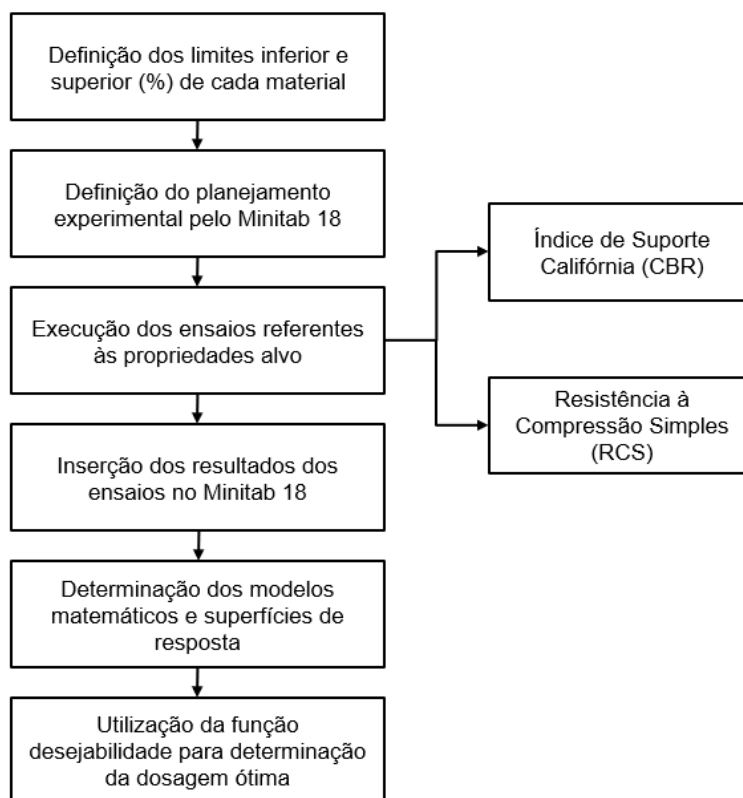
Os ensaios para a determinação dos valores de CBR e da expansão das misturas previstas no planejamento experimental foram realizados segundo a norma técnica NBR 9895 (ABNT, 2017d).

### **2.2.2.6 Dosagem ótima**

A determinação da dosagem ótima das misturas SMC foi realizada com auxílio do *software* Minitab 18. Os parâmetros mecânicos utilizados para a determinação da dosagem ótima foram RCS e CBR, os quais são considerados em projetos de engenharia rodoviária dimensionados pelo método empírico (DNIT, 2006), sendo que a busca por maximizações destas propriedades tem por objetivo garantir que o material apresente melhor desempenho em camadas estruturais de pavimentos.

De posse dos resultados destas propriedades mecânicas (RCS e CBR), foi determinada a dosagem ótima através da utilização da função desejabilidade, no *software* Minitab 18, buscando a desejabilidade com valor igual a 1. Tal desejabilidade unitária significa que os valores almejados para cada propriedade mecânica analisada estão sendo atingidos (Rodrigues *et al.*, 2023). Um fluxograma com o procedimento para a determinação da dosagem ótima é apresentado na Figura 2.7.

Figura 2.7: Fluxograma com o procedimento para a determinação da dosagem ótima.



A opção otimizador de resposta, que usa a função desejabilidade, foi aplicada tomando-se como alvo determinados valores para as propriedades mecânicas de RCS e CBR. Ou seja, buscou-se atingir determinados valores para que a dosagem ótima atendesse aos objetivos de desempenho mecânico requeridos pelo método empírico de dimensionamento. Selecionou-se a meta maximizar, tendo como alvo os valores de RCS e CBR apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Valores alvo para as propriedades mecânicas consideradas no procedimento de dosagem das misturas SMC.

Propriedade	Meta	Inferior	Alvo
RCS (MPa)	Maximizar	0	2,1
CBR (%)	Maximizar	0	80

O valor de RCS utilizado para a análise seguiu a recomendação da NBR 12253 (ABNT, 2012c), que indica valor mínimo de 2,1 MPa para solo-cimento no uso de camadas de pavimentos. No caso do CBR, foi adotado o valor recomendado pela

especificação de serviço ES 142 (DNIT, 2022b), a qual indica CBR  $\geq 80\%$  e expansão máxima de 0,5%, para uso em base de pavimentos para tráfego pesado.

### **2.2.2.7 Caracterização da mistura relativa à dosagem ótima**

#### **2.2.2.7.1 Parâmetro de compactação da mistura relativa à dosagem ótima**

Para moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios, foram determinados os parâmetros massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ) e teor de umidade ótimo ( $w_{ot}$ ), através do ensaio de compactação na energia Proctor modificada, segundo a NBR 7182 (ABNT, 2020). O ensaio de compactação foi realizado para a mistura relativa à dosagem ótima. A escolha da energia Proctor modificada teve por objetivo a viabilização do material em estudo para aplicação em camadas de base em pavimentos asfálticos.

#### **2.2.2.7.2 Moldagem, cura e aceitabilidade dos corpos de prova da mistura relativa à dosagem ótima**

Definidos os parâmetros ótimos de compactação ( $\rho_{dm\acute{a}x}$  e  $w_{ot}$ ) para a mistura relativa à dosagem ótima, na energia Proctor modificada, foram moldados corpos de prova, em moldes cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, compactados através de prensa hidráulica em 4 camadas, submetidos à cura selada em filme de PVC, em câmara úmida por 7 dias, para a determinação da RCS.

Para o ensaio CBR, para os mesmos parâmetros ótimos, os corpos de prova da mistura relativa à dosagem ótima foram moldados nas dimensões e especificações estabelecidas na NBR 9895 (ABNT, 2017d), submetidos à cura selada na câmara úmida por 7 dias, com os corpos de prova envoltos em sacos plásticos, seguido de posterior imersão por 96 horas para determinação da expansão e do índice CBR.

A cura em câmara úmida dos corpos de prova de RCS e CBR seguiu as recomendações da NBR 12024 (ABNT, 2012a).

Para a determinação das propriedades mecânicas de RCS e CBR, todos os corpos de prova foram moldados em triplicata. Para a aceitabilidade dos corpos de prova, foi determinado, em relação ao  $\rho_{dm\acute{a}x}$ , um grau de compactação variando de

97% a 103%, e a diferença de teor de umidade em relação ao  $w_{ot}$  variando de 1,00% para cima ou para baixo [ES 140 (DNIT, 2022a); ES 142 (DNIT, 2022b)].

#### **2.2.2.7.3 Ensaio de RCS da mistura relativa à dosagem ótima**

Os ensaios de RCS, da mistura relativa à dosagem ótima, foram realizados de acordo com a norma técnica NBR 12025 (ABNT, 2012b). Não houve imersão em água por 4 horas, pois, em teste preliminar, constatou-se que os corpos de prova se desfaziam quando submetidos à imersão.

#### **2.2.2.7.4 Ensaio de CBR da mistura relativa à dosagem ótima**

Os ensaios para a determinação dos valores de CBR e da expansão, da mistura relativa à dosagem ótima, foram realizados segundo a norma técnica NBR 9895 (ABNT, 2017d).

#### **2.2.2.7.5 Ensaio de DRX e MEV/EDS da mistura relativa à dosagem ótima**

Amostras de corpos de prova moldados na dosagem ótima foram submetidas a ensaios de DRX e MEV/EDS para investigação das estruturas e características microestruturais e determinação de elementos e compostos químicos presentes no material, buscando correlacionar os resultados mecânicos com as microestruturas formadas no processo de cura aos 7 dias.

Os corpos de prova foram partidos ao meio com auxílio de uma pequena serra, sendo então extraídos fragmentos da região central para a realização das análises.

Para a análise de DRX, fragmentos do corpo de prova foram obtidos e moídos com auxílio de almofariz e mão de gral. Uma pequena porção foi espalhada em uma lâmina de vidro, e álcool isopropílico foi utilizado para que a amostra ficasse aderida à lâmina. A lâmina com a amostra foi então levada ao equipamento de DRX para a realização do ensaio.

Para a realização do ensaio DRX, foram realizadas medidas  $2\theta$ - $2\theta$  na faixa de 5 a 80 graus, utilizando passo de 0,05 graus, com 1 segundo por passo. O

equipamento utilizado foi um difratômetro de raios-x, da marca Brucker, modelo D8 DISCOVER, localizado no Laboratório de Difração de Raios-x, no DEF da UFV.

Para as análises de MEV/EDS, uma pequena amostra de material foi extraída da região central do corpo de prova e colocada em um *stub* metálico, sendo que, na superfície do *stub*, antes da colocação da amostra, foi aplicada uma resina com grafite, visando garantir a aderência entre o *stub* e a amostra, mantendo a condutividade elétrica. A amostra foi então submetida à metalização com ouro para garantir uma melhor condutividade elétrica, proteção da amostra e qualidade de imagem. A amostra foi então levada ao equipamento.

A metalização por nuvem de ouro foi realizada através de metalizador da marca Quorum, modelo Q150R S, que fica localizado no Núcleo de Microscopia e Microanálise (NMM) da UFV.

A análise de MEV foi realizada utilizando um microscópio eletrônico de varredura, da marca JEOL, modelo JSM-6010LA, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, no DEF da UFV.

Procedimentos similares foram executados por diversos autores (Deneele *et al.*, 2021; Estabragh *et al.*, 2020; Padmaraj; Arnepalli, 2021; Rodrigues, 2022; Vitale; Deneele; Russo, 2021; Xu *et al.*, 2020).

## 2.3 Resultados e Discussões

### 2.3.1 Ensaios de compactação das misturas

A Tabela 2.8 apresenta os valores de  $\rho_{dm\acute{a}x}$  e  $w_{ot}$  para as 9 misturas SMC estudadas correspondentes à energia Proctor modificada.

Tabela 2.8: Parâmetros ótimos do ensaio de compactação na energia Proctor modificada das misturas SMC definidas no planejamento experimental.

Mistura	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$w_{ot}$ (%)
M1	1,890	13,50
M2	1,738	18,70
M3	1,884	13,10
M4	1,725	18,55
M5	1,927	11,87
M6	1,830	14,58
M7	1,653	21,00
M8	1,967	10,30
M9	1,641	22,50

Observou-se que as misturas com maiores teores da amostra S2 (areia silto-argilosa) obtiveram maiores valores de  $\rho_{dm\acute{a}x}$ , sendo que o maior valor obtido (1,967 g/cm<sup>3</sup>), relativo à mistura M8, não possui a amostra S1 (argila areno-siltosa) em sua composição. Da mesma forma, a mistura que obteve o menor valor de  $\rho_{dm\acute{a}x}$  (1,641 g/cm<sup>3</sup>) foi a que possui exclusivamente a amostra de solo S1. Com relação ao teor de umidade ótimo, ocorreu o oposto, ou seja, as misturas mais argilosas apresentaram os maiores valores.

Alnmr e Ray (2024) estudaram o impacto de diferentes porcentagens de areia nas propriedades físicas de solos argilosos expansivos e perceberam que, ao adicionar areia, o  $\rho_{dm\acute{a}x}$  aumentou e o  $w_{ot}$  diminuiu, sendo que as relações entre o teor de areia e  $\rho_{dm\acute{a}x}$  e entre o teor de areia e o  $w_{ot}$  se apresentaram lineares, com valores de  $R^2$  elevados.

Spagnoli e Shimobe (2020) analisaram mais de 400 publicações de pesquisa considerando mais de 1000 tipos de solos ao redor do mundo, chegando à constatação que solos arenosos tem maiores  $\rho_{dm\acute{a}x}$  em comparação aos solos coesivos (argilosos), corroborando com os resultados obtidos neste estudo.

### 2.3.2 Propriedades mecânicas analisadas

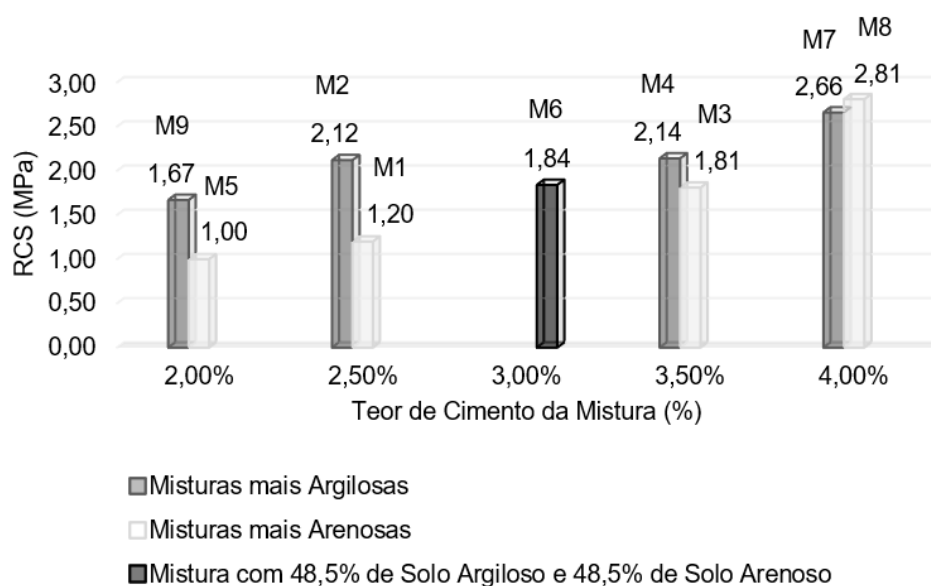
Na Tabela 2.9, são apresentados os resultados, para cada mistura analisada, das propriedades mecânicas RCS e CBR, aos 7 dias de cura, além da expansão derivada do ensaio CBR.

Tabela 2.9: Propriedades mecânicas RCS e CBR e expansão das misturas SMC definidas no planejamento experimental (aos 7 dias de cura).

Mistura	RCS (MPa)	CBR (%)	Expansão (%)
M1	1,20	187	0,00
M2	2,12	112	0,16
M3	1,81	265	0,00
M4	2,14	196	0,00
M5	1,00	127	0,00
M6	1,84	200	0,02
M7	2,66	88	0,56
M8	2,81	276	0,00
M9	1,67	64	0,28

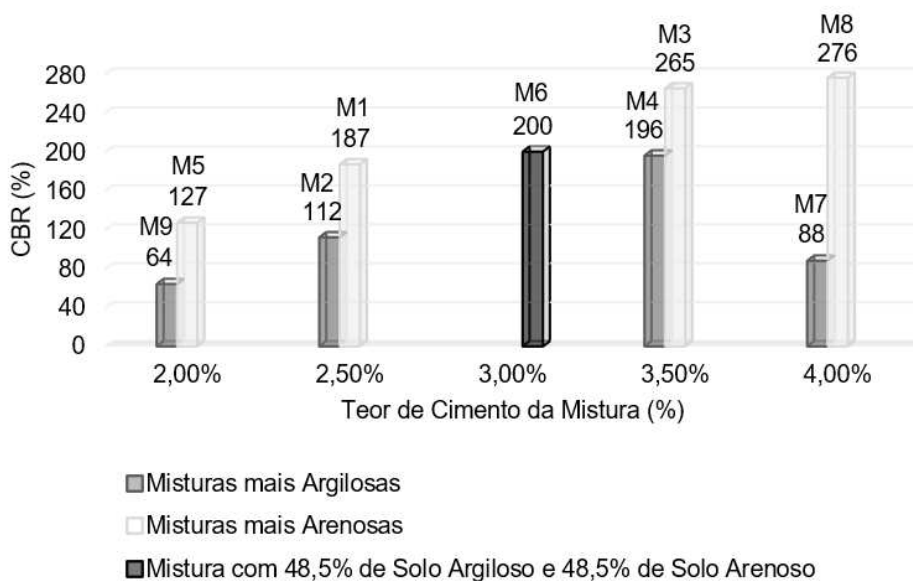
Para a RCS, os maiores resultados foram obtidos para as misturas mais argilosas em relação às arenosas, sendo crescente na medida em que houve aumento no teor de cimento (Figura 2.8). Apenas para o maior teor de cimento analisado (4%), a mistura mais arenosa obteve resultado superior à mistura mais argilosa. Resultados superiores para solos argilosos se devem à maior coesão destes solos, pois, como o ensaio de RCS não é confinado, tal característica física favorece seu melhor desempenho mecânico (Hastuty; Hartawan, 2021; Yin *et al.*, 2021).

Figura 2.8: RCS em relação ao teor de cimento das misturas.



Com relação ao CBR, os maiores resultados foram obtidos para as misturas mais arenosas em relação às argilosas, sendo crescente na medida em que houve aumento no teor de cimento (Figura 2.9).

Figura 2.9: CBR em relação ao teor de cimento das misturas.



Solos arenosos tendem a apresentar maiores valores de CBR devido ao fato de apresentarem maior ângulo de atrito em relação aos solos argilosos. O maior ângulo de atrito interno dos solos arenosos confere a esses materiais resistência ao cisalhamento superior ao serem submetidos a carregamentos. Tal comportamento nesses solos é melhorado pelo fato de o ensaio CBR ter confinamento lateral, o que simula o comportamento em condições reais, como em camadas de pavimentos (Hastuty; Hartawan, 2021; Jain; Timani; Pandey, 2023; Yin *et al.*, 2021).

O aumento do teor de cimento gerou uma tendência de melhoria nas duas propriedades mecânicas analisadas (RCS e CBR), para todas as misturas, sendo esse efeito mais evidente para as misturas com maior proporção de solo arenoso. Por outro lado, foi possível observar que a mistura M7 apresentou baixo valor de CBR (88%), mesmo com elevado teor de cimento (4%), cabendo ressaltar que tal mistura não possui solo arenoso em sua composição, evidenciando que a ausência desse tipo de solo pode impactar negativamente essa propriedade, que ocorre pelo fato de solos argilosos reterem mais água que solos arenosos, fazendo com que haja menos água livre nos poros pra reagir com o cimento (Sukmak *et al.*, 2024). A mistura M8, que possui apenas a amostra de solo S2, apresentou o maior valor de CBR (276%). Portanto, o cimento apresentou melhor desempenho com as misturas mais arenosas. A melhoria das propriedades ocorreu devido aos mecanismos de hidratação dos compostos cimentícios (Barman; Dash, 2022).

Solos arenosos tendem a ter melhores resultados que solos argilosos ao serem melhorados com cimento, no entanto, neste estudo, observou-se que, para o RCS, o resultado foi superior para os solos argilosos até o teor de 3,5% de cimento. Com o teor de 4%, os solos mais arenosos obtiveram melhores resultados para ambas propriedades mecânicas. O melhor desempenho dos solos arenosos em ambas as propriedades para teores elevados de cimento pode estar relacionado à maior granulometria, que permite maior quantidade de água livre, sendo que os solos argilosos retêm parte da água adicionada. A maior quantidade de água disponível (livre) nos poros dos solos arenosos permite maior hidratação do cimento e, conseqüentemente, maior formação de compostos cimentícios (Azevedo *et al.*, 2019; Milani; Freire, 2006; Neto; Heidemann; Nierwinski, 2019; Oliveira; de Araujo, 2023; Sukmak *et al.*, 2024).

Particularmente para a expansão, constata-se que ela foi maior para menores valores de CBR, mas, de modo geral, foi pequena em relação ao máximo valor de 0,50% para uso em base de pavimentos para tráfego pesado, sendo que apenas a mistura M7, cujo resultado de CBR foi 88%, ou seja, o menor valor dentre as misturas investigadas, apresentou expansão superior ao limite normatizado (0,56%). Os bons resultados de expansão se devem ao fato de o cimento possuir a tendência de estabilizar dimensionalmente o material, restringindo sua variação volumétrica.

### **2.3.3 Obtenção da dosagem ótima através de planejamento experimental em vértices extremos**

Em posse dos resultados das propriedades mecânicas (RCS e CBR), utilizou-se o *software* Minitab 18, visando determinar uma dosagem ótima buscando atender aos critérios mínimos almejados, quais sejam:  $RCS \geq 2,1$  MPa, conforme a recomendação da NBR 12253 (ABNT, 2012c) para solo-cimento, e  $CBR \geq 80\%$ , conforme a especificação de serviço ES 142 (DNIT, 2022b).

As equações de regressão obtidas de RCS e CBR são apresentadas na Tabela 2.10.

Tabela 2.10: Equações de regressão de RCS e CBR.

Propriedade mecânica	Equação de regressão	R <sup>2</sup>
RCS (MPa)	$(62,3477.C) + (0,2861.S1) - (0,1908.S2)$	76,84
CBR (%)	$(7634,6233.C) + (23,0947.S1) - (27,3465.S2) - (6141,4631.C.S1) + (9747,2846.C.S1.S2)$	98,92

Sendo: C, S1 e S2, respectivamente, as proporções de cimento Portland, solo S1 e solo S2.

Ao verificar os coeficientes dos modelos matemáticos, o coeficiente individual relativo ao cimento contribui de forma positiva para ambas as propriedades mecânicas. O coeficiente individual relativo ao solo S1 aumenta os valores de RCS, e o relativo ao solo S2 os diminui. Com relação à equação do CBR, o *software* gerou uma equação com parcelas de interações entre os componentes, no entanto foi possível constatar que, embora o coeficiente que acompanha a proporção do solo S2 de forma isolada contribua negativamente, na parcela em que ocorre interação dos três componentes (cimento, solo S1 e solo S2) uma maior proporção de solo S2 tende a contribuir positivamente para o valor de CBR.

Para determinar a dosagem ótima, utilizou-se a função desejabilidade do *software* Minitab 18. Na Figura 2.10, é apresentado o gráfico de otimização, para desejabilidade composta igual a 1 e valores esperados para RCS e CBR. A Tabela 2.11 apresenta a dosagem ótima definida.

Figura 2.10: Gráfico de otimização.

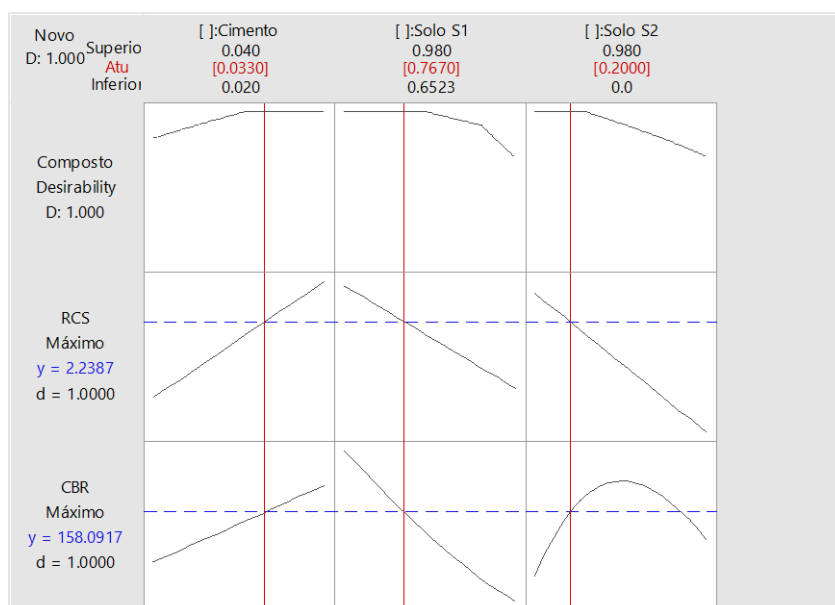


Tabela 2.11: Dosagem ótima obtida com a função desejabilidade do *software* Minitab 18.

Mistura	Cimento Portland (%)	Solo S1 (%)	Solo S2 (%)
Dosagem ótima	3,30	76,70	20,00

Como o *software* disponibiliza o recurso de ajustar o percentual desejado de cada componente da mistura, de modo a manter a desejabilidade composta igual a 1 para os valores esperados de RCS e CBR e considerando que, em um projeto de engenharia, os materiais são normalmente limitados, buscou-se modificar a dosagem (Tabela 2.11) para simular uma situação real de obra.

Como normalmente o foco das obras está na economia, buscou-se diminuir ao máximo o percentual de cimento, que é o insumo mais caro, mantendo então a desejabilidade composta igual a um, ou seja, mantendo-se ainda os valores de RCS e CBR acima dos mínimos exigidos nas normas técnicas NBR 12253 (ABNT, 2012c) e ES 142 (DNIT, 2022b), respectivamente.

Com respeito aos solos, buscou-se usar ambos, considerando uma disponibilidade maior do solo S1 em relação ao S2, simulando que, em um projeto de engenharia, no momento dos estudos técnicos, foram encontradas jazidas do solo S1 em maior volume que as do solo S2 e que o uso do solo S2 apresenta tendências de melhoria da propriedade de CBR, conforme observadas nas equações de regressão.

#### **2.3.4 Determinação dos parâmetros de compactação da mistura relativa à dosagem ótima**

A Figura 2.11 apresenta a curva de compactação da mistura correspondente à dosagem ótima na energia Proctor modificada. A Tabela 2.12 apresenta os correspondentes parâmetros do ponto ótimo de compactação.

Figura 2.11: Curva de compactação na energia Proctor modificada da mistura correspondente à dosagem ótima.

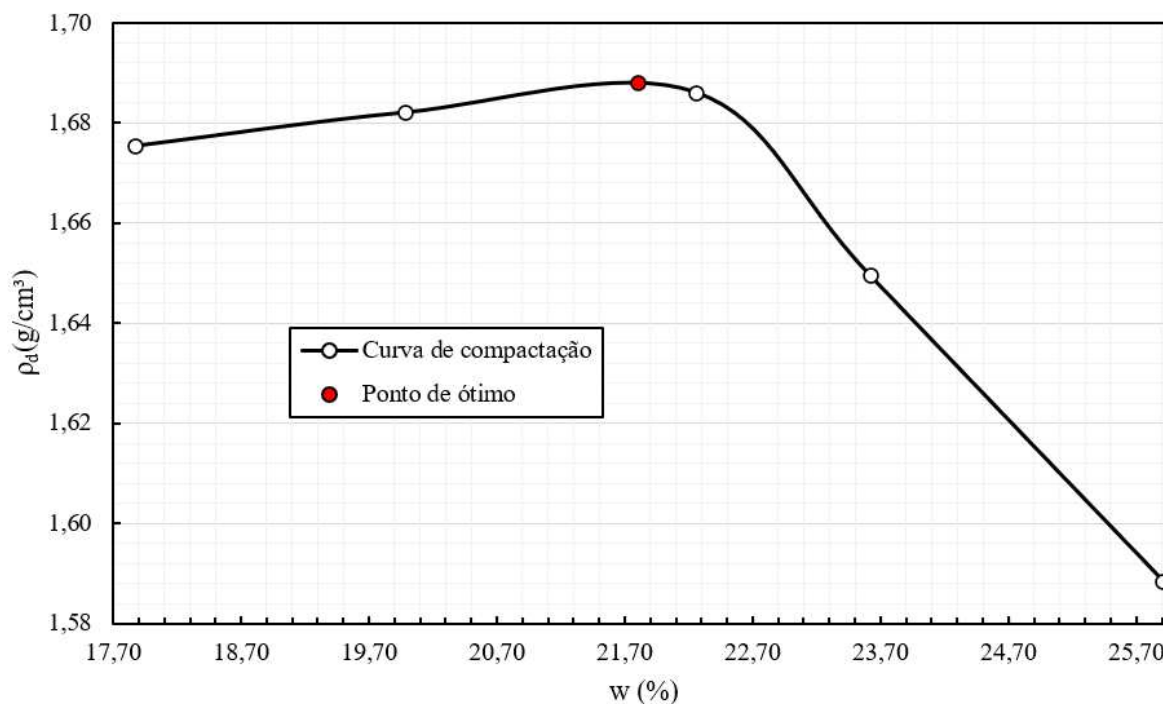


Tabela 2.12: Parâmetros do ponto de ótimo da curva de compactação na energia Proctor modificada da mistura correspondente à dosagem ótima.

Mistura	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$w_{ot}$ (%)
Dosagem ótima	1,688	21,80

Observou-se que a mistura correspondente à dosagem ótima apresentou proporções dos componentes próximas as da mistura M4, no entanto, a mistura M4 apresentou  $\rho_{dm\acute{a}x}$  superior (1,725 g/cm<sup>3</sup>) e umidade ótima inferior (18,55%). O  $\rho_{dm\acute{a}x}$  superior e  $w_{ot}$  inferior da mistura M4 em relação ao da dosagem ótima está relacionado ao maior teor de solo S2, que é arenoso. Misturas mais arenosas tendem a apresentar  $\rho_{dm\acute{a}x}$  superiores e umidade ótima inferiores em relação a solos mais argilosos (Alnmr; Ray, 2024; Spagnoli; Shimobe, 2020).

### 2.3.5 Determinação das propriedades mecânicas da mistura relativa à dosagem ótima

Através dos parâmetros do ponto de ótimo da curva de compactação na energia Proctor modificada da mistura referente à dosagem ótima, foram moldados corpos de

prova para a obtenção das propriedades mecânicas RCS e CBR. Na Tabela 2.13, são apresentados os resultados.

Tabela 2.13: Resultados de RCS e CBR da mistura relativa à dosagem ótima.

Mistura	RCS (MPa)	CBR (%)	Expansão (%)
Dosagem ótima	1,94	164,36	0,06

O valor de RCS obtido não atendeu ao valor especificado para a camada de base de pavimentos ( $\geq 2,1$  MPa) de solo-cimento, já os valores de CBR e expansão atenderam aos mínimos exigidos (CBR  $\geq 80\%$  e expansão máxima de 0,5%).

Nas Tabelas 2.14 e 2.15, são apresentados os desvios encontrados nos ensaios em relação aos valores esperados para as propriedades mecânicas analisadas.

Tabela 2.14: Desvio do valor de RCS encontrado em relação ao RCS esperado.

Mistura	RCS encontrado (MPa)	RCS esperado (MPa)	Desvio (%)
Dosagem ótima	1,94	2,24	-13,39

Tabela 2.15: Desvio do valor de CBR encontrado em relação ao CBR esperado.

Mistura	CBR encontrado (%)	CBR esperado (%)	Desvio (%)
Dosagem ótima	164,36	158,09	3,97

O desvio encontrado para a propriedade de RCS foi superior ao desvio do CBR, o que pode ser explicado ao se observar os valores de  $R^2$  das equações de regressão, pois como o  $R^2$  (76,84) da equação relativa à propriedade de RCS é inferior ao  $R^2$  (98,92) da propriedade de CBR, espera-se que os resultados de RCS tenham uma maior variação em relação ao valor estimado pelo modelo matemático, em relação aos valores de CBR.

Neste caso, o material atenderia às exigências, para uso em camada de base de pavimentos de tráfego pesado segundo o método empírico de dimensionamento (DNIT, 2006), tomando-se como critério a propriedade CBR (CBR  $\geq 80\%$  e expansão máxima de 0,5%), mas não atenderia ao critério de RCS ( $\geq 2,1$  MPa), vale ressaltar que essa exigência se aplica somente a solo-cimento e não a SMC, objeto deste estudo.

Observou-se que o valor esperado para a RCS não foi atingido, o que pode estar relacionado à menor precisão do modelo matemático de regressão obtido para a propriedade mecânica de RCS ( $R^2 = 76,84$ ).

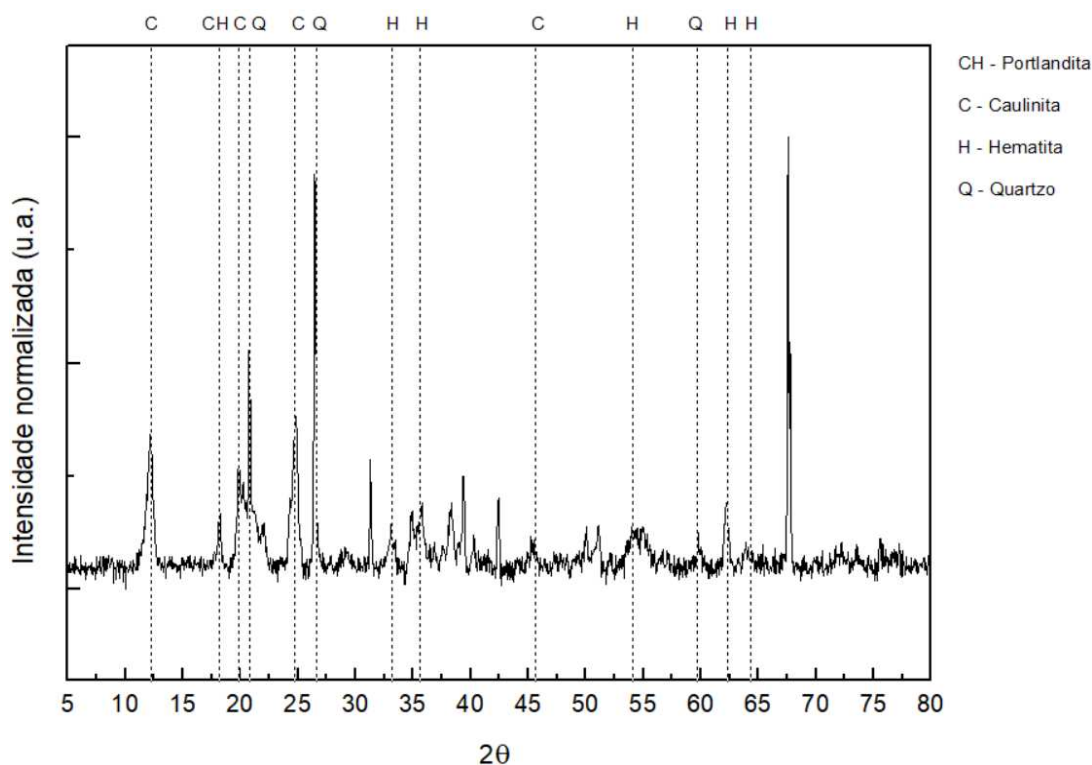
Observou-se que os desvios dos valores encontrados para ambas propriedades, -13,39% para RCS e 3,97% para CBR, em relação aos esperados foram considerados aceitáveis, sendo que, devido à variabilidade dos solos, tais diferenças podem ocorrer em laboratório. Portanto, o planejamento experimental em vértices extremos pode ser uma excelente ferramenta para otimização de SMC para uso em pavimentação.

### **2.3.6 Ensaios de DRX e MEV/EDS da mistura relativa à dosagem ótima**

Através dos ensaios de DRX e MEV/EDS, buscou-se identificar os compostos cimentícios formados pela hidratação do cimento na mistura ótima. Tais compostos, através do processo de hidratação, formam hidróxido de cálcio (CH), silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e sílicoaluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H), que conferem resistência e rigidez à mistura (Barman; Dash, 2022; Chaiyaput *et al.*, 2022; Rodrigues, 2022).

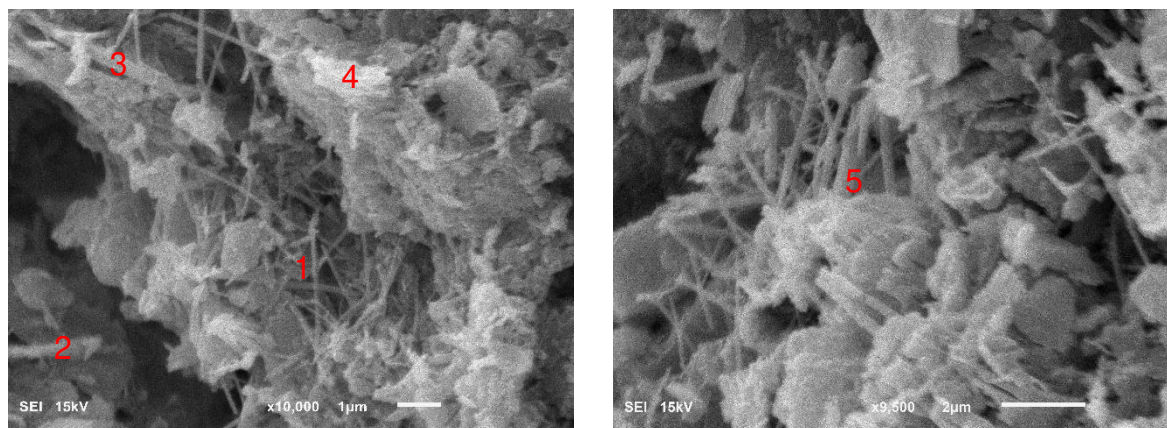
Na Figura 2.12, é apresentado o DRX da mistura referente à dosagem ótima. Os resultados mostraram o pico principal de portlandita (CH), que é um composto cimentício resultante das reações químicas de hidratação do silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e do silicato dicálcico ( $C_2S$ ). Também são identificados picos relativos à caulinita, hematita e quartzo, provenientes dos solos.

Figura 2.12: Difratoograma da mistura referente à dosagem ótima.



Na Figura 2.13, é apresentada uma micrografia da mistura referente à dosagem ótima. Os números indicados na figura dizem respeito às análises de EDS concentradas naquelas regiões. Observa-se, através das imagens, a formação de diversas estruturas (indicadas pelos números), que estão intimamente relacionadas aos compostos cimentícios formados e que garantem melhorias no desempenho mecânico da mistura.

Figura 2.13: Micrografias da mistura referente à dosagem ótima.



Nas regiões analisadas, através dos resultados do EDS apresentados na Tabela 2.16, nota-se a presença considerável do elemento químico Ca (cálcio), que é o elemento proveniente do cimento, sendo o principal responsável pela formação dos compostos cimentícios. Os percentuais de Ca apresentados nas análises de EDS, nestes pontos apresentados, são bastante elevados, o que indica que, na região analisada, há provavelmente um aglomerado de cimento (Chaiyaput *et al.*, 2022; Jiang *et al.*, 2024; Kufre Etim *et al.*, 2021; Sukmak *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2024).

Tabela 2.16: Resultados do EDS das regiões apresentadas na Figura 2.13.

Fórmula química	% em massa				
	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Região 5
C	5,61	-	10,60	14,67	13,50
O	29,60	26,32	44,96	46,00	41,94
Al	13,64	17,71	16,26	13,16	12,12
Si	11,47	15,74	15,51	12,39	8,79
Ca	21,30	21,09	4,93	5,80	14,61
Ti	2,23	-	-	-	-
Fe	16,14	19,14	7,73	7,98	9,04

Com base nas informações obtidas nas análises de DRX e MEV/EDS, é possível concluir que a formação dos compostos cimentícios foi responsável pelas melhorias das propriedades mecânicas de RCS e CBR e pela diminuição do seu potencial de expansão (Estabragh *et al.*, 2020; Ho *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2023).

## 2.4 Conclusões

Através dos resultados desta pesquisa, foi possível concluir que:

- O planejamento experimental em vértices extremos foi útil para otimizar as propriedades mecânicas analisadas, buscando atingir valores recomendados na literatura e normas técnicas vigentes, podendo ser usado em projetos de obras de engenharia de pavimentação para dosagem de SMC;

- A propriedade mecânica RCS foi superior para as misturas argilosas, sendo crescente com o aumento do teor de cimento, com exceção para o teor de 4%, em que a mistura arenosa superou a argilosa;
- Em relação ao CBR, os maiores resultados foram obtidos pelas misturas arenosas, seguindo a tendência de aumento dos valores com o aumento do teor de cimento;
- A expansão apresentou valores baixos para todas as misturas investigadas;
- A equação de regressão da propriedade de RCS apresentou  $R^2$  inferior ao do CBR, sendo que seus valores foram coerentes aos desvios dos resultados das propriedades mecânicas encontradas em relação aos valores previstos pelo método de planejamento experimental em vértices extremos;
- Os ensaios DRX e MEV/EDS, para análises microscópicas das misturas, comprovaram o surgimento de compostos cimentícios que melhoram as propriedades mecânicas das misturas de SMC.

Assim sendo, é possível concluir que o planejamento em vértices extremos pode ser utilizado no desenvolvimento de dosagens de misturas de SMC para uso em camadas de pavimento de forma a tornar os projetos de engenharia mais racionais e, conseqüentemente, de melhor qualidade.

## Referências

ALANEME, G. U. *et al.* Mechanical Properties Optimization of Soil-Cement Kiln Dust Mixture Using Extreme Vertex Design. **International Journal of Pavement Research and Technology**, 15, n. 3, p. 719-750, 2022/05/01 2021.

ALEISA, E.; HEIJUNGS, R. Leveraging life cycle assessment and simplex lattice design in optimizing fossil fuel blends for sustainable desalination. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 25, n. 4, p. 744-759, 2020/04/01 2020.

ALNMR, A.; RAY, R. Investigating the Impact of Varying Sand Content on the Physical Characteristics of Expansive Clay Soils from Syria. **Geotechnical and Geological Engineering**, 42, n. 4, p. 2675-2691, 2024/06/01 2024.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM**. D2487. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, PA, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM**. D3282. Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. West Conshohocken, PA, 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM**. E1508-12a. Standard guide for quantitative analysis by energy-dispersive spectroscopy. West Conshohocken, PA, 2019.

ARAÚJO, H. A. O. **Estudo sobre a validação de uma metodologia de classificação de solos lateríticos com vistas à execução de camadas de pavimentos rodoviários**. 2022. (Mestrado) -, Universidade Federal de Campina Grande.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. ISO/TR 18336: Diretrizes para boas práticas de laboratório de FRX para a indústria de minério de ferro. Rio de Janeiro: 2022. 29p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 11579. Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: 2013. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 12024. Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – procedimento. Rio de Janeiro: 2012a. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 12025. Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro: 2012b. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 12253. Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento. Rio de Janeiro: 2012c. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 16372. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: 2015. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 16605. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: 2017a. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 16697. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: 2018a. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 6457. Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: 2024. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: 2017b. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: 2017c. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: 2016. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: 2018b. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: 2020. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 9895: Solo – Índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro: 2017d. 14p.

AZEVEDO, C. A. *et al.* Melhoramento de Solos com Cimento Portland: uma revisão. **Simpósio de prática de engenharia geotécnica na região centro oeste**, 5, 2019.

BARMAN, D.; DASH, S. K. Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 14, n. 4, p. 1319-1342, 2022/08/01/ 2022.

BORBA, S. M. C. **Estudos das propriedades químicas e mineralógicas de solos vermelhos tropicais do norte e nordeste do Brasil**. 1984. (Mestrado) -, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CHAIYAPUT, S. *et al.* Effect of curing conditions on the strength of soil cement. **Case Studies in Construction Materials**, 16, p. e01082, 2022/06/01/ 2022.

CHEN, X. *et al.* Experimental optimization of industrial waste-based soil hardening agent: Combining D-optimal design with genetic algorithm. **Journal of Building Engineering**, 72, p. 106611, 2023/08/01/ 2023.

COSCIONE, A. R.; ANDRADE, J. C. d.; MAY, G. M. O modelamento estatístico de misturas: experimento tutorial usando voltametria de redissolução anódica. **Química Nova**, 28, n. 6, p. 1116-1122, 2005.

DE SOUZA JUNIOR, T. F. *et al.* Mechanical behavior and durability of a typical frictional cohesive soil from Rio Grande do Sul/Brazil improved with Portland cement. **Transportation Geotechnics**, 34, p. 100751, 2022/05/01/ 2022.

DENELEE, D. *et al.* The carbonation of a lime-treated soil: experimental approach. **Materials and Structures**, 54, n. 1, p. 21, 2021/01/12 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – PRO 003**: Coleta de amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro: DNER, 1994. 12p.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 140**: Sub-base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Brasília: DNIT, 2022a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 142**: Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Brasília: DNIT, 2022b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-IPR 719**: Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 414**: Pavimentação – Solo-Cimento – Dosagem físico-química de solo-cimento – Método de ensaio. Brasília: DNIT, 2019.

DING, J.-T.; YAN, P.-Y.; LIU, S.-L.; ZHU, J.-Q. Extreme vertices design of concrete with combined mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, 29, n. 6, p. 957-960, 1999/06/01/ 1999.

DUTRA DE LIMA, D. A. **Obtenção e caracterização de argamassas de revestimento produzidas com resíduos de construção e demolição (RCD) como agregado reciclado**. 2022. (Mestrado) -, Universidade São Judas.

ESTABRAGH, A. R. *et al.* Effect of forced carbonation on the behaviour of a magnesia-stabilised clay soil. **International Journal of Pavement Engineering**, 23, n. 5, p. 1691-1705, 2022/04/16 2020.

FRANCO, K. L. B. **Caracterização do comportamento geotécnico de mistura de resíduo de pneus e solo laterítico**. 2012. (Mestrado) -, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

GALINDO, J. R. F. *et al.* Optimization of mixtures of soil, construction and demolition waste, and steel slag using the simplex-extreme vertices method. **Transportation Geotechnics**, 48, p. 101361, 2024/09/01/ 2024.

HASTUTY, I. P.; HARTAWAN, A. Unconfined compressive strength and California Bearing Ratio test on clay stabilization using silica sand. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 1122, n. 1, p. 012017, 2021/03/01 2021.

HO, L. S. *et al.* Strength development of cement-treated soils: Effects of water content, carbonation, and pozzolanic reaction under drying curing condition. **Construction and Building Materials**, 134, p. 703-712, 2017/03/01/ 2017.

JAIN, R.; TIMANI, K.; PANDEY, M. Influence of cohesion on California bearing ratio of clay-gravel mixtures. **International Journal of Sediment Research**, 38, n. 3, p. 374-386, 2023/06/01/ 2023.

JIANG, Y. *et al.* Feasibility and mechanism of high alumina cement-modified chlorine saline soil as subgrade material. **Construction and Building Materials**, 429, p. 136411, 2024/05/24/ 2024.

KHOOBBAKHT, G. *et al.* Desirability function approach for optimization of enzymatic transesterification catalyzed by lipase immobilized on mesoporous magnetic nanoparticles. **Renewable Energy**, 158, p. 253-262, 2020/10/01/ 2020.

KUFRE ETIM, R. *et al.* Effect of micro sized quarry dust particle on the compaction and strength properties of cement stabilized lateritic soil. **Cleaner Materials**, 2, p. 100023, 2021/12/15/ 2021.

MARTINEZ, G. S. **Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação barreiras**. 2003. (Doutorado) -, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MILANI, A. P.; FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. **Engenharia Agrícola**, 26, p. 1-10, 2006.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. John wiley & sons, 2017. 1119113474.

NETO, A. T.; HEIDEMANN, M.; NIERWINSKI, H. P., 2019, **Análise do comportamento de um solo sedimentar orgânico estabilizado com cal hidratada e cimento**.

NOVAES, C. *et al.* Otimização de métodos analíticos usando metodologia de superfícies de respostas-parte II: variáveis de mistura. **Revista Virtual de Química**, 10, n. 2, p. 393-420, 2018.

OLIVEIRA, A. L.; DE ARAUJO, R. d. C. Estabilização do solo com adição de cimento para fins de pavimentação em vias de baixo volume de tráfego. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, 15, n. 1, 2023.

ONYELOWE, K. Nanostructured waste paper ash treated lateritic soil and its California bearing ratio optimization. **Global Journal of Technology & Optimization**, 8, p. 220, 2017.

ONYELOWE, K. *et al.* Generalized review on EVD and constraints simplex method of materials properties optimization for civil engineering. **Civil Engineering Journal**, 5, n. 3, p. 729-749, 2019.

PADMARAJ, D.; ARNEPALLI, D. N. Mechanism of Carbonation in Lime-Stabilized Silty Clay from Chemical and Microstructure Perspectives. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, 7, n. 4, p. 74, 2021/10/16 2021.

RODRIGUES, K. H. d. P. **Utilização de Resíduos Industriais na estabilização de solos tropicais para aplicação em pavimentação**. 2022. (Doutorado) -, Universidade Federal de Viçosa.

RODRIGUES, K. H. d. P. *et al.* Experimental study of mixtures soil-industrial waste using simplex design for application in paving. **Journal of Building Engineering**, 78, p. 107761, 2023/11/01/ 2023.

RODRIGUES, K. H. d. P. *et al.* Effect of carbonation of soil-slag mixtures on the resilient behaviour and structural response of an asphalt pavement. **Road Materials and Pavement Design**, p. 1-20, 2024.

RODRIGUES, M. H. R. *et al.* The Simplex-Lattice Method Application to Optimize the Design of Soil-Slag-Fly Ash Mixtures. **Springer International Publishing**. 595-607, 2021.

SOUSA, M. A. d. S.; MOTTA, L. M. G. d.; COUTINHO, R. Q. Análise da aplicabilidade de solos tropicais finos em estruturas de pavimento flexível utilizando o novo método de dimensionamento nacional (MeDiNa). *In*: 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2021, p. 837-848.

SPAGNOLI, G.; SHIMOBÉ, S. An overview on the compaction characteristics of soils by laboratory tests. **Engineering Geology**, 278, p. 105830, 2020/12/05/ 2020.

SUKMAK, G. *et al.* Generalized strength prediction equation for cement stabilized clayey soils. **Applied Clay Science**, 231, p. 106761, 2023/01/03/ 2023.

SUKMAK, G. *et al.* An approach for strength development assessment of cement-stabilized soils with various sand and fine contents. **Transportation Geotechnics**, 48, p. 101323, 2024/09/01/ 2024.

VITALE, E.; DENELE, D.; RUSSO, G. Effects of carbonation on chemo-mechanical behaviour of lime-treated soils. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 80, n. 3, p. 2687-2700, 2021/03/01 2021.

WANG, Q. *et al.* Experimental Study on Carbonation Durability of Kaolin Strengthened with Slag Portland Cement. 15, n. 3, p. 1240, 2022.

XU, L. *et al.* Experimental Investigation on Carbonation Behavior in Lime-Stabilized Expansive Soil. **Advances in Civil Engineering**, 2020, n. 1, p. 7865469, 2020.

YILDIRIM, Z. B.; KARACASU, M.; OKUR, V. Optimisation of Marshall Design criteria with central composite design in asphalt concrete. **International Journal of Pavement Engineering**, 21, n. 5, p. 666-676, 2020/04/15 2020.

YILDIZEL, S. A.; TAYEH, B. A.; CALIS, G. Experimental and modelling study of mixture design optimisation of glass fibre-reinforced concrete with combined utilisation of Taguchi and Extreme Vertices Design Techniques. **Journal of Materials Research and Technology**, 9, n. 2, p. 2093-2106, 2020/03/01/ 2020.

YIN, K. *et al.* A Review of Sand–Clay Mixture and Soil–Structure Interface Direct Shear Test. 1, n. 2, p. 260-306, 2021.

ZHANG, S. *et al.* Effect of recycled phosphogypsum and calcium aluminate cement on the strength behavior optimization of cement-treated dredged soil: A co-utilization of solid wastes. **Journal of Environmental Management**, 353, p. 120020, 2024/02/27/ 2024.

### 3 ANÁLISE DE CARBONATAÇÃO DE MISTURA DE SOLO MELHORADO COM CIMENTO OTIMIZADA POR PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

**Resumo:** As obras de infraestrutura frequentemente são realizadas sobre solos de baixa capacidade de suporte devido às restrições de traçado geométrico ou para atendimento de necessidades da sociedade. As técnicas mais utilizadas para melhorar as propriedades geotécnicas dos solos são a estabilização granulométrica e a estabilização química, a qual é normalmente realizada adicionando-se cal ou cimento aos solos. A adição de cimento aos solos pode promover o fenômeno da carbonatação, que ocorre quando materiais à base de cálcio reagem com o CO<sub>2</sub>, podendo influenciar negativamente a resistência e a durabilidade destes materiais. Este estudo buscou entender o impacto da carbonatação em solos melhorados com cimento (SMC) para uso em camada de base de pavimentos, considerando propriedades mecânicas e de durabilidade. Os materiais utilizados foram duas amostras de solo, uma argilosa (S1) e uma arenosa (S2), e uma amostra de cimento Portland. Através de um planejamento experimental de misturas em vértices extremos, determinou-se uma dosagem ótima para a mistura entre as amostras dos solos e cimento. A dosagem ótima obtida consistiu nas proporções 3,30% de cimento, 76,70% de S1 e 20,00% de S2. Foram moldados corpos de prova para ensaios de resistência à compressão simples (RCS), *mini-California Bearing Ratio* (mini-CBR) e durabilidade por molhagem e secagem (DMS), na energia Proctor modificada, visando à análise da influência da carbonatação. Para isso, foram utilizados dois procedimentos de cura: um em câmara úmida por 31 dias (cura úmida) e outro inicialmente em câmara úmida por 28 dias seguidos de 3 dias em câmara de carbonatação acelerada (cura carbonatada). Os resultados obtidos foram: RCS = 3,20 MPa, para a cura carbonatada; RCS = 2,40 MPa, para a cura úmida; mini-CBR = 58%, para a cura carbonatada; mini-CBR = 88%, para a cura úmida. Constatou-se que a formação de calcita através da carbonatação aumentou os valores de RCS, porém, em relação ao mini-CBR, houve diminuição de resistência nos corpos de prova carbonatados, provavelmente devido à dissolução de calcita e formação de bicarbonato de cálcio durante as 20 horas de imersão. Os resultados de DMS mostraram que a carbonatação torna o material vulnerável à umidade. Ensaios de difração de raios-X (DRX) confirmaram a formação de portlandita em todas as amostras analisadas e de calcita nas amostras carbonatadas. Os ensaios de

microscopia eletrônica de varredura (MEV) identificaram portlandita e silicato de cálcio hidratado (C-S-H) em todas as imagens, enquanto cristais de calcita foram observados apenas nas amostras carbonatadas, que apresentaram estruturas visualmente mais agulhadas em comparação às amostras submetidas à cura úmida. Os ensaios de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) confirmaram a presença de cálcio (Ca) nas amostras de SMC, ausente nos solos puros. Medições confirmaram que o processo de carbonatação reduz os valores de pH, sendo que a formação da calcita consome íons de hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), reduzindo então a alcalinidade do solo. Aspersão de fenolftaleína mostrou que os corpos de prova submetidos à carbonatação foram totalmente carbonatados, pois mantiveram-se incolores, enquanto que os corpos de prova submetidos à cura úmida apresentaram coloração roxa. Análises estatísticas mostraram que as médias dos resultados obtidos de RCS e mini-CBR têm diferenças significativas entre os processos de cura carbonatada e úmida.

**Palavras-chave:** solo melhorado com cimento; planejamento experimental em vértices extremos; pavimentação; carbonatação; carbonatação acelerada.

**Abstract:** Infrastructure projects are often developed on soils with low bearing capacity due to geometric alignment constraints or the need to meet societal demands. The most used techniques to improve the geotechnical properties of soils are granulometric stabilization and chemical stabilization, the latter typically involving the addition of lime or cement to the soil. Adding cement to soils can induce the carbonation phenomenon, which occurs when calcium-based materials react with  $\text{CO}_2$ , potentially negatively affecting the strength and durability of these materials. This study aimed to understand the impact of carbonation on cement-improved soil (CIS) for use in pavement base layers, considering both mechanical and durability properties. The materials used in this work included two soil samples, one clayey (S1) and one sandy (S2), as well as a Portland cement. Using an experimental mixture design with extreme vertices, an optimal dosage for blending the soil samples with cement was determined. The optimal dosage consisted of 3.30% cement, 76.70% S1, and 20.00% S2. Specimens were prepared for unconfined compressive strength (UCS) tests, mini-California Bearing Ratio (mini-CBR) tests, and wetting and drying durability tests (WDD) at modified Proctor compaction energy, aiming to analyze the influence of carbonation. Two curing procedures were employed: one in a humid chamber for 31 days (wet curing) and the other initially in a humid chamber for 28 days followed by 3 days in an accelerated carbonation chamber (carbonated curing). The results obtained were as follows: UCS = 3.20 MPa for carbonated curing and UCS = 2.40 MPa for wet curing; mini-CBR = 58% for carbonated curing and mini-CBR = 88% for wet curing. Calcite formation through carbonation increased the UCS values. However, for the mini-CBR, there was a decrease in the strength of the carbonated specimens, likely due to the dissolution of calcite and the formation of calcium bicarbonate during the 20-hour immersion period. The WDD results indicated that carbonation makes the material more vulnerable to moisture. X-ray diffraction (XRD) tests confirmed the formation of portlandite in all samples and calcite in the carbonated samples. Scanning electron microscopy (SEM) analyses identified portlandite and calcium silicate hydrate (C-S-H) in all images, while calcite crystals were observed exclusively in carbonated samples, which exhibited visibly more needle-like structures compared to samples subjected to wet curing. Energy-dispersive spectroscopy (EDS) analyses confirmed the presence of calcium (Ca) in CIS samples, which was absent in the pure soils. Measurements confirmed that the carbonation process reduces pH values, as calcite formation consumes hydroxyl ions ( $\text{OH}^-$ ), thereby reducing the soil's alkalinity. Phenolphthalein

spraying showed that the carbonated specimens were fully carbonated, as they remained colorless, whereas the wet-cured specimens exhibited a purple color. Statistical analyses indicated that the mean results of UCS and mini-CBR showed significant differences between the carbonated and wet curing processes.

**Key-words:** cement-improved soil; extreme vertices experimental design; pavement; carbonation; accelerated carbonation.

### 3.1 Introdução

Nas obras de infraestrutura de transporte, os engenheiros enfrentam, frequentemente, desafios em relação à qualidade e disponibilidade dos materiais para utilização nos serviços de implantação. As obras de engenharia rodoviária visam atender às necessidades de ligação entre as cidades e aglomerações urbanas para suprir o crescimento populacional e às demandas de transportes de pessoas e produtos. Os alinhamentos rodoviários de ligação entre áreas urbanizadas pré-existentes, aliados às questões topográficas locais, têm como consequência a necessidade de construção de pavimentos em solos de baixa capacidade de suporte. Estes solos, que estão presentes nos locais das obras, muitas vezes são utilizados como subleito e demais camadas de pavimento (reforço de subleito, sub-base e base) (Rodrigues *et al.*, 2024).

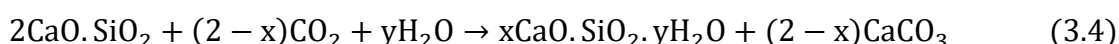
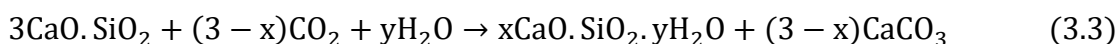
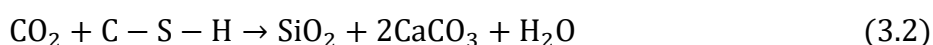
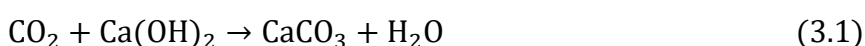
Para atender às demandas de dimensionamento dos pavimentos, tais solos de baixa capacidade de suporte precisam ser melhorados geotecnica e de modo a apresentar melhores desempenhos mecânicos e de durabilidade, minimizando problemas de médio e longo prazos no pavimento, como fissuras por fadiga e trilhas de roda. Estes melhoramentos incluem misturas com diversos outros materiais, tais como cimento Portland, cal, óxido de magnésio, escória de forno panela, escória de forno elétrico a arco, cinza volante, dentre outros (Chaiyaput *et al.*, 2022; Estabragh *et al.*, 2020; Hossen; Gallant; Ashraf, 2020; Lopes *et al.*, 2022; Rodrigues *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2024; Rodrigues *et al.*, 2021).

Misturas de solo com tais produtos podem expô-lo ao processo de carbonatação, fenômeno químico que ocorre quando materiais à base de cálcio entram em contato com o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) do ar. Este processo pode, no decorrer do tempo, afetar negativamente o desempenho destes materiais nos diversos usos em obras de engenharia. Portanto, o conhecimento das consequências deste fenômeno é fundamental para a manutenção da qualidade nas obras (Martins *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2024).

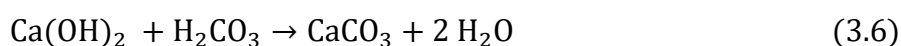
Diversos estudos científicos têm analisado o efeito da carbonatação nos solos melhorados ou estabilizados com cimento, cal, óxido de magnésio, escória de aciaria elétrica primária, dentre outros. No âmbito da engenharia de solos, o estudo da carbonatação é extremamente importante, pois está relacionado à durabilidade dos materiais, que corresponde à manutenção das propriedades de engenharia acima dos

valores mínimos de projeto durante a vida útil da estrutura em que estes materiais tenham sido empregados (Estabragh *et al.*, 2020; Hossen; Gallant; Ashraf, 2020; Rodrigues *et al.*, 2024; Vitale; Deneele; Russo, 2021; Xu *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2018).

Do ponto de vista químico, a carbonatação está intimamente relacionada com as reações de hidratação de compostos cimentícios [silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) e silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S), por exemplo], das quais resultam o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (CH), também conhecido como portlandita, os quais, por sua vez, reagem com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), formando o carbonato de cálcio ou calcita (CaCO<sub>3</sub>). As Equações 3.1 e 3.2 apresentam as reações de carbonatação associadas a estes compostos (Sella, 2022). Partículas de clínquer não hidratadas também podem sofrer carbonatação para precipitar cristais de carbonato de cálcio, conforme as Equações 3.3 e 3.4 (Dwivedi; Gupta, 2024).



Na presença de água nos poros, o processo de carbonatação ocorre com a difusão de CO<sub>2</sub> através dos poros, formando o ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) através da absorção e dissolução do CO<sub>2</sub>. Ocorre, então, a dissolução do CH para liberar íons de Ca<sup>2+</sup> e OH<sup>-</sup>. O ácido carbônico também passa por dissolução para liberar íons de bicarbonato (HCO<sup>3-</sup>) e íons carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). O carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) é então formado pela reação entre os íons Ca<sup>2+</sup> e CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, conforme demonstrado nas Equações 3.5 e 3.6 (Deneele *et al.*, 2021; Martins, 2017; Rodrigues *et al.*, 2024).



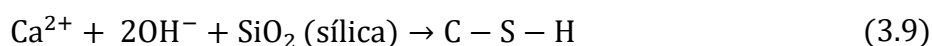
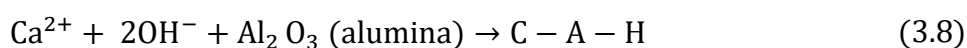
Como o fenômeno da carbonatação consome o CO<sub>2</sub> do meio ambiente, tal fato pode minimizar os problemas do efeito estufa. No entanto, as mudanças nas características do solo, incluindo características físicas, químicas, mecânicas e de durabilidade, causadas pela carbonatação são complexas, o que traz desafios para possíveis aplicações na engenharia (Li *et al.*, 2023).

As reações de carbonatação, que geram o carbonato de cálcio, inicialmente provenientes do CH, contribuem em curto prazo para o aumento da resistência mecânica de solos tratados com cimento, pois promovem o preenchimento dos poros e contribuem para a densificação do material. No entanto, no decorrer do tempo, pode ocorrer uma diminuição da resistência devida à possível carbonatação do C-S-H na medida que ocorre a diminuição de CH disponível no sistema (Ho *et al.*, 2017).

A carbonatação do C-S-H o leva a descalcificação, gerando sílica amorfa (ou gel de sílica) e carbonato de cálcio (Equação 3.2), fato que compromete as características originais de ligações cimentícias fortes geradas pelo C-S-H, prejudicando a resistência, a rigidez e a durabilidade do material. Além disso, a sílica amorfa pode passar por polimerização e resultar em retração que gera fissuras internas.

Os carbonatos formados podem prejudicar as reações pozolânicas, ou seja, o CH consumido na carbonatação indica diminuição potencial de formação de aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e C-S-H (Azevedo *et al.*, 2019; Barman; Dash, 2022; Deneele *et al.*, 2021; Padmaraj; Arnepalli, 2021; Xu *et al.*, 2020).

As reações pozolânicas, que tendem a ser prejudicadas pela carbonatação, ocorrem quando o CH se dissocia em íons de cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e íons de hidroxila (OH<sup>-</sup>) (Equação 3.7), sendo que os íons OH<sup>-</sup> aumentam o pH do ambiente (>12), levando à dissolução da alumina e sílica presentes na fração argila do solo. Os íons Ca<sup>2+</sup> se ligam à alumina e à sílica dissolvidas para formarem C-A-H e C-S-H (Equações 3.8 e 3.9) (Dwivedi; Gupta, 2024).



Li *et al.* (2023) revisaram diversos trabalhos e perceberam que a carbonatação de solos estabilizados pode ter efeitos positivos ou negativos, que vão depender de fatores internos, como propriedades físicas e químicas iniciais dos solos e ligantes (cal, cimento e óxido de magnésio), e de fatores externos, como condições e tempos de cura e carbonatação. Entre os efeitos positivos destaca-se a melhoria das propriedades mecânicas através do efeito de preenchimento, cimentação, trocas iônicas e aglomeração. Quanto aos efeitos negativos, a atenuação da resistência pode ocorrer devido à descalcificação de substâncias cimentantes, à dissolução de carbonatos nos poros do solo e à expansão de microfissuras, o que compromete a cimentação entre as partículas e aumenta a porosidade do solo.

Neste contexto, a análise da durabilidade dos materiais geotécnicos suscetíveis ao processo de carbonatação mostra-se crucial. Por exemplo, o solo estabilizado com cimento que passou por carbonatação pode ter sua resistência à compressão simples reduzida quando submetido a ciclos de molhagem e secagem. Portanto, situações severas, como chuva e temperatura, podem deteriorar o material carbonatado e devem ser consideradas quando há perspectiva de seu uso em camadas de infraestrutura rodoviária (Li *et al.*, 2023).

Dwivedi e Gupta (2024) estudaram, por meio da cura por carbonatação acelerada, o efeito da carbonatação nas propriedades de engenharia e microestrutura de argamassas de solos estabilizados com cimento e cal para uso na construção civil (alvenaria). Este estudo mostrou que a precipitação de carbonato de cálcio contribuiu majoritariamente para a absorção total de CO<sub>2</sub>, sendo que, no geral, a carbonatação demonstrou desempenho satisfatório em termos de resistência dos materiais.

A carbonatação acelerada é uma técnica que simula a carbonatação em um curto período de tempo, obtendo assim, de forma rápida, o resultado deste processo químico no material, que ocorreria de forma mais lenta no campo. O processo de carbonatação acelerada pode ser aplicado às diversas misturas de solos com cimento, cal, óxido de magnésio e escória de aciaria elétrica primária (Estabragh *et al.*, 2020; Hossen; Gallant; Ashraf, 2020; Martins, 2017; Oliveira, 2019; Rodrigues, 2022; Ribeiro Rodrigues, 2022; Sella, 2022).

Percebe-se, ao analisar a literatura científica, que existem muitos estudos sobre a carbonatação de diversos materiais à base de cálcio, para diversos usos na engenharia, tais como grante para preenchimento de blocos em alvenaria estrutural (Martins *et al.*, 2018), concreto estrutural (Alshaeer *et al.*, 2022; Kirchheim;

Rheinheimer; Dal Molin, 2015; Oliveira *et al.*, 2019), argamassas de solo-cimento e solo-cimento-cal para uso na construção civil (revestimentos e alvenarias) (Dwivedi; Gupta, 2024; Sella, 2022), argamassas de solo-cimento para obras de infraestrutura (Wang *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2022), solo estabilizado (teor do estabilizante a partir de 5%) com magnésia e cimento para uso em pavimentos (Estabragh *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2018), solo estabilizado com cimento (teor de cimento de 8%) para uso em estruturas sujeitas à secagem rápida, como encontros de pontes ferroviárias (Ho *et al.*, 2017), solo-cal para uso em obras de infraestrutura (Deneele *et al.*, 2021; Hossen; Gallant; Ashraf, 2020; Padmaraj; Arnepalli, 2021; Vitale; Deneele; Russo, 2021; Xu *et al.*, 2020), escória de forno elétrico a arco (Rodrigues *et al.*, 2024), dentre outros. No entanto, percebe-se uma lacuna na literatura técnico-científica no estudo da carbonatação de solos melhorados com cimento [(SMC) (teor de cimento variando de 2% a 4%)] para uso em camada de base de pavimentos.

Assim sendo, este estudo analisou o efeito da carbonatação de uma mistura de SMC nas propriedades de resistência à compressão simples (RCS), mini-CBR (*mini-California Bearing Ratio*), expansão e durabilidade por molhagem e secagem (DMS). Foram realizadas também análises complementares para verificação da mineralogia e microscopia do material através dos ensaios de Difração de Raios-X (DRX) e de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em conjunto com a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), além de medidas de valores de pH e determinação da frente de carbonatação com fenolftaleína. Desde modo, este estudo buscou contribuir para a difusão do conhecimento destes materiais na aplicação em camada de base de pavimentos asfálticos.

## **3.2 Materiais e métodos**

### **3.2.1 Materiais**

#### **3.2.1.1 Solos**

As amostras de solos utilizadas neste estudo foram provenientes de jazidas localizadas no município de Viçosa, região da Zona da Mata, estado de Minas Gerais, Brasil. Foram utilizadas duas amostras de solos, uma com predominância de partículas de tamanho argila (S1) e outra com predominância de partículas de

tamanho areia (S2). A amostra S1 apresenta coloração avermelhada, e a amostra S2 apresenta coloração esbranquiçada.

Conforme o procedimento PRO 003 (DNER, 1994), as referidas amostras de solos foram coletadas no estado deformado, mediante escavação com ferramenta manual. Posteriormente, foram armazenadas e transportadas em tonéis (bombonas) adequadamente vedados até o Laboratório de Engenharia Civil (LEC) pertencente ao Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). A norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2024) foi utilizada para a preparação das amostras de solo visando a realização dos ensaios de caracterização geotécnica e de compactação.

Os ensaios realizados para fins de caracterização e posterior classificação geotécnicas das amostras de solo foram:

- i) Granulometria conjunta, conforme a norma técnica NBR 7181 (ABNT, 2018b);
- ii) Limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), conforme as normas técnicas NBR 6459 (ABNT, 2017c) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente;
- iii) Massa específica dos grãos do solo ( $\rho_s$ ), conforme a norma técnica NBR 6458 (ABNT, 2017b).

As amostras de solos S1 e S2 foram classificadas segundo a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), de acordo com a CLA 259 (DNIT, 2023a), e segundo os sistemas de classificação de solos TRB (*Transportation Research Board*), conforme a M 145-91 (AASHTO, 2021), e USC (*Unified Soil Classification*), conforme a D2487 (ASTM, 2020).

Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 3.1.

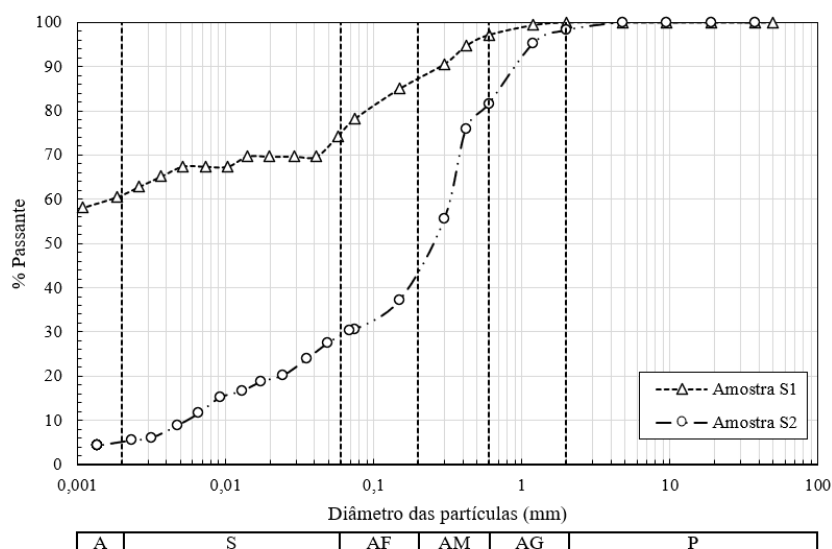
Tabela 3.1: Caracterização e classificação geotécnicas dos solos.

Parâmetro	S1	S2
% argila ( $\phi^* < 0,002$ mm)	61	5
% silte ( $0,002$ mm $< \phi < 0,06$ mm)	14	24
% areia ( $0,06$ mm $< \phi < 2$ mm)	25	68
% pedregulho ( $2$ mm $< \phi < 60$ mm)	0	3
LL (%)	78	36
LP (%)	43	18
IP* (%)	35	18
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,869	2,657
TRB	A-7-5 (20)	A-2-6 (1)
USC	MH	SC
MCT	LG'	NA'

\*:  $\phi$  – Diâmetro das Partículas do Solo; IP – Índice de Plasticidade.

A Figura 3.1 apresenta as curvas de distribuição granulométrica referentes às duas amostras de solo, sendo possível observar que a amostra de solo S1 possui elevado teor de argila (argila areno-siltosa) em sua composição e que a amostra de solo S2 (areia silto-argilosa) possui elevado teor de areia.

Figura 3.1: Curvas granulométricas dos solos\*.



\*: A – Argila; S – Silte; AF – Areia Fina; AM – Areia Média; AG – Areia Grossa; P – Pedregulho.

Através da técnica de fluorescência de raios-X (FRX), foram obtidas informações em relação à composição química dos solos, seguindo os procedimentos da norma ISO/TR 18336 (ABNT, 2022). Na Tabela 3.2, são apresentados os resultados, inclusive os percentuais de perda ao fogo.

Tabela 3.2: Composição química obtida pela FRX dos solos S1 e S2.

Material	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Cl (%)	Outros compostos (%)	PF* (%)
S1	27,11	24,52	12,47	0,02	1,28	0,07	1,55	1,53	0,04	0,27	31,14	11,49
S2	36,27	24,31	1,92	0,17	1,41	1,30	2,40	0,18	0,03	0,22	31,79	4,19

\*Perda ao fogo.

Através do ensaio de difração de raios-X (DRX), foram obtidos dados mineralógicos das amostras dos solos, sendo realizadas medidas teta-2teta na faixa de 5 a 80 graus, utilizando passo de 0,05 graus, com 1 segundo por passo. O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios-X, da marca Brucker, modelo D8 DISCOVER, localizado no Laboratório de Difração de Raios-X, no Departamento de Física (DEF) da UFV. Os resultados são apresentados nas Figuras 3.2 e 3.3.

Figura 3.2: Difratograma da amostra de solo S1.

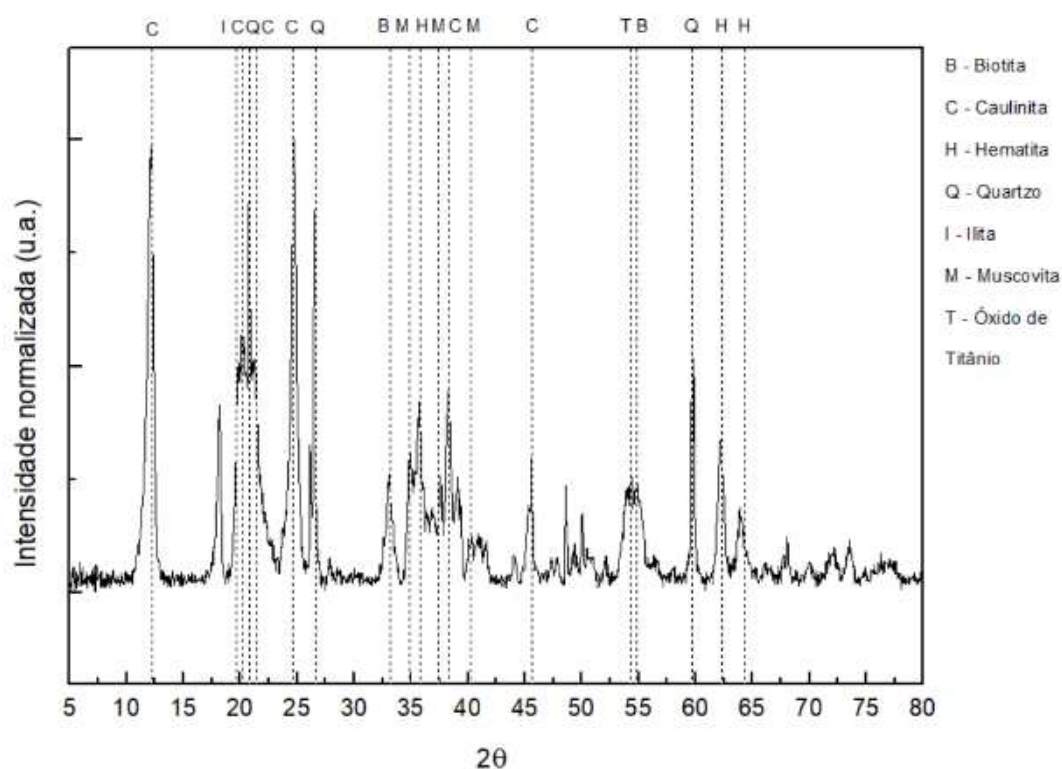
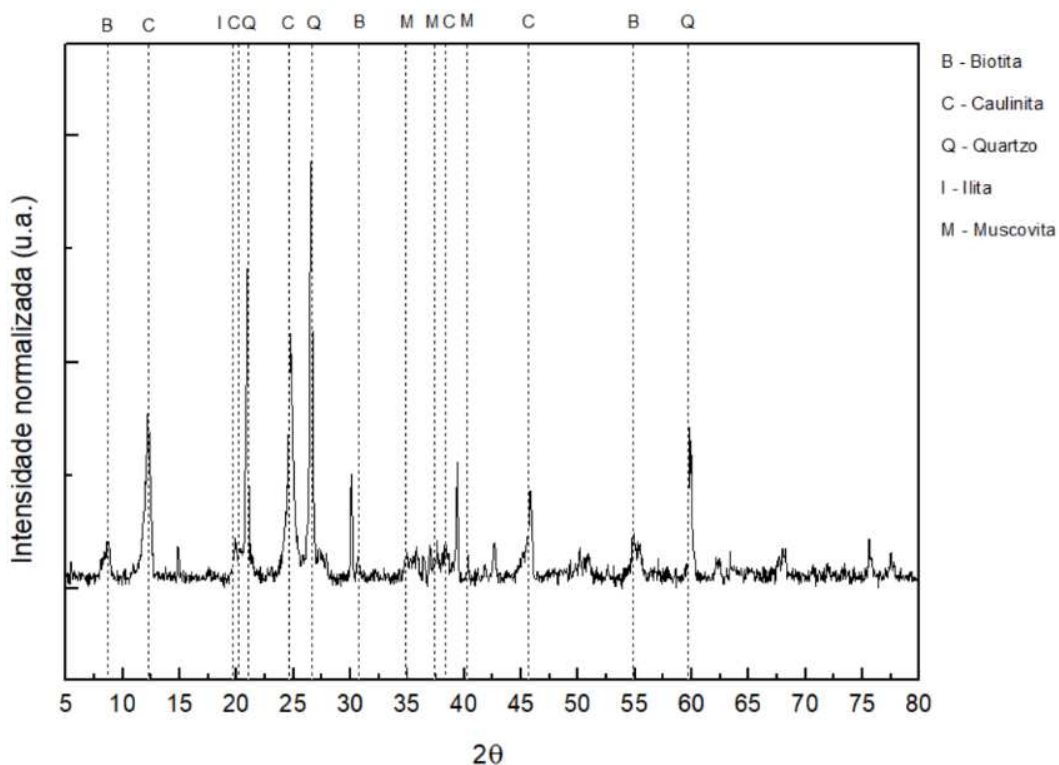


Figura 3.3: Difratoograma da amostra de solo S2.



Pode-se observar, no solo S1, a predominância dos elementos químicos silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe), nas formas de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) (sílica/quartzo), caulinita e hematita, que é o principal composto relacionado à coloração vermelha do material. Interessante notar que os elementos Si, Al e Fe encontrados no solo S1 são considerados os constituintes químicos mais importantes dos solos lateríticos, confirmando a classificação MCT, que indicou o solo como argiloso com comportamento laterítico (LG') (Borba, 1984). Vale ressaltar que a presença do titânio (Ti) através do dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), no percentual de 1,53%, confirma a indicação de que o solo S1 se encontra em processo de laterização, visto ser muito recorrente a presença deste composto em solos lateríticos em percentuais elevados, podendo chegar em até 7,00% (Araújo, 2022; Borba, 1984; Franco, 2012; Martinez, 2003).

A amostra de solo S2, de coloração clara, possui predominância dos elementos Si e Al, nas formas de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) (sílica/quartzo) e caulinita, sendo que o percentual de Si, na forma de  $\text{SiO}_2$ , é superior em relação aos demais elementos encontrados no material. A caulinita, presente na amostra de solo S2, é um silicato de alumínio hidratado que pode ser o composto relacionado à coloração esbranquiçada do solo (Rodrigues, 2022).

Através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi possível obter características microestruturais das amostras dos solos S1 e S2 (Figuras 3.4 e 3.5). O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura, da marca JEOL, modelo JSM-6010LA, localizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, no DEF da UFV.

A amostra S1 apresentou granulação fina com grãos de diâmetros em torno de 2  $\mu\text{m}$  na forma lamelar [Figura 3.4(b)], tendo estrutura mais compacta, ao compará-la à estrutura da amostra S2, devido ao efeito da agregação de suas partículas através dos óxidos de ferro e alumínio [Figura 3.4(a)]. Na amostra S2, foi possível observar grãos maiores que 100  $\mu\text{m}$  [Figura 3.5(a)], de forma cúbica, sendo que seus grãos finos apresentaram formas lamelares e prismáticas [Figura 3.5(b)] (Rodrigues, 2022).

Figura 3.4: Micrografias do solo S1: (a)x100; (b)x10.000.

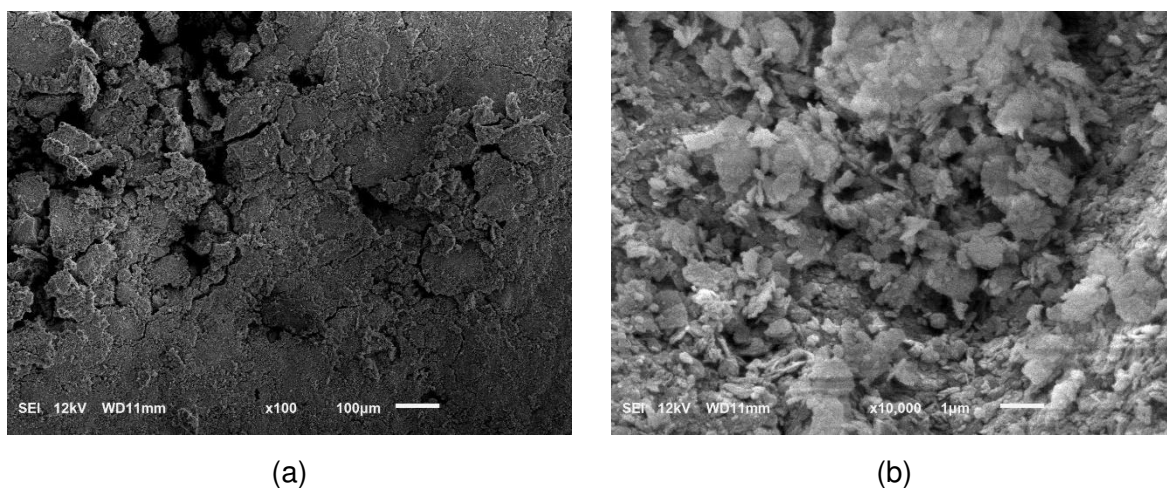
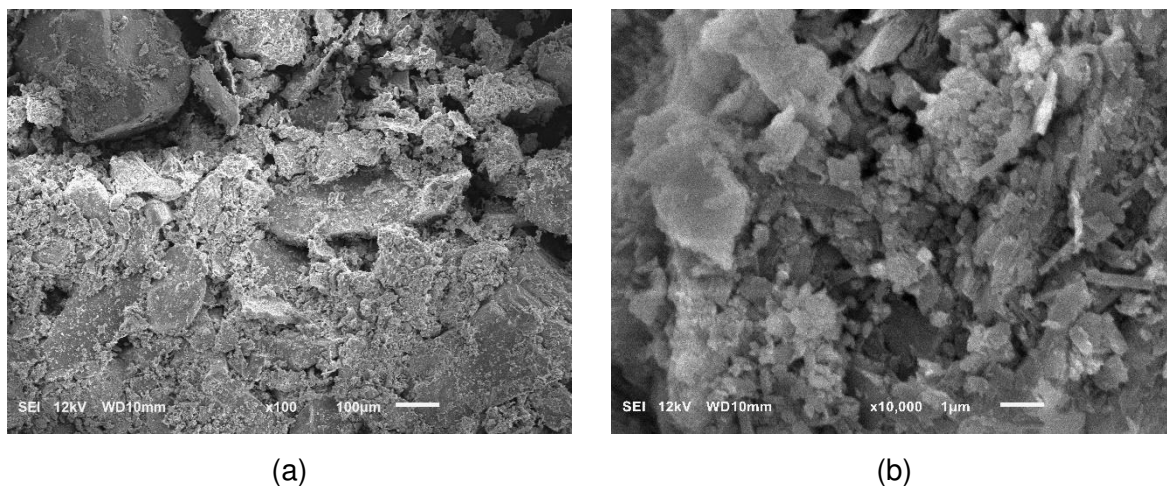


Figura 3.5: Micrografias do solo S2: (a)x100; (b)x10.000.



Também foi realizado o ensaio de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), conforme a norma E1508-12a (ASTM, 2019), objetivando determinar os elementos químicos presentes nas amostras S1 e S2 (Tabela 3.3). Os dados obtidos no FRX foram coerentes com os obtidos por EDS, ou seja, a amostra S1 possui predominância do elemento Fe em relação à amostra S2 que, por sua vez, apresenta maior percentual de Si em relação à amostra S1.

Tabela 3.3: Elementos químicos presentes nas amostras de solo S1 e S2.

Fórmula química	% em massa	
	S1	S2
C	9,39	9,94
O	39,89	41,58
Al	19,42	20,90
Si	16,07	23,77
Fe	15,22	-
Mg	-	0,82
K	-	3,00

### 3.2.1.2 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado na pesquisa foi adquirido em uma casa de materiais de construção em Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil, sendo do tipo CII-E-32. Esse tipo de cimento foi definido por sua facilidade de obtenção no mercado de materiais de construção em diversos locais do país.

Os ensaios para a caracterização física das amostras de cimento Portland foram:

- i) Índice de finura por peneiramento na peneira 75  $\mu\text{m}$  (n.º 200), conforme a norma técnica NBR 11579 (ABNT, 2013);
- ii) Superfície específica, conforme a norma técnica NBR 16372 (ABNT, 2015);
- iii) Massa específica, determinada com o emprego do frasco volumétrico de Le Chatelier, conforme a norma técnica NBR 16605 (ABNT, 2017a).

Os resultados e exigências, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018a), destes ensaios são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Caracterização física do cimento Portland.

Propriedades	Resultados	Exigências (ABNT-NBR 16697, 2018a)
Índice de finura (%)	0,62	≤ 12,00
Superfície específica (m <sup>2</sup> /kg)	178,58	-
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,91	-

### 3.2.2 Métodos

#### 3.2.2.1 Determinação da mistura relativa à dosagem ótima

A determinação da dosagem ótima da mistura dos solos S1 e S2 melhorada com cimento Portland (SMC), foi realizada com o auxílio do *software* Minitab 18. Os parâmetros mecânicos utilizados para esta determinação foram RCS e CBR, os quais são considerados em projetos de engenharia rodoviária dimensionados pelo método empírico (DNIT, 2006), sendo que a busca por maximizações destas propriedades tem por objetivo garantir que o material apresente melhor desempenho em camadas estruturais de pavimentos.

De posse dos resultados destas propriedades mecânicas (RCS e CBR), foi determinada a dosagem ótima através da utilização da função desejabilidade, no *software* Minitab 18, buscando a desejabilidade com valor igual a 1. Tal desejabilidade unitária significa que os valores almejados para cada propriedade mecânica analisada estão sendo atingidos (Rodrigues *et al.*, 2023).

A opção otimizador de resposta, que usa a função desejabilidade, foi aplicada tomando-se como alvo determinados valores para as propriedades mecânicas RCS e CBR. Ou seja, buscou-se atingir determinados valores para que a mistura relativa à dosagem ótima atendesse aos objetivos de desempenho mecânico requeridos pelo método empírico de dimensionamento. Selecionou-se a meta maximizar, tendo como alvo os valores de RCS e CBR apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Valores alvo para as propriedades mecânicas consideradas no procedimento de dosagem das misturas SMC.

Propriedade	Meta	Inferior	Alvo
RCS (MPa)	Maximizar	0	2,1
CBR (%)	Maximizar	0	80

O valor de RCS utilizado para a análise seguiu a recomendação da NBR 12253 (ABNT, 2012c), que indica valor mínimo de 2,1 MPa para solo-cimento no uso de camadas de pavimentos. No caso do CBR, foi adotado o valor recomendado pela especificação de serviço ES 142 (DNIT, 2022b), a qual indica CBR  $\geq$  80% e expansão máxima de 0,5%, para uso em base de pavimentos asfálticos para tráfego pesado. A Tabela 3.6 apresenta a dosagem ótima obtida.

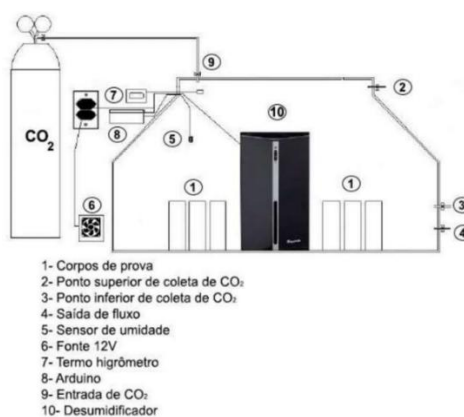
Tabela 3.6: Dosagem ótima obtida com a função otimizador de resposta do *software* Minitab 18.

Mistura	Cimento Portland (%)	Solo S1 (%)	Solo S2 (%)
Dosagem ótima	3,30	76,70	20,00

### 3.2.2.2 Procedimento de carbonatação acelerada

Para a execução do processo de carbonatação sobre a mistura relativa à dosagem ótima, foi utilizada uma câmara de carbonatação acelerada (Figura 3.6) desenvolvida no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) no estudo conduzido por Martins *et al.* (2018).

Figura 3.6: Croqui e imagem da câmara de carbonatação acelerada: Fonte (Martins *et al.*, 2018).



O sistema possui sensores de umidade e temperatura e desumidificador controlado por *Arduino*, com o objetivo de manter a atmosfera interna na câmara de carbonatação dentro dos parâmetros adequados. Assim sendo, o *Arduino* foi programado para ligar o desumidificador, caso o sensor de umidade marcasse valor maior ou igual a 80%, e desligar quando o sensor acusasse leitura menor ou igual a 65%, mantendo assim a umidade relativa controlada, como recomendado para ensaios de carbonatação acelerada (Oliveira *et al.*, 2019).

Na câmara de carbonatação acelerada, os corpos de prova foram expostos à ambiente entre 95% e 100% de concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura em torno de 20 a 25 °C. A saturação de CO<sub>2</sub> foi executada manualmente por fluxos intercalados diários, até atingir 100% de concentração. Ressalta-se que tal metodologia foi utilizada por diversos autores (Castellote *et al.*, 2004; Kirchheim; Rheinheimer; Dal Molin, 2015; Oliveira *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2024).

Esse procedimento permitiu estudar os efeitos da carbonatação nas respostas mecânicas, de expansibilidade e de durabilidade dos corpos de prova correspondentes à dosagem ótima. Procedimentos similares de exposição de corpos de prova à carbonatação já foram realizados em diversos estudos, utilizando misturas de solo com cal, cimento, resíduos industriais e óxido de magnésio (Deneele *et al.*, 2021; Estabragh *et al.*, 2020; Padmaraj; Arnepalli, 2021; Rodrigues *et al.*, 2024; Vitale; Deneele; Russo, 2021; Xu *et al.*, 2020).

### **3.2.2.3 Parâmetros de compactação da mistura relativa à dosagem ótima**

Para a moldagem dos corpos de prova e a realização dos ensaios de RCS, mini-CBR e DMS, foram determinados, para a mistura relativa à dosagem ótima, os parâmetros massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ) e teor de umidade ótimo ( $w_{ot}$ ) (Tabela 3.7), através do ensaio de compactação na energia Proctor modificada, conforme a NBR 7182 (ABNT, 2020). A escolha da energia Proctor modificada teve por objetivo a viabilização do material em estudo para aplicação em camada de base de pavimentos asfálticos [ES 142 (DNIT, 2022b)].

Tabela 3.7: Parâmetros de ótimo do ensaio de compactação da dosagem ótima.

Mistura	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	w <sub>ot</sub> (%)
Dosagem ótima	1,688	21,80

### 3.2.2.4 Moldagem, cura e aceitabilidade dos corpos de prova

Definidos os parâmetros de compactação ( $\rho_{dm\acute{a}x}$  e w<sub>ot</sub>) da mistura relativa à dosagem ótima, obtida através do planejamento experimental em vértices extremos, foram moldados corpos de prova para a execução dos ensaios de RCS, mini-CBR e DMS. Os corpos de prova foram submetidos à carbonatação acelerada por 3 dias em câmara de carbonatação, prazo que foi definido através de testes anteriores que mostraram, através de aspersão com fenolftaleína, que os 3 dias seriam suficientes para carbonatar totalmente os corpos de prova.

Os corpos de prova usados para o ensaio de RCS foram moldados em formatos cilíndricos, com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, compactados através de prensa hidráulica em 4 camadas, submetidos à cura selada em filme de PVC, em câmara úmida por 28 dias. Finalizados os 28 dias em câmara úmida, metade dos corpos de prova ficou mais 3 dias em câmara úmida (28 dias + 3 dias em câmara úmida), processo denominado de “cura úmida”, e a outra metade foi submetida à carbonatação através da câmara de carbonatação acelerada durante 3 dias (28 dias em câmara úmida + 3 dias em câmara de carbonatação), processo denominado de “cura carbonatada”.

Os corpos de prova usados para o ensaio de mini-CBR foram moldados na energia Proctor modificada, nas dimensões e especificações estabelecidas na norma técnica ME 228 (DNIT, 2023b). Como a norma técnica não possui o número de golpes para a energia Proctor modificada, foi calculada a massa necessária para que, após determinados golpes, os corpos de prova chegassem à altura especificada de (50 ± 1) mm, atingindo assim o grau de compactação pretendido, considerando o teor de umidade ótimo. Os corpos de prova foram submetidos à cura selada, envoltos em sacos plásticos, na câmara úmida, por 28 dias. Finalizados os 28 dias em câmara úmida, metade dos corpos de prova ficou mais 3 dias em câmara úmida (cura úmida), e a outra metade foi submetida à carbonatação através da câmara de carbonatação acelerada durante 3 dias (cura carbonatada). Finalizados os processos de cura, os

corpos de prova foram imersos em água pelo período de 20 horas, com sobrecarga, para a obtenção dos resultados de expansão, sendo posteriormente levados à prensa para a execução do processo de penetração através de pistão.

Os corpos de prova para o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem (DMS) foram moldados conforme a NBR 12024 (ABNT, 2012a), na energia Proctor modificada, e submetidos à cura selada, envoltos em sacos plásticos, na câmara úmida, por 28 dias. Finalizados os 28 dias em câmara úmida, metade dos corpos de prova ficou mais 3 dias em câmara úmida (cura úmida), e a outra metade foi submetida à carbonatação através da câmara de carbonatação acelerada durante 3 dias (cura carbonatada).

O período de cura em câmara úmida de 28 dias foi escolhido com o objetivo de permitir o desenvolvimento significativo da resistência mecânica do material. Este prazo é amplamente reconhecido como o intervalo em que ocorre a maior parte das reações de hidratação do cimento (Akinwumi; Gbadamosi, 2014).

A cura em câmara úmida dos corpos de prova seguiu as recomendações da NBR 12024 (ABNT, 2012a).

Para a determinação das propriedades mecânicas RCS e mini-CBR, todos os corpos de prova foram moldados, no mínimo, em triplicata. Para o ensaio de DMS, realizou-se um ensaio na condição de cura úmida e um ensaio para a condição de cura carbonatada, sendo que, para cada ensaio, foram necessários 3 corpos de prova, conforme recomendações da NBR 13554 (ABNT, 2013).

Para a aceitabilidade dos corpos de prova, foram definidos, em relação à  $\rho_{dm\acute{a}x}$ , um grau de compactação variando de 97% a 103%, e em relação ao  $w_{ot}$ , uma diferença de teor de umidade de  $\pm 1,00\%$  [ES 140 (DNIT, 2022a); ES 142 (DNIT, 2022b)].

### **3.2.2.5 Resistência à compressão simples (RCS)**

Os ensaios de RCS foram realizados de acordo com a norma técnica NBR 12025 (ABNT, 2012b), sendo que os corpos de prova não foram submetidos à imersão por 4 horas. A não imersão dos corpos de prova foi escolhida para verificar, em comparação com os ensaios de mini-CBR cujos corpos de prova foram expostos à imersão durante

20 horas, a influência da água na resistência mecânica dos corpos de prova carbonatados.

### **3.2.2.6 Índice mini-CBR e expansão**

Os ensaios para a determinação dos valores de mini-CBR e da expansão mini-CBR foram realizados segundo a norma técnica ME 254 (DNIT, 2023c).

### **3.2.2.7 Durabilidade por molhagem e secagem (DMS)**

Os ensaios de DMS foram realizados de acordo com a norma técnica NBR 13554 (ABNT, 2013). Este ensaio determina a variação de volume, a variação de umidade e a perda de massa ocorridas durante ciclos de 48 horas de molhagem e secagem dos corpos de prova. Os ciclos são compostos pelas fases de imersão (5 horas), estufa (42 horas) e esfriamento e escovação (1 hora).

### **3.2.2.8 Ensaios de DRX e MEV/EDS**

Amostras dos corpos de prova moldados na dosagem ótima foram submetidas aos ensaios de DRX e MEV/EDS para a realização, respectivamente, das análises mineralógicas, microestruturais e dos elementos químicos presentes.

Foram moldados dois corpos de prova nos moldes especificados para os ensaios de RCS e de mini-CBR, sendo um exemplar submetido ao processo de cura úmida e outro submetido ao processo de cura carbonatada. Posteriormente ao processo de cura, os corpos de prova do ensaio de mini-CBR foram imersos em água durante 20 horas.

Após os procedimentos de moldagem, cura e imersão (apenas para mini-CBR) dos corpos de prova, foram extraídos fragmentos em suas regiões centrais (metade da altura e metade do diâmetro) para as análises.

Para a análise de DRX, fragmentos do corpo de prova foram obtidos e moídos com auxílio de almofariz e mão de gal. Uma porção desse material pulverulento resultante foi espalhada em uma lâmina de vidro e misturada com álcool isopropílico

de modo a garantir uma dispersão uniforme, formando uma camada fina de material. A lâmina com a amostra foi então levada ao equipamento de DRX.

Para a realização do DRX, foram realizadas medidas teta-2teta na faixa de 5 a 80 graus, utilizando passo de 0,05 graus, com 1 segundo por passo. O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios-x, da marca Brucker, modelo D8 DISCOVER, localizado no Laboratório de Difração de Raios-X, no DEF da UFV.

Para as análises de MEV/EDS, uma pequena amostra de material foi obtida e colocada em *stub* metálico, sendo que, na superfície do *stub*, antes da colocação da amostra, foi aplicada uma mistura de base de unha e grafite, de modo a criar uma película condutora de eletricidade entre a amostra e o *stub*.

Anteriormente às análises de MEV/EDS, as amostras provenientes dos corpos de prova, por se tratarem de solos melhorados com cimento, que é um material com baixa condutividade elétrica, precisaram passar por metalização por nuvem de ouro através de metalizador da marca Quorum, modelo Q150R S, do Núcleo de Microscopia e Microanálise (NMM) da UFV. A metalização visou melhorar a condutividade elétrica na superfície da amostra, garantindo uma melhor qualidade da imagem gerada. A amostra foi então levada ao equipamento.

O MEV consistiu na produção de uma imagem microscópica da amostra, e o EDS na determinação do percentual dos elementos químicos presentes em determinada região de interesse.

As análises de MEV/EDS foram realizadas utilizando um microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL, modelo JSM-6010LA, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, no DEF da UFV.

Procedimentos similares foram executados por diversos autores (Deneele *et al.*, 2021; Estabragh *et al.*, 2020; Padmaraj; Arnepalli, 2021; Rodrigues *et al.*, 2024; Vitale; Deneele; Russo, 2021; Xu *et al.*, 2020).

### **3.2.2.9 Medida de pH**

Os corpos de prova moldados para os ensaios de RCS e mini-CBR foram utilizados para a medição do pH. Os corpos de prova foram então seccionados em 5 discos de 20 mm de altura, sendo o disco central pulverizado e utilizado para a medição do pH através de um peagâmetro. Foram utilizados 10 g do material e

adicionados 50 ml de água destilada, e em seguida o conjunto foi submetido à agitação por 10 minutos e deixado em repouso por mais 10 minutos. Finalmente, o material sobrenadante foi utilizado para a determinação do valor do pH. Procedimento similar foi executado por outros autores (Deneele *et al.*, 2021; Ho *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2024; Sella, 2022; Xu *et al.*, 2020).

### **3.2.2.10 Verificação da carbonatação com fenolftaleína**

Os corpos de prova moldados para os ensaios de DRX e MEV/EDS foram selecionados para a verificação da carbonatação com fenolftaleína. Estes foram cortados na metade da altura através de um plano radial. Tanto os corpos de prova expostos ao processo de cura carbonatada quanto os que foram expostos à cura úmida foram submetidos ao teste com fenolftaleína (C<sub>20</sub>H<sub>14</sub>O<sub>4</sub>). A superfície exposta do interior dos corpos de prova foi submetida à aspersão de solução de fenolftaleína (1% em etanol), a qual é um indicador incolor, que tem a cor alterada de acordo com o valor do pH (roxo, sob pH maior que 9, e incolor, sob pH abaixo de 9). Assim sendo, foi possível verificar o nível de carbonatação dos corpos de prova, visto que a fenolftaleína permite apresentar uma região não carbonatada e outra carbonatada, através da coloração. Procedimento similar foi executado por outros autores (Deneele *et al.*, 2021; Ho *et al.*, 2017; Padmaraj; Arnepalli, 2021; Rodrigues *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2020).

### **3.2.2.11 Análise estatística**

Para os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização mecânica (RCS e mini-CBR), foram realizadas análises estatísticas através do teste t de *Student* para duas médias populacionais independentes. As análises foram realizadas ao nível de significância de 5%.

Através dos testes, foi possível concluir se houve ou não diferenças significativas entre as médias dos resultados obtidos para cada propriedade mecânica analisada, comparando-se os corpos de prova submetidos a processos de cura úmida e cura carbonatada.

### 3.3 Resultados e Discussões

#### 3.3.1 Propriedades mecânicas e de durabilidade

Foram moldados corpos de prova para a obtenção das propriedades mecânicas RCS e mini-CBR, além da determinação da durabilidade através do ensaio de DMS, sendo que metade dos corpos de prova moldados foi submetida à cura carbonatada e a outra metade à cura úmida, objetivando verificar a influência da carbonatação nas respostas mecânicas e de durabilidade estudadas.

##### 3.3.1.1 Resistência à compressão simples (RCS)

Na Tabela 3.8, são apresentados os resultados médios de RCS.

Tabela 3.8: Resultados de RCS.

Cura	RCS (MPa)
Carbonatada	3,20
Úmida	2,40

Observou-se que os corpos de prova submetidos ao processo de carbonatação acelerada apresentaram resultados médios superiores aos dos que não foram submetidos à carbonatação, sendo a média dos resultados aproximadamente 33% superior.

O maior valor de RCS para a condição carbonatada está relacionada à formação da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), que é responsável pelo preenchimento dos poros e pela cimentação interpartículas, aumentando assim a resistência mecânica do SMC (Ho *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2018).

##### 3.3.1.2 Índice mini-CBR e expansão

Na Tabela 3.9, são apresentados os resultados médios de mini-CBR e expansão.

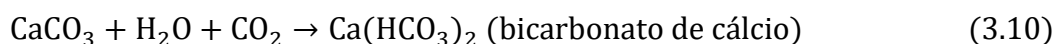
Tabela 3.9: Resultados de mini-CBR e expansão.

Cura	Mini-CBR (%)	Expansão (%)
Carbonatada	58	0,82
Úmida	88	0,04

Observou-se que os corpos de prova submetidos ao processo de carbonatação acelerada apresentaram resultados médios inferiores de mini-CBR comparativamente aos que não foram submetidos à carbonatação, sendo que a média foi aproximadamente 34% inferior. Observou-se também que a expansão relativa aos corpos de prova submetidos à cura úmida foi menor que a dos corpos de prova submetidos à cura carbonatada.

Embora o processo de carbonatação tenda a aumentar a resistência, como observado no caso da RCS, no caso do mini-CBR ocorreu o contrário, com uma diminuição do índice de suporte. Tal fato pode estar relacionado ao processo de imersão dos corpos de prova por 20 horas, conforme normatizado para a determinação do mini-CBR. Cabe ressaltar que os corpos de prova moldados para a realização do ensaio de RCS não foram imersos por 4 horas, como previsto na norma, justamente para que fosse avaliado o efeito da água nas propriedades mecânicas.

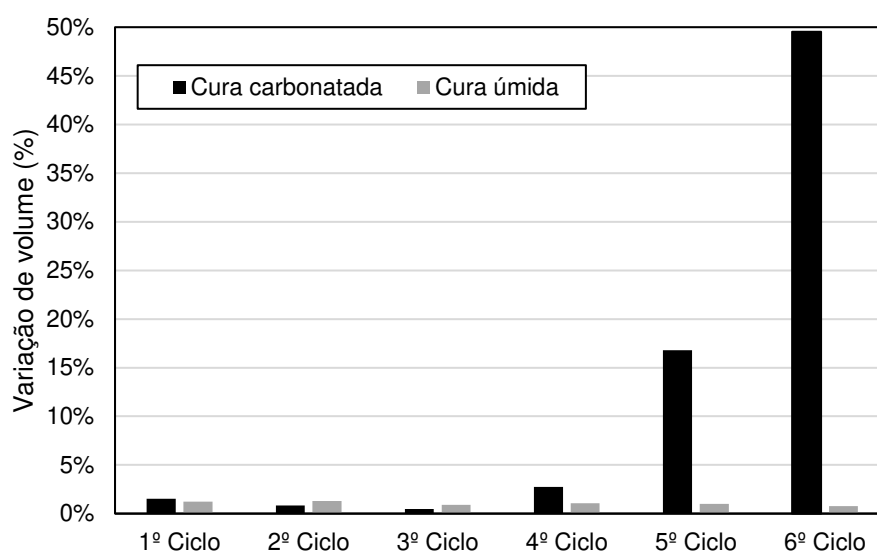
Os carbonatos de cálcio formados durante o processo de cura carbonatada podem ter sido dissolvidos na presença de H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, ao serem imersos durante 20 horas, após a cura carbonatada, gerando então o bicarbonato de cálcio (Equação 3.10), que é altamente solúvel, diminuindo então a resistência à penetração obtida pelo ensaio de mini-CBR (Alshaeer *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2022).



### 3.3.1.3 Durabilidade por molhagem e secagem (DMS)

Posteriormente aos procedimentos de cura, os corpos de prova foram submetidos a 6 ciclos de molhagem e secagem, seguindo as recomendações normatizadas. A Figura 3.7 mostra a variação de volume (%) dos corpos de prova ocorrida durante os ciclos.

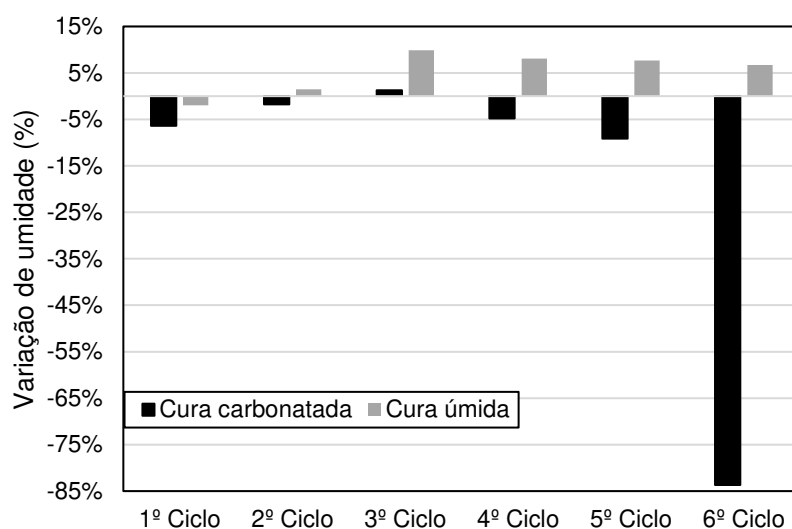
Figura 3.7: Variação de volume (%) dos corpos de prova expostos aos processos de cura carbonatada e cura úmida.



Os corpos de prova que foram submetidos à carbonatação tiveram uma diminuição de volume superior durante os ciclos comparativamente aos corpos de prova não carbonatados (expostos à cura úmida), sendo que, a partir do 5º ciclo, a variação aumentou significativamente, chegando no último ciclo próximo a 50% de redução de volume em relação ao volume inicial após a desmoldagem dos corpos de prova. Os corpos de prova que foram submetidos apenas à cura úmida mantiveram a variação de volume próxima a 1%, sendo considerados estáveis. A diminuição de volume dos corpos de prova carbonatados se deu devido à excessiva perda de massa (“pedaços”) durante os ciclos.

A Figura 3.8 mostra a variação de umidade (%) ocorrida durante os ciclos.

Figura 3.8: Variação de umidade (%) dos corpos de prova expostos aos processos de cura carbonatada e cura úmida.

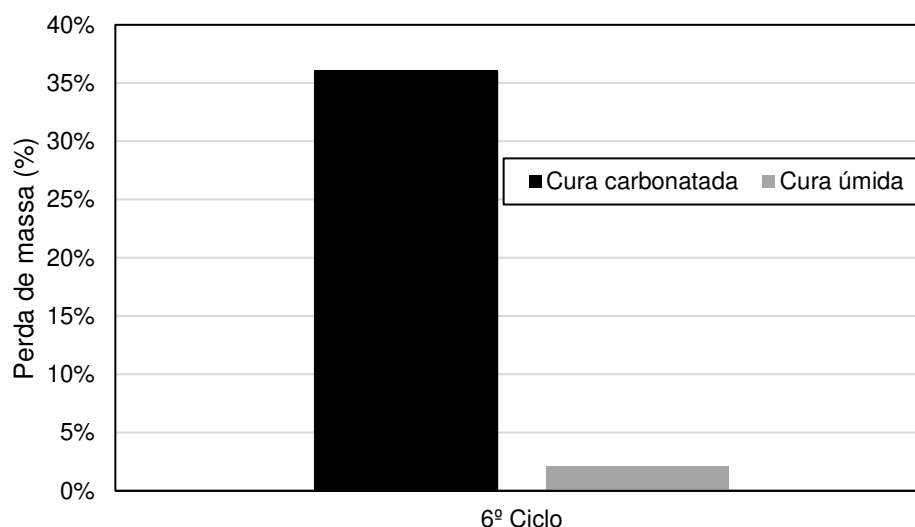


Observou-se que a variação de umidade dos corpos de prova submetidos apenas à cura úmida foi mais estável, sendo, a partir do 2º ciclo, positiva, atingindo o máximo no 3º ciclo (em torno de 10%) e chegando a aproximadamente 7% no 6º ciclo. A variação positiva, neste ensaio, indica que a umidade em cada ciclo em relação à umidade inicial no momento da moldagem diminuiu.

Em relação aos corpos de prova carbonatados, a variação em todos os ciclos, com exceção do 3º, foi negativa, culminando, no 6º ciclo, com variação de aproximadamente 84%, o que indica que a umidade aumentou significativamente em relação à umidade inicial no momento da moldagem. O excesso de umidade ocorreu devido à formação de trincas e fissuras, aumentando então a porosidade dos corpos de prova submetidos à cura carbonatada, o que pode estar relacionado à dissolução do carbonato de cálcio.

A Figura 3.9 mostra a perda de massa (%) determinada após o último ciclo de molhagem e secagem.

Figura 3.9: Perda de massa (%) determinada no último ciclo de molhagem e secagem.



Verificou-se que a perda de massa dos corpos de prova carbonatados foi superior, chegando a aproximadamente 36%, enquanto que os corpos de prova expostos à cura úmida tiveram perda de aproximadamente 2%.

Notou-se, pelos indicadores de durabilidade por molhagem e secagem, que os corpos de prova submetidos à carbonatação acelerada tiveram desempenho inferior, ou seja, a durabilidade foi reduzida nas condições impostas pelo ensaio. Tal fato indica que, no campo, onde a estrutura do pavimento está sujeita às intempéries, como variação de temperatura e umidade, o material que estiver exposto à carbonatação terá durabilidade comprometida, podendo apresentar patologias como deformações e fissuras relacionadas à dissolução do carbonato de cálcio.

A degradação dos corpos de prova carbonatados, conforme mostrada no ensaio de DMS, corrobora os resultados do ensaio de mini-CBR. Os carbonatos de cálcio podem ter sido dissolvidos na presença de  $H_2O$  e  $CO_2$  presentes nos poros dos corpos de prova após a carbonatação, gerando então o bicarbonato de cálcio, altamente solúvel (Alshaeer *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2022).

Observou-se que os corpos de prova carbonatados foram se desintegrando ao longo dos ciclos, apresentando rachaduras e extremidades quebradiças, o que explica a diminuição de volume, de massa e o aumento elevado de umidade. Já os corpos de prova expostos apenas à cura úmida permaneceram uniformes e praticamente intactos. Na Figura 3.10, são apresentados os corpos de prova no 3º ciclo submetidos à carbonatação (a) e os que foram submetidos apenas à cura úmida (b). Nos ciclos

finais, um dos corpos de prova carbonatados se partiu, conforme pode ser verificado na Figura 3.11.

Figura 3.10: Corpos de prova na fase de secagem do 3º ciclo.



(a)



(b)

Figura 3.11: Corpo de prova carbonatado no 4º ciclo de molhagem e secagem.

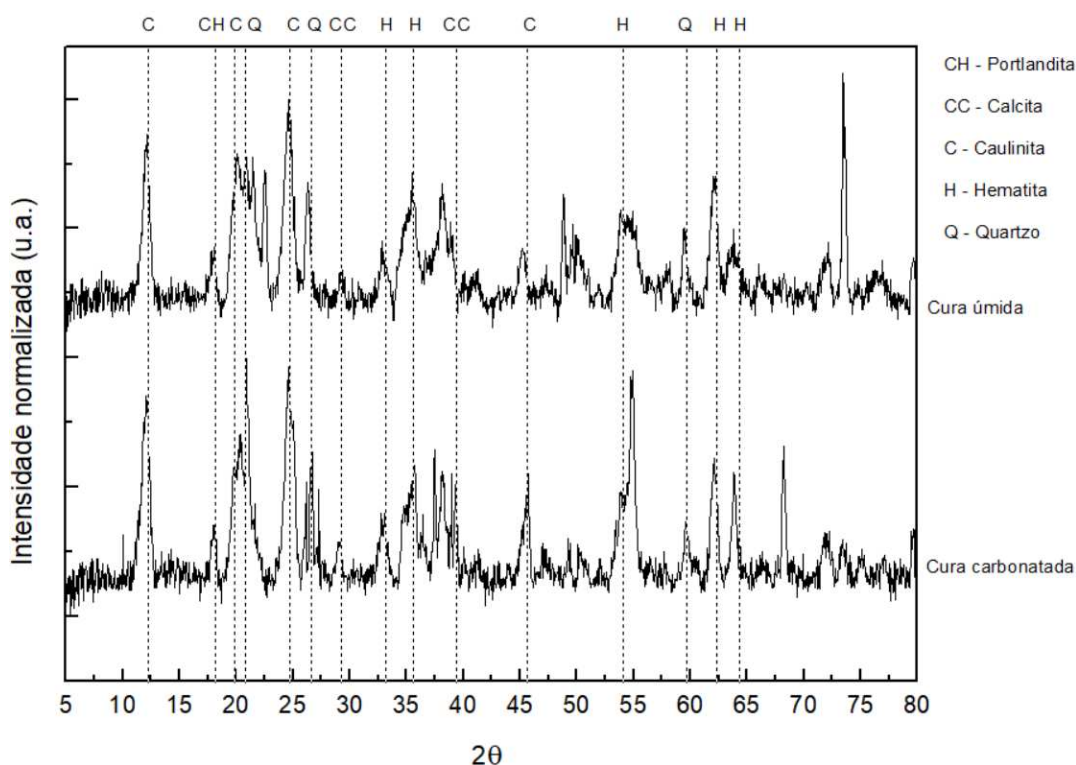


A carbonatação, portanto, não se mostrou eficaz com respeito à durabilidade, sendo que os corpos de prova carbonatados foram danificados pelos ciclos de molhagem e secagem, corroborando a hipótese de dissolução dos carbonatos na presença de água e gás carbônico.

### 3.3.2 Ensaios de DRX e MEV/EDS

Na Figura 3.12, são apresentados os difratogramas das amostras dos corpos de prova moldados conforme as especificações normativas para o ensaio de RCS e submetidos aos processos de cura conforme procedimentos explicados anteriormente (cura carbonatada e cura úmida).

Figura 3.12: Difratogramas das amostras dos corpos de prova moldados para o ensaio de RCS e submetidos às curas carbonatada e úmida.

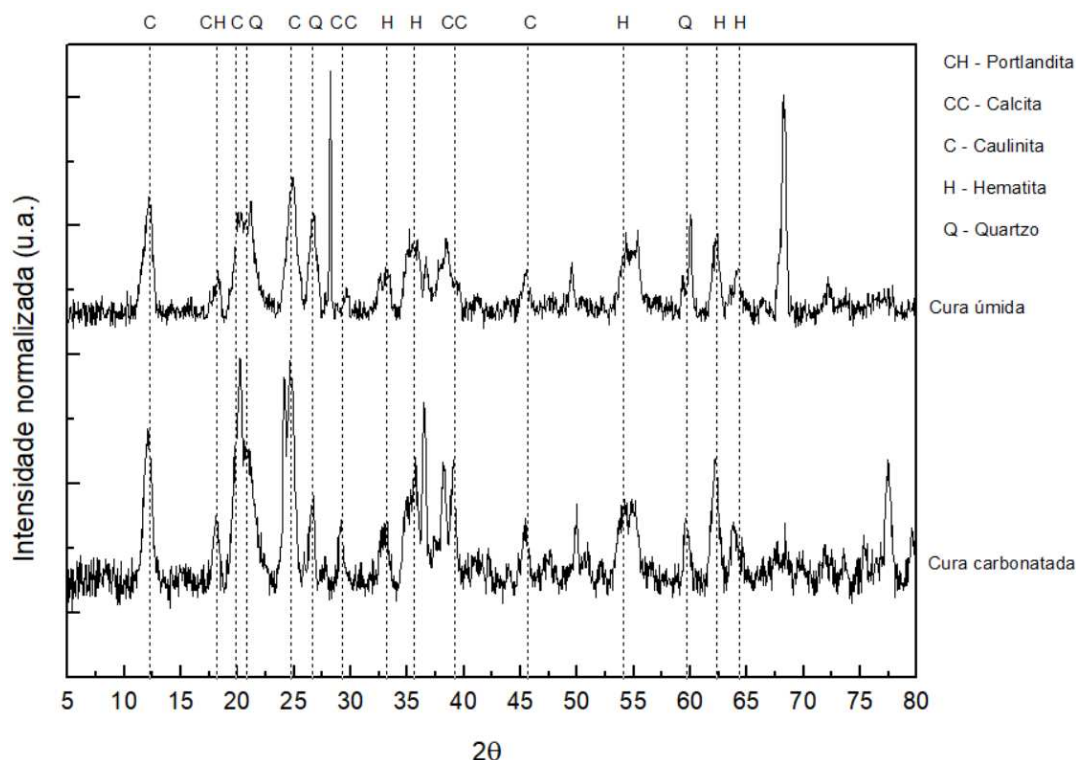


Observou-se que as amostras provenientes dos corpos de prova submetidos a ambos processos de cura apresentaram o pico principal de portlandita, composto cimentício proveniente da hidratação do cimento. Já a amostra cujo corpo de prova foi carbonatado apresentou a formação de carbonatos de cálcio (calcita) com picos bem evidentes, sendo tais picos notáveis em  $29,4^\circ$  e  $39,4^\circ$ .

Foram evidenciados também, para ambos processos de cura, picos relativos aos compostos caulinita, hematita e quartzo, provenientes das amostras dos solos.

Na Figura 3.13, são apresentados os difratogramas das amostras dos corpos de prova moldados conforme as especificações para o ensaio de mini-CBR e submetidos aos processos de cura carbonatada e úmida.

Figura 3.13: Difratogramas das amostras dos corpos de prova moldados para o ensaio de mini-CBR e submetidos às curas carbonatada e úmida.



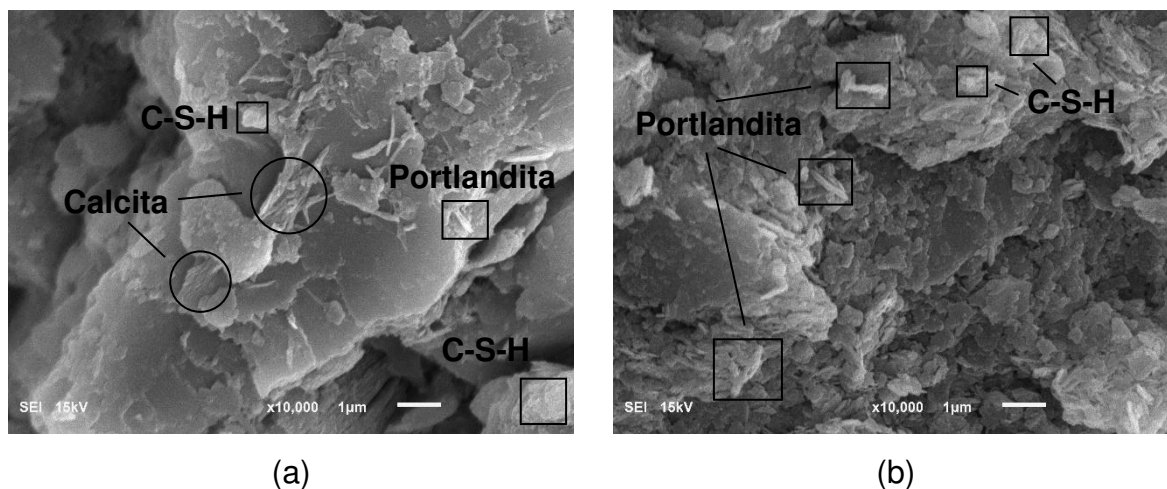
Verificou-se, de forma similar às amostras moldadas nas especificações para o ensaio de RCS, que as amostras provenientes dos corpos de prova moldados para o ensaio de mini-CBR apresentaram, para ambos processos de cura, o pico principal de portlandita, que se trata de um composto cimentício.

Para a amostra que passou pelo processo de carbonatação, foi constatada a formação de calcita, evidenciada através de picos em 29,4° e 39,4°, de forma coerente com o resultado apresentado para o corpo de prova moldado nas especificações para o ensaio de RCS.

De forma similar aos resultados dos corpos de prova moldados para o ensaio de RCS (Figura 3.12), os resultados dos corpos de prova moldados nas especificações para o ensaio de mini-CBR (Figura 3.13) apresentaram picos claros relativos aos compostos caulinita, hematita e quartzo, provenientes dos solos, que foram evidenciados para ambos processos de cura.

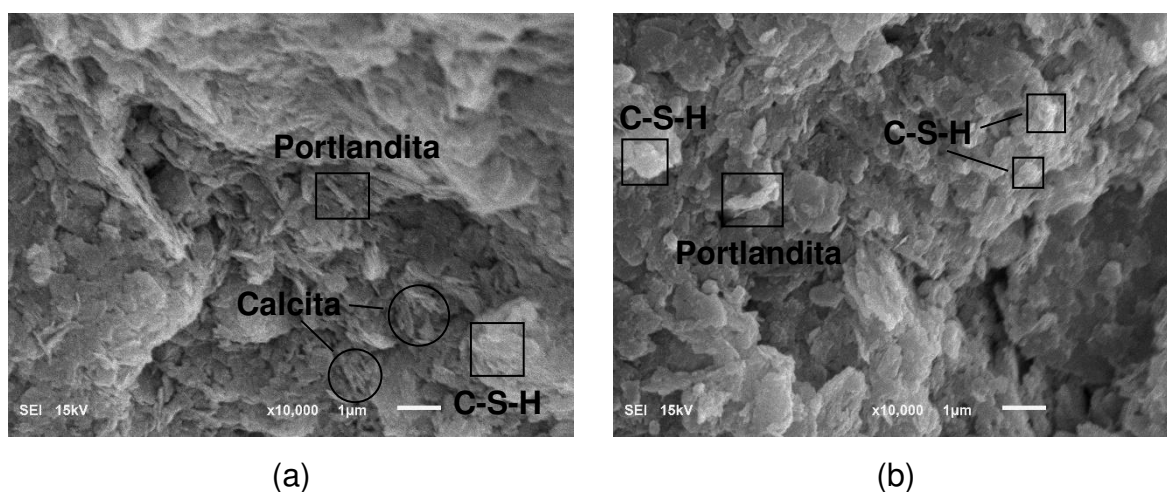
Na Figura 3.14, são apresentadas micrografias das amostras dos corpos de prova submetidos à cura carbonatada (a) e à cura úmida (b), moldados conforme as especificações para o ensaio de RCS.

Figura 3.14: Micrografias das amostras dos corpos de prova moldados para o ensaio de RCS e submetidos à cura carbonatada (a) e à cura úmida (b).



Na Figura 3.15, são apresentadas micrografias das amostras dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada (a) e úmida (b), moldados conforme as especificações para o ensaio de mini-CBR.

Figura 3.15: Micrografias das amostras dos corpos de prova moldados para o ensaio de mini-CBR submetidos à cura carbonatada (a) e à cura úmida (b).



Nas Figuras 3.14a e 3.15a, observou-se o desenvolvimento de cristais de carbonato de cálcio, provenientes do processo de carbonatação, além da presença dos compostos portlandita e C-S-H, identificados em todas as imagens. As amostras carbonatadas (Figuras 3.14a e 3.15a) exibem cristais com um aspecto visual mais agulhado, enquanto as amostras submetidas à cura úmida (Figuras 3.14b e 3.15b)

apresentam partículas com bordas mais arredondadas. O aspecto mais agulhado pode estar relacionado à formação dos carbonatos.

Na Tabela 3.10, são apresentados os resultados de EDS, relativos às regiões das imagens (a) e (b) da Figura 3.14, das amostras dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada (a) e úmida (b), moldados conforme as especificações para o ensaio de RCS.

Tabela 3.10: EDS das regiões apresentadas na Figura 3.14 (a) e (b).

Fórmula química	% em massa	
	(a)	(b)
C	13,81	15,21
O	52,29	56,44
Al	14,09	12,42
Si	11,29	10,19
Ca	2,05	1,22
Fe	6,47	4,52

Na Tabela 3.11, são apresentados os resultados de EDS, relativos às regiões das imagens (a) e (b) da Figura 3.15, das amostras dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada (a) e úmida (b), moldados conforme as especificações para o ensaio de mini-CBR.

Tabela 3.11: EDS das regiões apresentadas na Figura 3.15 (a) e (b).

Fórmula química	% em massa	
	(a)	(b)
C	17,23	16,78
O	48,00	51,33
Al	13,66	13,94
Si	9,69	11,54
Ca	1,51	1,12
Fe	9,91	5,29

Os percentuais encontrados para os diversos elementos, mostrados nas Tabelas 3.10 e 3.11, são bem similares em ambos processos de moldagem (RCS e mini-CBR) e cura (carbonatada e úmida), sendo notável observar a detecção do elemento Ca, proveniente do cimento. Cabe ressaltar que a análise de EDS das amostras dos solos S1 e S2 puros (Tabela 3.3) não mostrou a presença do elemento Ca.

### 3.3.3 Medida de valores de pH

Os corpos de prova moldados para os ensaios de RCS e mini-CBR foram utilizados para medição do valor médio de pH. Nas Tabelas 3.12 e 3.13, são apresentados os resultados das medidas de pH.

Tabela 3.12: Valores de pH dos corpos de prova usados para determinação da RCS.

Mistura	Cura	pH
Dosagem ótima	Carbonatada	8,13
Dosagem ótima	Úmida	11,26

Tabela 3.13: Valores de pH dos corpos de prova usados para determinação do mini-CBR.

Mistura	Cura	pH
Dosagem ótima	Carbonatada	8,34
Dosagem ótima	Úmida	11,16

Durante o processo de carbonatação, enquanto o CH é consumido, o pH dos corpos de prova é reduzido abaixo do valor de 9,5, resultando em um valor de 8,13 para os corpos de prova moldados para o ensaio de RCS e 8,34 para os corpos de prova usados na determinação do mini-CBR. A formação dos carbonatos de cálcio consome os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), reduzindo a alcalinidade do solo (Li *et al.*, 2023; Zheng *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2018).

### 3.3.4 Verificação da carbonatação com fenolftaleína

Os corpos de prova moldados para a confecção de amostras para a execução dos ensaios de DRX e MEV/EDS, nas especificações para os ensaios de RCS e mini-CBR em ambos processos de cura (carbonatada e úmida), foram selecionados para a verificação da carbonatação com aspensão de fenolftaleína. Os corpos de prova foram então seccionados à metade da altura, no sentido radial, sendo que, na sequência, suas superfícies foram submetidas à aspensão de fenolftaleína.

Na Figura 3.16a, está apresentado um corpo de prova moldado para o ensaio de RCS submetido à cura carbonatada, e na Figura 3.16b, está apresentado um corpo de prova moldado para o ensaio de RCS submetido à cura úmida.

Figura 3.16: Corpos de prova moldados nos padrões para o ensaio de RCS submetidos à aspersão com fenolftaleína: cura carbonatada (a); cura úmida (b).



Na Figura 3.17a, está apresentado um corpo de prova moldado para o ensaio de mini-CBR submetido à cura carbonatada, e na Figura 3.17b, está apresentado um corpo de prova moldado para o ensaio de mini-CBR submetido à cura úmida.

Figura 3.17: Corpos de prova moldados nos padrões para o ensaio de mini-CBR submetidos à aspersão com fenolftaleína: cura carbonatada (a); cura úmida (b).



Observou-se que os corpos de prova das Figuras 3.16a e 3.17a, que foram expostos ao processo de carbonatação acelerada, apresentaram-se incolores, indicando que houve carbonatação completa. Já os corpos de prova das Figuras 3.16b e 3.17b apresentaram coloração roxa, indicativo de que não foram carbonatados.

Cabe ressaltar que a fenolftaleína tem cor alterada de acordo com o valor do pH, tornando-se roxa sob pH maior que 9 e incolor sob pH abaixo de 9. A carbonatação consome íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), reduzindo a alcalinidade do material, e o corpo de prova carbonatado se mantém incolor (Ho *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2019; Padmaraj; Arnepalli, 2021; Rodrigues, 2022; Vitale; Deneele; Russo, 2021; Xu *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2018).

### 3.3.5 Análise estatística

Foram realizadas análises estatísticas, através do teste t de *Student*, para duas médias populacionais independentes, com os resultados obtidos para as propriedades mecânicas RCS e mini-CBR, sendo o nível de significância considerado de 5%.

O objetivo do teste t é verificar, para cada população analisada, se a média dos resultados para determinada característica são iguais ( $\mu_1 = \mu_2$ ) para determinado nível de significância. Para isso, foi necessário obter amostras da população, que são os corpos de prova moldados e ensaiados para cada propriedade mecânica de interesse. As características consideradas são os processos de cura (carbonatada e úmida).

Anteriormente à aplicação do teste t de *Student*, foram analisadas as normalidades dos dados através do teste de *Shapiro-Wilk* e o teste F para verificar a pressuposição das variâncias das populações serem ou não iguais entre si. Após as análises das variâncias, foi escolhida a modalidade do teste t a ser aplicada, sendo na sua forma original, no caso de variâncias iguais, ou na forma proposta por *Welch-Satterthwaite*, para o caso em que as variâncias não são iguais.

Na Tabela 3.14, são apresentadas as análises de normalidade dos dados através do teste de *Shapiro-Wilk*.

Tabela 3.14: Análises de normalidade pelo teste de *Shapiro-Wilk* para os resultados das propriedades mecânicas RCS e mini-CBR dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada e úmida.

Propriedade Mecânica	Cura	W	p-valor
RCS	Carbonatada	0,84	0,20
	Úmida	0,81	0,13
Mini-CBR	Carbonatada	0,92	0,53
	Úmida	0,87	0,29

A estatística de *Shapiro-Wilk* (*W*) indica que quanto mais próximos de 1 estiverem os valores mais próximos eles estarão de uma distribuição normal. Os valores encontrados foram elevados, sendo o menor 0,81, sugerindo, portanto, uma distribuição normal para todas as análises. O p-valor, superior a 0,05, significa que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de que os dados seguem uma distribuição normal. Portanto, os dados são considerados consistentes com uma distribuição normal.

Na Tabela 3.15 são apresentadas as análises de variância através do teste F.

Tabela 3.15: Análises de variância pelo teste F para os resultados das propriedades mecânicas RCS e mini-CBR dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada e úmida.

Propriedade Mecânica	Cura	F	p-valor
RCS	Carbonatada	3,43	0,23
	Úmida		
Mini-CBR	Carbonatada	7,63	0,07
	Úmida		

O p-valor, superior a 0,05, significa que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de que as variâncias sejam iguais. Portanto, para ambas propriedades analisadas, as variâncias dos dados para ambos os tipos de cura são consideradas iguais pelo teste F. Assim sendo, o teste t foi aplicado em sua forma original.

Na Tabela 3.16, são apresentadas as análises do teste t de *Student* para as propriedades mecânicas analisadas para cada tipo de cura.

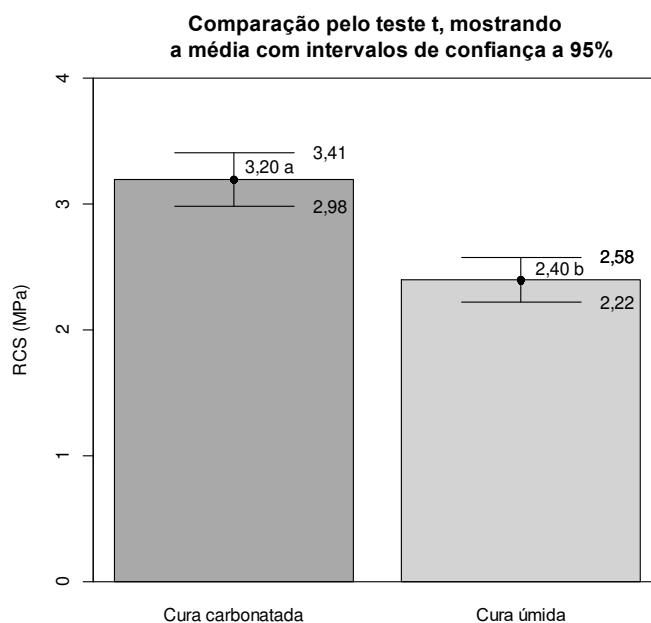
Tabela 3.16: Análises do teste t de *Student* para os resultados das propriedades mecânicas RCS e mini-CBR dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada e úmida.

Propriedade Mecânica	Cura	t	p-valor
RCS	Carbonatada	9,21	0,0003
	Úmida		
Mini-CBR	Carbonatada	-4,29	0,0078
	Úmida		

O p-valor, inferior a 0,05, significa que há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de que as médias sejam iguais. Portanto, para ambas propriedades analisadas, os valores médios dos dados para ambos os tipos de cura são considerados diferentes pelo teste t. Ou seja, há diferença significativa entre os valores médios dos resultados de ambas propriedades mecânicas em ambos processos de cura.

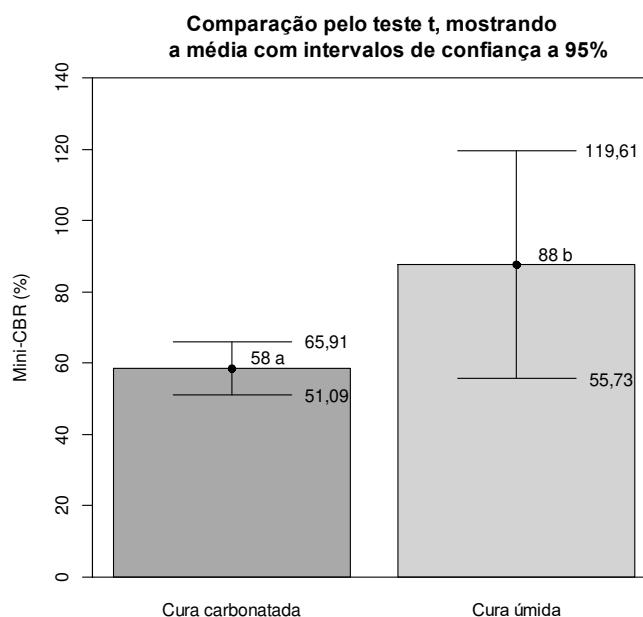
As Figuras 3.18 e 3.19 apresentam os valores médios com os intervalos de confiança a 95% pelo teste t de *Student*, para ambas propriedades e tipos de cura.

Figura 3.18: Valores médios com intervalo de confiança a 95% pelo teste t de *Student* para os resultados de RCS dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada e úmida.



\*As letras a e b à frente dos valores médios indicam que há diferença significativa entre eles.

Figura 3.19: Valores médios com intervalo de confiança a 95% pelo teste t de *Student* para os resultados de mini-CBR dos corpos de prova submetidos às curas carbonatada e úmida.



\*As letras a e b à frente dos valores médios indicam que há diferença significativa entre eles.

A Figura 3.18 mostra, para a análise de RCS, que os intervalos de confiança (2,98 e 3,41 MPa) da média (3,20 MPa) dos resultados para a cura carbonatada não se sobrepõem aos intervalos de confiança (2,22 a 2,58 MPa) relativos à média (2,40 MPa) dos resultados para a cura úmida, o que corrobora com a conclusão do teste t, indicando que há diferença significativa entre as médias para os resultados de RCS.

Já na Figura 3.19, é evidenciado o contrário, ou seja, há sobreposição entre os intervalos de confiança. No entanto, a sobreposição não garante que as médias sejam iguais, apenas mostra que há grande variabilidade dentro da amostra, principalmente em relação à média (88%) da cura úmida, que possui intervalo de confiança (55,73 a 119,61%) bem mais amplo quando comparado ao intervalo de confiança (51,09 a 65,91%) da média (58%) da cura carbonatada. Mesmo com intervalos de confiança sobrepostos, se a diferença nas médias das amostras (cura carbonatada e cura úmida) é grande em relação à variabilidade dentro das amostras, o teste t pode detectar uma diferença significativa, fato que ocorreu através do teste t, confirmando a diferença significativa entre as médias para os resultados de mini-CBR.

### 3.4 Conclusões

Através dos resultados desta pesquisa, foi possível concluir que:

- O processo de carbonatação mostrou que a formação da calcita (carbonato de cálcio) aumentou os valores de RCS, sendo a calcita responsável pelo preenchimento dos poros e, conseqüentemente, pelo incremento de resistência;
- A imersão dos corpos de prova durante 20 horas, procedimento para a realização dos ensaios de mini-CBR, influenciou os resultados de capacidade de suporte para os corpos de prova submetidos à cura carbonatada. Nesse caso, o efeito de melhoria da resistência gerada pela formação da calcita durante a carbonatação provavelmente foi prejudicada pela imersão em água, o que fez com que a calcita fosse dissolvida na presença de H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> presentes nos poros, gerando então o bicarbonato de cálcio, diminuindo assim a resistência à penetração e gerando um aumento da expansão;
- Confirmando os resultados do ensaio de mini-CBR, o ensaio de DMS mostrou que o processo de carbonatação tornou os corpos de prova vulneráveis à umidade, ou seja, ocorreu a dissolução da calcita na presença de água e gás carbônico presentes nos poros. Em situação de campo, onde a estrutura de um pavimento está sujeita às intempéries, como variação de temperatura e umidade, o material que for submetido à carbonatação terá durabilidade comprometida;
- As análises de DRX mostraram picos de portlandita, que é um composto proveniente da hidratação do cimento, para todas amostras analisadas, e picos de calcita nas amostras expostas ao processo de carbonatação;
- Através do MEV, observou-se o desenvolvimento de cristais de carbonato de cálcio, provenientes do processo de carbonatação, além da presença dos compostos portlandita e C-S-H, identificados em todas as imagens. As amostras carbonatadas exibiram estrutura com um aspecto visual mais agulhado, enquanto as amostras submetidas à cura úmida, bordas mais

arredondadas. O aspecto mais agulhado pode estar relacionado à formação dos carbonatos;

- Os resultados de EDS das amostras dos corpos de prova submetidos à ambos procedimentos de moldagem e cura apresentaram percentuais de elementos similares, com destaque à detecção do elemento Ca, proveniente do cimento, sendo que os resultados de EDS dos solos S1 e S2 puros não mostraram a presença do elemento Ca;
- As medições de pH confirmaram que o processo de carbonatação reduz os valores de pH, sendo que a formação da calcita consome íons hidroxila (OH<sup>-</sup>), reduzindo então a alcalinidade do solo;
- O procedimento de aspersão de fenolftaleína mostrou que os corpos de prova submetidos ao processo de carbonatação foram totalmente carbonatados, pois mantiveram-se incolores. Os corpos de prova submetidos à cura úmida apresentaram coloração roxa, indicativo de ausência de carbonatação;
- As análises estatísticas, utilizando o teste t de *Student*, mostraram que as médias dos resultados obtidos através dos ensaios de RCS e mini-CBR têm diferenças significativas entre os processos de cura carbonatada e úmida.

## Referências

- AKINWUMI, I. I.; GBADAMOSI, Z. O. Effects of curing condition and curing period on the compressive strength development of plain concrete. **International Journal of Civil and Environmental Research**, v. 1, n. 2, p. 83-99, 2014.
- ALSHAEER, H. A. Y. *et al.* Review on Carbonation Study of Reinforcement Concrete Incorporating with Bacteria as Self-Healing Approach. **Materials**, 15, n. 16, p. 5543, 2022.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - **AASHTO** M 145-91: Standard specification for classification of soils and soil aggregate mixtures for highway construction purposes. Washington, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM**. D2487. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, PA, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM**. E1508-12a. Standard guide for quantitative analysis by energy-dispersive spectroscopy. West Conshohocken, PA, 2019.
- ARAÚJO, H. A. O. **Estudo sobre a validação de uma metodologia de classificação de solos lateríticos com vistas à execução de camadas de pavimentos rodoviários**. 2022. (Mestrado) -, Universidade Federal de Campina Grande.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. ISO/TR 18336: Diretrizes para boas práticas de laboratório de FRX para a indústria de minério de ferro. Rio de Janeiro: 2022. 29p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 16697. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: 2018a. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 11579. Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: 2013. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 12024. Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – procedimento. Rio de Janeiro: 2012a. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 12025. Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro: 2012b. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 12253. Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento. Rio de Janeiro: 2012c. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 13554: Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio. Rio de Janeiro: 2013. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 16372. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: 2015. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 16605. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: 2017a. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 6457. Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: 2024. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: 2017b. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: 2017c. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: 2016. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: 2018b. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT**. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: 2020. 9p.

AZEVEDO, C. A. *et al.* Melhoramento de Solos com Cimento Portland: uma revisão. **Simpósio de prática de engenharia geotécnica na região centro oeste**, 5, 2019.

BARMAN, D.; DASH, S. K. Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 14, n. 4, p. 1319-1342, 2022/08/01/ 2022.

BORBA, S. M. C. **Estudos das propriedades químicas e mineralógicas de solos vermelhos tropicais do norte e nordeste do Brasil**. 1984. (Mestrado) -, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CASTELLOTE, M. *et al.* Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement and Concrete Research**, 34, n. 9, p. 1633-1644, 2004/09/01/ 2004.

CHAIYAPUT, S. *et al.* Effect of curing conditions on the strength of soil cement. **Case Studies in Construction Materials**, 16, p. e01082, 2022/06/01/ 2022.

DENELEE, D. *et al.* The carbonation of a lime-treated soil: experimental approach. **Materials and Structures**, 54, n. 1, p. 21, 2021/01/12 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – PRO 003**: Coleta de amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro: DNER, 1994. 12p.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 142**: Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Brasília: DNIT, 2022b.

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

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

DWIVEDI, A.; GUPTA, S. Carbon dioxide sequestration in mortars with excavated soil: Engineering performances and environmental benefits. **Science of The Total Environment**, 917, p. 170285, 2024/03/20/ 2024.

ESTABRAGH, A. R. *et al.* Effect of forced carbonation on the behaviour of a magnesia-stabilised clay soil. **International Journal of Pavement Engineering**, 23, n. 5, p. 1691-1705, 2022/04/16 2020.

FRANCO, K. L. B. **Caracterização do comportamento geotécnico de mistura de resíduo de pneus e solo laterítico**. 2012. (Mestrado) -, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

HO, L. S. *et al.* Strength development of cement-treated soils: Effects of water content, carbonation, and pozzolanic reaction under drying curing condition. **Construction and Building Materials**, 134, p. 703-712, 2017/03/01/ 2017.

HOSSEN, S. B.; GALLANT, A. P.; ASHRAF, W. Elemental testing of carbonated silty sand treated with lime. In: **Geo-Congress 2020**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. p. 562-571.

KIRCHHEIM, A. P.; RHEINHEIMER, V.; DAL MOLIN, D. C. C. Comparative study of white and ordinary concretes with respect of carbonation and water absorption. **Construction and Building Materials**, 84, p. 320-330, 2015/06/01/ 2015.

LI, M. *et al.* The state of the art of carbonation technology in geotechnical engineering: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 171, p. 112986, 2023/01/01/ 2023.

LOPES, E. C. *et al.* Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. **International Journal of Pavement Engineering**, 23, n. 14, p. 5003-5014, 2022/12/06 2022.

MARTINEZ, G. S. **Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação barreiras**. 2003. (Doutorado) -, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MARTINS, R. O. G. **Desempenho estrutural e durabilidade à carbonatação de alvenarias de blocos de concreto**. 2017. (Mestrado) -, Universidade Federal de Viçosa.

MARTINS, R. O. G. *et al.* Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test. **Construction and Building Materials**, 159, p. 261-268, 2018/01/20/ 2018.

OLIVEIRA, J. d. A. **Análise experimental dos efeitos da carbonatação e migração de íons cloretos em concretos pós incêndio**. 2019. (Mestrado) -, Universidade Federal de Viçosa.

OLIVEIRA, J. d. A. *et al.* Durability of concrete after fire through accelerated carbonation tests. **Materials Research**, 22, p. e20190049, 2019.

PADMARAJ, D.; ARNEPALLI, D. N. Mechanism of Carbonation in Lime-Stabilized Silty Clay from Chemical and Microstructure Perspectives. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, 7, n. 4, p. 74, 2021/10/16 2021.

RODRIGUES, K. H. d. P. **Utilização de Resíduos Industriais na estabilização de solos tropicais para aplicação em pavimentação**. 2022. (Doutorado) -, Universidade Federal de Viçosa.

RODRIGUES, K. H. d. P. *et al.* Experimental study of mixtures soil-industrial waste using simplex design for application in paving. **Journal of Building Engineering**, 78, p. 107761, 2023/11/01/ 2023.

RODRIGUES, K. H. d. P. *et al.* Effect of carbonation of soil-slag mixtures on the resilient behaviour and structural response of an asphalt pavement. **Road Materials and Pavement Design**, p. 1-20, 2024.

RODRIGUES, M. H. R. **Otimização da dosagem e das propriedades mecânicas e de expansibilidade de misturas entre solos e coprodutos siderúrgicos**. 2022. (Mestrado) -, Universidade Federal de Viçosa.

RODRIGUES, M. H. R. *et al.* The Simplex-Lattice Method Application to Optimize the Design of Soil-Slag-Fly Ash Mixtures. **Springer International Publishing**. 595-607, 2021.

SELLA, D. C. N. **Capacidade de Captura de CO<sub>2</sub> em Matrizes à Base de Cimentos LC<sup>3</sup> por meio da Carbonatação Acelerada**. 2022. (Mestrado) -, Universidade Federal da Integração Latino-Americana.

VITALE, E.; DENELE, D.; RUSSO, G. Effects of carbonation on chemo-mechanical behaviour of lime-treated soils. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 80, n. 3, p. 2687-2700, 2021/03/01 2021.

WANG, Q. *et al.* Experimental Study on Carbonation Durability of Kaolin Strengthened with Slag Portland Cement. 15, n. 3, p. 1240, 2022.

XU, L. *et al.* Experimental Investigation on Carbonation Behavior in Lime-Stabilized Expansive Soil. **Advances in Civil Engineering**, 2020, n. 1, p. 7865469, 2020.

ZHENG, J. *et al.* Experimental Study on Carbonation of Cement-Based Materials in Underground Engineering. 15, n. 15, p. 5238, 2022.

ZHOU, Y. *et al.* Evaluation of Carbonation Effects on Cement-Solidified Contaminated Soil Used in Road Subgrade. 2018, n. 1, p. 5271324, 2018.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O melhoramento de solos tropicais com cimento Portland para uso em camadas de pavimento, em especial na camada de base, ainda continua sendo uma excelente opção técnica, pois, conforme constatado nesta pesquisa, a adição de percentuais relativamente pequenos nas misturas melhora os solos locais de forma adequada para atender a critérios normativos importantes relativos às propriedades mecânicas. O cimento é um material de fácil transporte e uso, permitindo melhorar as características de materiais locais, tornando-os adequados para diversos usos na engenharia de pavimentos.

O planejamento experimental em vértices extremos proposto neste estudo mostrou-se extremamente útil na dosagem de solos para uso em camadas estruturais de pavimentos. Por ser versátil ao permitir o uso de vários materiais (solos, cimento) e a análise de diversas propriedades de engenharia (RCS, CBR), simultaneamente, torna-se uma excelente opção de substituição dos métodos empíricos de dosagem. Também proporciona uma dosagem mais racional, versátil e prática para uso nos diversos projetos, conforme a disponibilidade de materiais e métodos de dimensionamento que se queiram aplicar.

O estudo da carbonatação de solos melhorados com cimento Portland mostrou que, embora no curto prazo a formação da calcita tenda a melhorar as propriedades mecânicas dos materiais, o contato com a umidade, ao promover a dissolução da calcita em bicarbonato de cálcio, prejudica muito a durabilidade do material. Portanto, o processo de carbonatação de materiais à base de cálcio, que é um fenômeno que ocorre em longo prazo, é prejudicial, considerando os aspectos de durabilidade dos materiais aplicados nas estruturas de pavimentos. Em situações de campo, as intempéries, como as variações de umidade e temperatura, degradariam o material carbonatado, comprometendo toda a estrutura do pavimento.

Assim sendo, os estudos apresentados nesta pesquisa mostram-se úteis para a difusão e avanço do conhecimento na área de engenharia de pavimentos relacionada ao melhoramento de solos com cimento e aos efeitos da carbonatação sobre o comportamento geomecânico e a durabilidade destes materiais.