

**MATEUS HENRIQUE RIBEIRO RODRIGUES**

**OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE  
EXPANSIBILIDADE DE MISTURAS ENTRE SOLOS E COPRODUTOS  
SIDERÚRGICOS**

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

Coorientadores: Heraldo Nunes Pitanga  
Leonardo Gonçalves Pedroti

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2022**

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

T

R696o  
2022

Rodrigues, Mateus Henrique Ribeiro, 1994-

Otimização da dosagem e das propriedades mecânicas e de  
expansibilidade de misturas entre solos e coprodutos  
siderúrgicos / Mateus Henrique Ribeiro Rodrigues. – Viçosa,  
MG, 2022.

1 dissertação eletrônica (110 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Taciano Oliveira da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Civil, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.354>

1. Solos - Estabilidade. 2. Solos lateríticos. 3. Escórias.  
4. Cinzas volantes. 5. Concreto - Mistura - Métodos estatísticos.  
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. 624.151363

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto CRB6 2523

**MATEUS HENRIQUE RIBEIRO RODRIGUES**

**OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE  
EXPANSIBILIDADE DE MISTURAS ENTRE SOLOS E COPRODUTOS  
SIDERÚRGICOS**

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: 11 de fevereiro de 2022.

Assentimento:



---

Mateus Henrique Ribeiro Rodrigues  
Autor



---

Taciano Oliveira da Silva  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Izabel e Divino, exemplos de força, bravura, perseverança e por todo esforço realizado por eles durante anos para que eu pudesse estudar e seguir meus sonhos.

À minha irmã, Caroline, por estar sempre ao meu lado me apoiando, incentivando e aconselhando.

Aos demais familiares que contribuíram para minha formação como pessoa e profissional, me apoiaram e torceram por mim ao longo dessa jornada.

Aos professores Taciano Oliveira da Silva e Heraldo Nunes Pitanga, pela orientação, inúmeras contribuições e apoio dado para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como pelos ensinamentos, incentivo, paciência e compreensão.

Ao professor e amigo Klaus Henrique de Paula Rodrigues, pela orientação, torcida, conselhos, incentivos e amizade forjada desde o meu ingresso no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFV.

Aos professores Eduardo Marques, Paulo Sérgio, Roberto Ferraz, Leonardo Pedroti, por todo o conhecimento transmitido e disposição em ensinar durante a graduação e a Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC).

A todos os técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da UFV, em especial, ao Dr. Giovani, Marcelo, Dedé, Zé Carlos, pelo apoio, conversas, cafezinhos, risadas, amizade e solicitude.

Aos amigos de vida que levo deste período do curso de graduação na UFV, e em Viçosa, em especial ao Elisson Bilheiro, Douglas Coêlho, Amadeu Venturin, Henrique Rios, Nakata, Beatryz Mendes, Kamila Bazoni, Déborah Castro, Juliana Rezende, Sara Rodrigues, Mateus Sabadini, por todo o apoio, incentivo, e por sempre estarem torcendo por mim.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil, pela possibilidade de alcançar mais um grau acadêmico e pelo ensino de excelência desde a graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma maneira, puderam contribuir para que este trabalho fosse finalizado.

## RESUMO

RODRIGUES, Mateus Henrique Ribeiro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2022. **Otimização da dosagem e das propriedades mecânicas e de expansibilidade de misturas entre solos e coprodutos siderúrgicos.** Orientador: Taciano Oliveira da Silva. Coorientadores: Heraldo Nunes Pitanga e Leonardo Gonçalves Pedroti.

O primeiro estudo deste trabalho de pesquisa teve como objetivo avaliar a eficiência do método Simplex-Centroide na predição do comportamento mecânico, e na otimização da dosagem de misturas entre solos lateríticos-escória de aciaria elétrica redutora-cinza volante (SEC). O programa experimental contemplou a caracterização das seguintes propriedades mecânicas e de expansibilidade: Resistência à Compressão Simples (RCS); Índice de Suporte Califórnia (ISC); Módulo de Resiliência (MR); e Expansão ISC (E-ISC) das misturas experimentais. Nesse estudo obteve-se modelos matemáticos estatisticamente relevantes e descritivos dos comportamentos mecânicos e de expansibilidade das misturas. A utilização do método Simplex-Centroide também permitiu estabelecer a dosagem otimizada da mistura SEC com base em critérios normativos pré-definidos. No segundo estudo analisou-se os efeitos da carbonatação acelerada nas propriedades mecânicas e de expansibilidade da mistura entre solos e escória de aciaria elétrica redutora otimizada durante a realização do primeiro estudo deste trabalho de pesquisa. As propriedades avaliadas nesse estudo foram: (i) Resistência à Compressão Simples; (ii) índice Mini-CBR; (iii) Expansão Mini-CBR; e (iv) Módulo de Resiliência. Os corpos de prova foram submetidos aos três procedimentos de cura descritos a seguir antes da determinação de sua ruptura: (i) C1 – 28 dias em câmara úmida acrescido de 7, 14 e 28 dias em câmara de carbonatação; (ii) 28 dias na câmara de carbonatação acrescidos de 7, 14 e 28 dias também em câmara úmida; e (iii) carbonatação prévia da escória de aciaria elétrica redutora por 7, 14 e 28 dias antes da moldagem dos corpos de prova e posterior submissão dos corpos de prova a 28 dias em câmara úmida. Nesse estudo foi possível avaliar os efeitos que o tempo de submissão dos corpos de prova a cada tratamento exerce sobre as propriedades avaliadas e, através das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e de Difração de Raios-X (DRX), identificou-se a formação de compostos cimentados e carbonatados diretamente relacionados aos comportamentos observados experimentalmente.

Palavras-chave: Escória de aciaria elétrica. Simplex-Centroide. Carbonatação acelerada. Solos lateríticos. Estabilização de solos

## ABSTRACT

RODRIGUES, Mateus Henrique Ribeiro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2022. **Optimization the design, mechanical and expansibility properties of soil and steelmaking byproducts mixtures.** Advisor: Taciano Oliveira da Silva. Co-advisers: Heraldo Nunes Pitanga and Leonardo Gonçalves Pedroti.

The first study of this research work focused on evaluating the efficiency of the Simplex-Centroid method to perform the experimental design, to predict the mechanical behavior, and to optimize the design of lateritic soils-ladle furnace slags-fly ash (SEC) mixtures. The experimental program included the geotechnical characterization of the experimental mixtures including the following properties: (i) Unconfined Compressive Strength – UCS; (ii) California Bearing Ratio – CBR; (iii) CBR Expansion; and (iv) Resilient Modulus - MR. The results from the experimental program allowed the definition of statistically significant mathematical models capable to describe the experimental mixtures mechanical and expansion behavior as a function of its components content. Through, the Simplex-Centroid method applications, it was also possible to establish an optimized SEC mixture design based on pre-defined normative criteria. The second study aimed on evaluating the effects of accelerated carbonation on the mechanical and expansion behavior of the soil-ladle steel slags mixture optimized during the first study. The properties evaluated in this study were: (i) Unconfined Compressive Strength – UCS; (ii) Mini-California Bearing Ratio; (iii) Mini-CBR Expansion; and (iv) Resilient Modulus (MR). The specimens were submitted to the following three curing procedures for 35, 42 and 56 days before been tested: (i) C1 – 28 days in a humid chamber followed by 7, 14 and 28 additional days in carbonation chamber; (ii) 28 days in the carbonation chamber, and 7, 14 and 28 additional days also in the humid chamber; and (iii) previous carbonation of the ladle steel slag for 7, 14 and 28 days before specimens compaction and the subsequent specimens submission to 28 days in a wet chamber. Through laboratory tests it was possible to evaluate, for all the curing procedures considered, the effects that curing time exerts on the evaluated properties of soil-ladle furnace slags mixtures and, through the analysis of Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD), it was possible to identify the formation of cemented and carbonated compounds, which explains the experimental mixture behavior.

Keywords: Ladle furnace slags. Simplex-Centroid. Accelerated carbonation. Lateritic soils. Soil stabilization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama triangular padrão de um sistema ternário com componentes variando de 0 a 100%.....	26
Figura 2 - Distribuição granulométrica das amostras dos solos utilizados na pesquisa. ....	28
Figura 3 - Distribuição granulométrica da amostra de EAER moída utilizada na pesquisa ....	30
Figura 4 - Distribuição granulométrica da amostra de cinza volante utilizada na pesquisa. ...	31
Figura 5 - Resultados da análise de DRX das amostras de: (a) EAER; (b) CV.....	33
Figura 6 - Resultados da análise de DRX das amostras dos solos: Solo C (a); Solo V (b). ....	34
Figura 7 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): (a) EAER; (b) CV; (c) Solo C; (d) Solo V.....	35
Figura 8 - Identificação e composição das misturas experimentais no diagrama triangular obtido através do método Simplex-Centroides.....	37
Figura 9 - Superfícies de resposta para a RCS das misturas experimentais: solo C (a); solo V (b).....	43
Figura 10 – Superfícies de resposta para o ISC das misturas experimentais: solo C (a); solo V (b).....	45
Figura 11 – Superfícies de resposta para a Expansão ISC das misturas experimentais: solo C (a); solo V (b) .....	47
Figura 12 - Superfícies de resposta para o MR das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C (a) e solo V (b), considerando-se o estado de tensões atuante no centro da camada de base. ....	50
Figura 13 - Superfícies de resposta para o MR das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C (a) e solo V (b), considerando-se o estado de tensões atuante no centro da camada de sub-base.....	51
Figura 14 - Superfícies de resposta para o MR das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C (a) e solo V (b), considerando-se o estado de tensões atuante no centro da camada de reforço de subleito. ....	51
Figura 15 - Superfícies de resposta para a desejabilidade das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C (a) e V (b) para sua aplicação em camadas de base de pavimentos asfálticos.....	56
Figura 16 - Superfícies de resposta para a desejabilidade das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C (a) e V (b) para sua aplicação em camadas de sub-base de pavimentos asfálticos.....	57

Figura 17 - Superfícies de resposta para a desejabilidade das misturas experimentais dosadas com amostras de Solo C (a) e V (b) para sua aplicação em camadas de reforço de subleito de pavimentos asfálticos. ....	58
Figura 18 - Esquema ilustrativo dos procedimentos de cura adotados no estudo. ....	77
Figura 19 - Câmaras de carbonatação acelerada e esquema ilustrativo do seu funcionamento. ....	77
Figura 20 – RCS das misturas solo-EAER dosadas com amostras de solo C e submetidas aos três procedimentos de cura adotados. ....	79
Figura 21 – Resultados das determinações do (a) Índice Mini-CBR e (b) Expansão Mini-CBR dos corpos de prova dosadas com amostras do solo C e submetidos aos diferentes procedimentos de cura.....	80
Figura 22 – Módulo de Resiliência (MR) das misturas dosadas com amostras de solo C estimado a partir dos pares de tensões atuantes em camadas de base (a), sub-base (b) e reforço de subleito (c) .....	82
Figura 23 – Difractogramas das misturas com solo C submetidas aos diferentes procedimentos de cura 1 por (a) 35 e (b) 56 dias. ....	84
Figura 24 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das misturas dosadas com amostras de solo C e submetidas ao procedimento de cura: (a) C1 – 35 dias; (b) C1 – 56 dias. ....	84
Figura 25 – Difractogramas das misturas dosadas com solo C submetidas ao procedimento de cura 2: (a) C2 – 35 dias e (b) C2 - 56 dias. ....	85
Figura 26 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das misturas dosadas com amostras de solo C e submetidas ao procedimento de cura 2: (a) C2 – 35 dias; (b) C2 – 56 dias. ....	85
Figura 27 – Difractogramas das misturas dosadas com amostras de solo C e submetidas ao procedimento de cura 3: (a) C3 - 35 dias e (b) C3 - 56 dias. ....	87
Figura 28 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das misturas dosadas com amostras de solo V e submetidas aos procedimentos de cura: (a) C3 – 35 dias; (b) C3 – 56 dias. ....	88
Figura 29 – RCS das misturas solo-EAER dosadas com amostras de solo V e submetidas aos três procedimentos de cura adotados.....	88
Figura 30 - Resultados das determinações do (a) Índice Mini-CBR e (b) Expansão Mini-CBR dos corpos de prova dosadas com amostras do solo V e submetidos aos diferentes procedimentos de cura.....	90
Figura 31 – Módulo de Resiliência (MR) das misturas dosadas com amostras de solo V estimado a partir dos pares de tensões atuantes em camadas de base (a), sub-base (b) e reforço de subleito (c). ....	92

Figura 32 - Difractogramas das misturas dosadas com amostras de solo V e submetidas ao procedimento de cura 1: (a) C1 - 35 dias e (b) C1 - 56 dias. ....	94
Figura 33 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das misturas dosadas com amostras de solo V e submetidas ao procedimento de cura 1: (a) C1 – 35 dias; (b) C1 – 56 dias. ....	94
Figura 34 – Difractogramas das misturas dosadas com amostras de solo V e submetidas ao procedimento de cura 2: (a) C2 - 35 dias e (b) C2 - 56 dias. ....	95
Figura 35 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das misturas dosadas com amostras de solo V e submetida ao procedimento de cura 2: (a) C2 – 35 dias; (b) C2 – 56 dias. ....	95
Figura 36 - Difractogramas das misturas dosadas com amostras de solo V e submetidas ao procedimento de cura 3: (a) C3 - 35 dias e (b) C3 - 56 dias. ....	97
Figura 37 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das misturas dosadas com amostras de solo V e submetidas ao procedimento de cura 3: (a) C3 – 35 dias e (b) C3 – 56 dias. ....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de caracterização e classificações geotécnicas das amostras dos solos utilizados na pesquisa. ....	29
Tabela 2 - Principais óxidos presentes nos materiais empregados na pesquisa. ....	32
Tabela 3 - Composição das misturas para o planejamento experimental realizado na pesquisa. ....	37
Tabela 4 - Pares de tensões representativos do estado de tensões atuantes nas camadas estruturais do pavimento considerado nas análises.....	39
Tabela 5 - Propriedades dos materiais e demais características do pavimento tipo utilizado na análise estrutural. ....	39
Tabela 6 - Parâmetros de ótimo dos solos e das misturas compactados na energia Proctor Normal.....	41
Tabela 7 - RCS (em kPa) dos solos e das misturas experimentais. ....	42
Tabela 8 - Coeficientes dos modelos matemáticos que melhor se ajustaram aos resultados de RCS. ....	44
Tabela 9 - Índice de Suporte Califórnia (ISC, em %) das amostras de solos e das misturas experimentais.....	44
Tabela 10 - Coeficientes dos modelos matemáticos que melhor se ajustaram aos resultados do ISC. ....	45
Tabela 11 - Expansão ISC (em %) dos solos e das misturas experimentais. ....	47
Tabela 12 - Coeficientes dos modelos matemáticos que melhor se ajustaram aos resultados da Expansão ISC. ....	47
Tabela 13 - MR das amostras de solo e das misturas experimentais. ....	49
Tabela 14 - Coeficientes do modelo de regressão polinomial ajustados aos resultados de MR estimados para as camadas estruturais de pavimentos.....	50
Tabela 15 – Avaliação da eficácia do método Simplex-Centroide na estimativa da RCS das misturas experimentais. ....	53
Tabela 16 – Avaliação da eficácia do método Simplex-Centroide na estimativa do Índice de Suporte Califórnia (ISC) das misturas experimentais.....	54
Tabela 17 – Avaliação da eficácia do método Simplex-Centroide na estimativa da Expansão ISC das misturas experimentais.....	55
Tabela 18 – Resultados do Módulo de Resiliência (MR) das misturas experimentais.....	55

Tabela 19 – Ralação dos ensaios de laboratório realizados e suas respectivas normas técnicas de referência. ....	75
Tabela 20 – Resultado da análise estatística realizada sobre os valores médios de RCS dos corpos de prova dosados com amostras de solo C.....	80
Tabela 21 – Resultado da análise estatística realizada sobre os valores médios de M-CBR dos corpos de prova dosados com amostras de solo C.....	81
Tabela 22 – Resultado da análise estatística realizada sobre os valores médios de EM-CBR dos corpos de prova dosados com amostras de solo C.....	81
Tabela 23 – Coeficientes dos modelos de regressão descritivos dos valores de MR. ....	82
Tabela 24 – Resultado da análise estatística realizada sobre os valores médios de RCS dos corpos de prova dosados com amostras de solo V.....	89
Tabela 25 – Resultado da análise estatística realizada sobre os valores médios de M-CBR dos corpos de prova dosados com amostras de solo V.....	91
Tabela 26 – Resultado da análise estatística realizada sobre os valores médios de EM-CBR dos corpos de prova dosados com amostras de solo V.....	91
Tabela 27 – Coeficientes dos modelos de regressão descritivos dos valores de MR. ....	92

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1: Introdução.....</b>	<b>13</b>
1.1. Considerações gerais.....	13
1.2. Justificativa.....	15
1.3. Objetivos da pesquisa .....	17
1.3.1. Objetivo geral .....	17
1.3.2. Objetivos específicos.....	17
1.4. Organização da Dissertação .....	18
Referências Bibliográficas .....	19
<b>CAPÍTULO 2: Eficácia do método simplex-centroide na dosagem e otimização de misturas entre solos-escória de aciaria-cinza volante destinadas à construção de pavimentos.....</b>	<b>21</b>
2.1. Introdução .....	23
2.2. Materiais.....	28
2.2.1. Solos .....	28
2.2.2. Escória de aciaria elétrica redutora .....	29
2.2.3. Cinza volante .....	30
2.2.4. Caracterização química dos materiais .....	31
2.2.5. Caracterização mineralógica dos materiais .....	33
2.2.6. Caracterização microestrutural dos materiais.....	35
2.3. Métodos.....	36
2.3.1. Planejamento Experimental das misturas.....	36
2.3.2. Caracterização geomecânica dos solos e das misturas experimentais	37
2.3.3. Modelos descritivos e superfícies de resposta .....	39
2.3.4. Otimização da dosagem através da função desejabilidade.....	39
2.4. Resultados e discussão .....	41
2.4.1. Caracterização geomecânica das misturas experimentais dosadas pelo método Simplex-Centroide .....	41
2.4.2. Resposta experimental, superfícies de resposta e modelos matemáticos para RCS .....	42
2.4.3. Resposta experimental, superfícies de resposta e modelos matemáticos para o ISC das misturas experimentais .....	44

2.4.4. Resposta experimental, superfícies de resposta e modelos matemáticos da Expansão ISC das misturas experimentais .....	46
2.4.5. Resposta experimental, superfícies de resposta e modelos matemáticos do Módulo de Resiliência das misturas experimentais .....	49
2.4.6. Avaliação da eficácia do método Simplex-Centroide .....	53
2.4.7. Otimização da dosagem das misturas.....	56
2.5. Conclusões .....	59
Referências Bibliográficas .....	61
<b>CAPÍTULO 3: Efeito da carbonatação acelerada nas propriedades mecânicas de misturas de solo-escória de aciaria elétrica redutora .....</b>	<b>70</b>
3.1. Introdução .....	72
3.2. Materiais.....	74
3.3. Métodos.....	75
3.3.1. Definição da mistura de referência .....	75
3.3.2. Caracterizações mecânica e de expansibilidade das misturas .....	75
3.3.3. Procedimentos de cura.....	76
3.3.4. Análises mineralógicas e microestruturais dos produtos .....	78
3.4. Resultados e Discussão .....	78
3.4.1. Misturas dosadas com amostras de solo C .....	78
3.4.2. Misturas dosadas com amostras de solo V .....	88
3.5. Conclusões .....	98
Referências Bibliográficas .....	101
<b>CAPÍTULO 4: Conclusões e recomendações .....</b>	<b>108</b>
4.1. Conclusões gerais .....	108
4.2. Recomendações de estudos futuros .....	109

## **CAPÍTULO 1: Introdução**

### **1.1. Considerações gerais**

Solos de baixa qualidade usualmente apresentam propriedades de engenharia indesejáveis para a construção de pavimentos, como baixa capacidade de suporte, alta compressibilidade, e alta expansibilidade. A utilização desses tipos de solos em obras de pavimentação pode comprometer o desempenho do pavimento ao longo do tempo e levar à ruptura precoce do pavimento (SHARMA; SWAIN; SAHOO, 2012). Entretanto, a substituição de solos com essas características por outro de melhor qualidade nem sempre é uma alternativa viável técnica e economicamente, o que resulta na necessidade de utilizar técnicas de engenharia para promover a melhoria das propriedades mecânicas do material disponível para a construção de pavimentos (GHADIR e RANJBAR, 2018).

Uma das técnicas convencionalmente utilizadas para promover a melhoria de propriedades de solos como capacidade de suporte, resistência ao cisalhamento do solo e compressibilidade é a estabilização química. Essa técnica pode ser realizada através da adição de diversos estabilizantes ao solo, sendo o cimento Portland e a cal, os materiais convencionalmente utilizados para esse propósito (HOSSAIN e MOL, 2011). Entretanto, a utilização de cal e cimento Portland como agentes estabilizantes de solos vem sendo questionada devido a questões ambientais e econômicas relacionadas à extração de matéria prima para sua produção e ao alto gasto energético relacionado aos seus respectivos processos produtivos (GHADIR e RANJBAR, 2018). Diante disso, há estudos que buscam estudar o emprego de materiais alternativos em substituição aos materiais convencionais, que sejam menos agressivos ao meio ambiente e que apresentem boa relação custo-benefício (JAFER et al., 2018).

Atualmente, diversos tipos de resíduos vêm sendo objetos de estudos visando sua utilização em obras de pavimentação, tais como resíduos provenientes da construção civil (YU et al. 2017; ZHANG et al., 2021), de pedreiras (ONYELOWE et al., 2019), de incineradores (RANDHAWA e CHAUHAN, 2022), da indústria siderúrgica e da mineração (APAZA; GUIMARÃES; VIVONI; SCHRODER, 2021). Dentro da vasta gama de subprodutos com potencial para serem utilizados como agentes estabilizantes químicos de solos, destacam-se as escórias de aciaria elétrica e as cinzas volantes.

As escórias de aciaria elétrica correspondem ao subproduto do processo produtivo do aço. Particularmente, as escórias de aciaria elétrica são geradas em fornos elétricos (FAE), que têm o formato de uma caldeira, no qual são inseridos eletrodos responsáveis por gerar correntes elétricas que aquecem e derretem o material no interior do forno. Durante o processo de derretimento, outros metais são adicionados para conferir ao aço a composição química e propriedades desejadas. Com o objetivo de retirar impurezas da liga metálica fundida, é injetado oxigênio em alta pressão dentro da caldeira, e as reações do oxigênio com tais impurezas dão origem às escórias de aciaria elétrica. Depois de retirada as impurezas e verificado se a composição química do aço atende às especificações, a caldeira é girada para que a escória, então em suspensão, seja removida, permitindo consequentes processos de refino do aço (SHI, 2004).

As cinzas volantes, por sua vez, correspondem ao material fino extraído dos gases produzidos a partir da queima de diversos tipos de carvão. O material consiste normalmente em esferas ocas de silício, alumínio, óxidos ferrosos e carbono não oxidado, com características similares a um silte fino de comportamento não plástico (ÇOKÇA, 2001). Dependendo do tipo de carvão utilizado na queima, as cinzas volantes podem ser classificadas, segundo a ASTM C618-19 (ASTM, 2019), como de Classe C ou Classe F. As cinzas da classe C normalmente são geradas a partir da queima de carvões sub betuminosos ou de linhito, apresentando maiores teores de CaO (maiores de 20%), enquanto as cinzas da Classe F são geradas a partir da queima de carvões betuminosos ou de antracito e apresentam menores teores de CaO (menor que 10%) (KIM e PREZZI, 2008).

O potencial das escórias de aciaria elétrica e das cinzas volantes como agentes estabilizantes químicos de solos está diretamente relacionado às características destes materiais. Tais materiais podem apresentar propriedades pozolânicas e cimentícias, de forma que, quando em contato com os argilominerais do solo e com a água disponível no meio, dão início a reações cimentícias de curto e longo prazo (GHADIR e RANJBAR, 2018; JAFER et al., 2018).

As reações de curto prazo promovem a redução das forças eletroquímicas de repulsão entre as partículas, promovendo a rápida hidratação e troca catiônica, o que permite a floculação dos argilominerais em dispersão. Essa nova configuração dos argilominerais, mais densa, confere melhorias em diversas propriedades do solo como na plasticidade, expansibilidade, compressibilidade e contração (OUHADI et al., 2014).

As reações pozolânicas a longo prazo promovem a dissolução da sílica e da alumina dos argilominerais que reagem com os íons de cálcio do estabilizador, criando compostos de

propriedades cimentícias, responsáveis pelo aumento da resistência do solo ao longo do tempo e promovem a sua estabilização para a utilização em obras geotécnicas (OUHADI et al., 2014).

Estudos como os desenvolvidos por Manso et al. (2013), Montenegro et al. (2013), Ortega-López et al. (2014), Shalabi, Asi e Qasrawi (2017), Santamaria et al. (2018) e Santos et al. (2018), evidenciaram o potencial de estabilização de solos argilosos através da adição de escória de aciaria elétrica. Os referidos estudos constataram, dentre outros pontos, que a aplicação de escória de aciaria elétrica em misturas com solos, seja individualmente ou combinada com cinzas volantes, melhora diversas propriedades geotécnicas dos solos relacionadas à construção de pavimentos, tais como: índices físicos, expansividade, resistência mecânica e durabilidade.

Entretanto, a viabilidade técnica e econômica das escórias de aciaria em obras rodoviárias, seja em camadas de base e sub-base, como agregado de concreto asfáltico, ou como agentes estabilizantes de solos, devem ser estudadas minuciosamente uma vez que o comportamento e o desempenho do material para uma dada finalidade estão condicionados a fatores, como sua composição química, propriedades mecânicas, e às propriedades físicas e químicas de outros materiais em contato com a escória de aciaria, a exemplo dos solos e das cinzas volantes (YILDIRIM e PREZZI, 2017).

Mesmo sendo objeto de inúmeros estudos, ainda há a subutilização das escórias de aciaria em obras de engenharia, principalmente no que se refere à utilização da escória de aciaria elétrica (YILDIRIM e PREZZI, 2017). Parte dessa subutilização está relacionada à ausência de uma metodologia consolidada, fundamentada em critérios técnicos e estatísticos, para a dosagem desses materiais em misturas com solo, tal como existe para o concreto convencional onde a relação água-cimento influencia diretamente as propriedades finais do concreto.

Diante do exposto, esse estudo propôs uma metodologia para dosagens otimizadas de misturas de escória de aciaria elétrica e cinza volante, visando a estabilização química de solos tropicais, assim como a aplicação da técnica de carbonatação acelerada, que propiciou melhorias nas propriedades mecânicas das misturas entre solo, escória de aciaria elétrica e cinza volante.

## **1.2. Justificativa**

As seguintes questões motivaram o desenvolvimento dessa pesquisa:

- Os materiais convencionais utilizados como agentes estabilizantes químicos de solos, como o cimento Portland e a cal, são materiais de custo relativamente elevado

em comparação aos custos relacionados aos demais materiais de construção de camadas estruturais de pavimentos. Adicionalmente, os processos inerentes à extração de matéria prima e à produção de cimento Portland e cal provocam uma série de significativos impactos ambientais, dentre os quais pode-se citar a degradação de grandes áreas em jazidas, além do elevado consumo energético requerido no processo produtivo desses materiais. Assim, viabilizar a utilização de materiais alternativos em substituição aos materiais convencionais empregados na estabilização química de solos torna-se não apenas uma abordagem empenhada em reduzir os impactos ambientais relacionados à produção de cimento e cal, mas também uma abordagem voltada para a redução de custos em obras de pavimentação, visto que materiais alternativos normalmente têm pouco ou nenhum valor agregado no mercado quando comparados aos materiais convencionais;

- No contexto de aproveitamento de materiais alternativos com potencial para utilização como agente estabilizante químico de solos encontrou-se possível potencial nas escórias de aciaria elétrica redutoras. Esse material corresponde a um subproduto do refino secundário de ligas metálicas em aciarias, e muitas vezes é disposto no meio físico, na forma de aterros, degradando grandes áreas, além de gerar o risco de contaminação do meio físico em decorrência do processo de lixiviação desse material. Embora esse material apresente certas propriedades cimentícias que o podem tornar viável tecnicamente para ser utilizado como agente estabilizante de solos em obras de pavimentação, as escórias de aciaria elétrica ainda são vistas como um passivo pelas empresas do ramo siderúrgico e como um material sem muito valor agregado de mercado. Diante do exposto, viabilizar tecnicamente a utilização desse tipo de material alternativo representa agregar valor de mercado a um coproduto, propondo reduzir custos relacionados a obras de pavimentação, bem como reduzir impactos ambientais relacionados à disposição no meio físico desses coprodutos;
- Outro ponto que justifica a realização dessa pesquisa é a ausência de um método consagrado para promover a dosagem otimizada de misturas entre estabilizantes químicos e solos. Corriqueiramente, a dosagem dos componentes de misturas entre solo-estabilizante químico é feita de forma empírica, em que se estabelece e afere diferentes teores de estabilizantes na mistura a fim de determinar uma dosagem cujo produto atenda aos requisitos mínimos de projeto definido para uma determinada aplicação. Como consequência desse processo empírico de dosagem, é gerado um

volume elevado de ensaios de laboratório para a determinação de uma dosagem que nem sempre será otimizada, acarretando custos adicionais de aquisição e aplicação de estabilizante químico em campo. Diante do exposto, a consolidação de um método consistente para a dosagem de tais misturas, que envolva um número reduzido de ensaios de laboratório, promoverá, não somente a economia de tempo relacionada aos procedimentos de dosagem e testagem em laboratório, mas também economias de projeto visto que a dosagem de estabilizante químico será otimizada.

### **1.3. Objetivos da pesquisa**

#### **1.3.1. Objetivo geral**

O objetivo geral da pesquisa consiste na avaliação da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica redutora moída (EAER) e de cinza volante (CV) como agentes estabilizantes químicos de solos tropicais, visando melhorar as propriedades mecânicas e de expansibilidade dos produtos da mistura entre solo-EAER-CV, a ponto de viabilizar tecnicamente a utilização destes como material de construção de camadas estruturais de pavimentos.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

São objetivos específicos deste trabalho de pesquisa:

- Avaliar a eficiência do método Simplex-Centroide na predição e descrição do comportamento mecânico de misturas entre solos-escória de aciaria elétrica redutora-cinza volante;
- Avaliar a influência dos teores de escória de aciaria elétrica redutora e cinza volante nas propriedades mecânicas dos produtos gerados das misturas entre estes materiais e amostras de solos lateríticos;
- Avaliar a eficácia do método Simplex-Centroide na otimização da dosagem dos componentes das misturas solo-escória de aciaria elétrica redutora-cinza volante com base nas propriedades mecânicas avaliadas: (i) Resistência à Compressão Simples; (ii) Índice de Suporte Califórnia (ISC); (iii) Expansão ISC; e (iv) Módulo de Resiliência;
- Obter, através dos dados experimentais e da aplicação do método Simplex-Centroide, a proporção de cada componente das misturas (solo, escória de aciaria

elétrica redutora, cinza volante) que resulte nos maiores valores das propriedades avaliadas;

- Utilizar as misturas cujas dosagens serão otimizadas para a avaliação do efeito da carbonatação acelerada sobre suas propriedades mecânicas;
- Promover as caracterizações mineralógica e morfológica de amostras submetidas a diferentes procedimentos de cura envolvendo a carbonatação acelerada dos corpos de prova e dos materiais para identificar a formação de compostos cimentícios e carbonatados que permitam compreender os mecanismos relacionados à carbonatação acelerada e seus efeitos nas propriedades mecânicas das misturas em longo prazo.

#### **1.4. Organização da Dissertação**

Neste item apresenta-se a estrutura geral da presente dissertação com um breve resumo dos assuntos abordados em cada capítulo. O trabalho foi estruturado em 4 capítulos, incluindo o Capítulo 1 – Introdução, já apresentado.

O Capítulo 2 da presente dissertação aborda um estudo sobre a eficiência do método Simplex-Centroide na predição do comportamento mecânico de misturas entre solo-escória de aciaria elétrica redutora-cinza volante. Esse estudo também avaliou a eficácia do método Simplex-Centroide na otimização da dosagem desse mesmo tipo de mistura visando sua aplicação como material de construção de camadas estruturais de pavimentos.

No Capítulo 3, é apresentado um estudo no qual são avaliados os efeitos da carbonatação acelerada nas propriedades mecânicas de misturas de solo-escória de aciaria elétrica redutora. Nesse estudo foram considerados dois procedimentos de cura distintos envolvendo a carbonatação de corpos de prova e da escória de aciaria elétrica redutora. Adicionalmente, o referido estudo abrangeu a análise microestrutural e morfológica dos corpos de prova submetidos aos diferentes procedimentos de cura, como forma de identificar a formação de compostos carbonatados e produtos cimentícios que permitam a compreensão dos mecanismos por trás da carbonatação acelerada dos materiais e das respostas mecânicas verificadas.

Por fim, no Capítulo 4, são apresentadas as conclusões acerca dos estudos realizados, as contribuições do estudo para o estado da arte, além de algumas sugestões para trabalhos futuros.

## Referências Bibliográficas

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C618-19. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2019.
- APAZA, F. R. A.; GUIMARÃES, A. C. R.; VIVONI, A. M.; SCHRODER, R. Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 226, 121020, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121020>
- ÇOKÇA, E. Use of Class C Fly Ashes for the Stabilization of an Expansive Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, V. 127 (7), July 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:7\(568\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(568))
- GHADIR, P.; RANJBAR, N. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 188, 361-371, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.207>
- HOSSAIN, K.M.A.; MOL, L. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. **Construction and Building Materials**, v. 25, 3495-3501, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042>
- JAFER, H.; ATHERTON, W.; SADIQUE, M.; RUDDOCK, F.; LOFFILL, E. Stabilisation of soft soil using binary blending of high calcium fly ash and palm oil fuel ash. **Applied Clay Science**, v. 152, 323-332, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.030>
- KIM, B.; PREZZI, M. Evaluation of the mechanical properties of class-F fly ash. **Waste Management**, v. 28 (3), 649-659, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.04.006>
- MANSO, J. M.; ORTEGA-LOPEZ, V.; POLANCO, J. A.; SETIÉN, J. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 126–134, 2013.
- MONTENEGRO, J. M.; CELEMÍN-MATACHANA, M.; CAÑIZAL, J.; SETIÉN, J. Ladle furnace slag in the construction of embankments: Expansive behavior. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 8, p. 972–979, 2013.
- ONYELOWE, K; VAN, D.B.; EBEREMU, A.; XUAN, M. N.; SALAHUDEEN, A. B.; EZUGWU, C.; VAN, M. N.; ORJI, F.; SOSA, F.; DUC, T. T.; AMHADI, T.; IKPA, C.; UGORJI, B. Sorptivity, swelling, shrinkage, compression and durability of quarry dust treated soft soils for moisture bound pavement geotechnics. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8 (4), p. 3529-3538, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.029>
- ORTEGA-LÓPEZ, V.; MANSO, J. M.; CUESTA, I. I.; GONZÁLEZ, J. J. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 455–464, 2014.

OUHADI, V.R.; YONG, R.N.; AMIRI, M.; OUHADI, M.H. Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. **Applied Clay Science**, v. 95, 111-118, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.020>

RANDHAWA, K. S.; CHAUHAN, R. Stabilizing black cotton soil in subgrade with municipal solid waste incineration ash for lowering greenhouse gas emission: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 50, 1145-1151, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.037>

SANTAMARÍA, A.; GONZÁLEZ, J. J.; LOSÁÑEZ, M. M.; SKAF, M.; ORTEGA-LOPEZ, V. The design of self-compacting structural mortar containing steelmaking slags as aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 111, 103627, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103627>

SANTOS, A. L.; PITANGA, H. N.; SILVA, A. C. B.; SILVA, T. O. Caracterização do comportamento mecânico de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante visando a aplicação em obras de pavimentação. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, p. 16–29, 2018.

SHALABI, F. I.; ASI, I. M.; QASRAWI, H. Y. Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 29, n. 4, p. 394–399, 2017.

SHARMA, N. K.; SWAIN, S.K.; SAHOO, U. C. Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation. **Geotech Geol Eng.** v.30, 1197–1205, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9532-3>

SHI, C. Steel slag - Its production, processing, characteristics, and cementitious properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 230–236, 2004.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Experimental evaluation of EAF ladle steel slag as a geo-fill material: Mineralogical, physical & mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 23–33, 2017.

YU, H.; LENG, Z.; ZHOU, Z.; SHIH, K.; XIAO, F.; GAO, Z. Optimization of preparation procedure of liquid warm mix additive modified asphalt rubber. **J. Clean. Prod.**, v.141, 336 - 345, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.043>

ZHANG, J.; ZHANG, A.; HUANG, C.; YU, H.; ZHOU, C. Characterising the resilient behaviour of pavement subgrade with construction and demolition waste under FreezeThaw cycles. **Journal of Cleaner Production**, v.300, 126702, 2021.

## **CAPÍTULO 2: Eficácia do método simplex-centroide na dosagem e otimização de misturas entre solos-escória de aciaria-cinza volante destinadas à construção de pavimentos**

### **RESUMO**

A utilização de escória de aciaria elétrica redutora (EAER) e cinza volante (CV) como estabilizantes químicos de solos se mostra eficaz e surge como uma alternativa de reutilização desses coprodutos muitas vezes dispostos em aterros de contenção de resíduos sem o devido aproveitamento. Entretanto, não há um método consolidado para a dosagem otimizada desses materiais em misturas com solos. Este estudo, portanto, avaliou a eficiência do método Simplex-Centroide no planejamento experimental e na otimização da dosagem de misturas entre solo, escória de aciaria elétrica redutora e cinza volante (Solo-EAER-CV), visando a aplicação destas em camadas estruturais de pavimentos asfálticos. Os valores de Resistência à Compressão Simples (RCS), Índice de Suporte Califórnia (ISC), Expansão ISC e Módulo de Resiliência (MR) das misturas experimentais compactadas na energia Proctor Normal, cujas composições foram definidas pelo método Simplex-Centroide, fomentaram a elaboração de modelos matemáticos com relevância estatística que descreveram as magnitudes das referidas propriedades em função da sua composição percentual em massa, permitindo avaliar a influência exercida pelos componentes individuais da mistura e por suas interações. Verificou-se que o método Simplex-Centroide é eficiente tanto na otimização da dosagem de misturas Solo-EAER-CV quanto na predição de suas propriedades de engenharia. Quanto à aplicabilidade das misturas em camadas estruturais de pavimentos, verificou-se que o atendimento das misturas aos critérios não foi completo (foi parcial), e essa parcialidade impede a aplicabilidade das misturas em camadas estruturais de pavimentos. Acredita-se que o atendimento completo das misturas aos critérios definidos pode ser alcançado mediante o aumento da energia de compactação e do tempo de cura.

**Palavras-chave:** Solos lateríticos; Dosagem estatística de misturas; Escória de aciaria elétrica redutora; Cinza volante; Estabilização de solos.

## **Simplex-Centroid method efficiency on optimized design of soil-ladle furnace slag-fly ash mixtures for roadway construction**

### **ABSTRACT**

The application of ladle furnace slags (LFS) and fly ash as chemical soil stabilizers is an effective technique to promote soil stabilization in highway engineering and rises as an alternative to stimulate the reuse of these by-products usually disposed in waste dumps. However, there is no consolidated method to optimize the design of mixtures between lateritic soils-LFS-fly ash. Therefore, this study evaluated the Simplex-Centroid method efficiency related to the experimental design and to the optimization design of mixtures (soils-LFS-fly ash) destined to the construction of structural flexible pavement layers. Standard Proctor compacted specimens, for each experimental mixtures designed through the Simplex-Centroid method, were used to determine the Unconfined Compressive Strength (UCS), California Bearing Ratio (CBR), Expansion CBR and the Resilient Modulus (RM) seeking the definition of mathematical models statistically reliable able to describe each property evaluated as function of the material content on the mixture composition, allowing the comprehension of the impact of each mixture component on its mechanical and expansion properties. The results highlighted the Simplex-Centroid as an efficient method in predicting the mixture mechanical response and optimizing its design. The results also indicated that mixtures are not suitable for roadway construction as they do not fully reach the minimum mechanical requirements for its application in base, sub-base, and sub-ground reinforcement pavement layers. However, the results indicates that the mixtures complete attendance to the criteria for its applications as roadway construction material can be reached either by increasing compaction energy, curing time, or also increasing by-products content in mixture composition.

**Keywords:** lateritic soils; statistical mixture design; ladle furnace slag; fly ash; soil stabilization.

## 2.1. Introdução

Atualmente, a indústria siderúrgica brasileira produz mais de 34,4 milhões de toneladas de aço por ano, o que gera aproximadamente 5,5 milhões de toneladas de coprodutos classificados como escória de aciaria (IAB, 2018). Quanto à produção de cinzas volantes, estima-se que o Brasil produza anualmente 800 mil toneladas desse material (ALTHEMAN, 2017). Diante do grande volume com que são gerados e dos riscos ambientais relacionados à sua disposição indevida no meio físico (UNAL et al., 2014; LI et al., 2015; LU et al., 2015), os coprodutos siderúrgicos caracterizam-se como um desafio para as empresas do ramo, que buscam alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para a utilização desses materiais (NAIDUA, SHERIDANB e DYK, 2020).

Uma alternativa relevante para o aproveitamento de escórias de aciaria elétrica e cinzas volantes consiste na utilização desses materiais como matéria prima na indústria da construção civil. Diversos estudos exploraram o aproveitamento desses coprodutos siderúrgicos como material de construção e demonstraram que os mesmos podem ser utilizados de forma eficiente na fabricação de cimento (SHI et al., 2016), em substituição aos agregados de concretos (ADEGOLOYE et al., 2016; BISKRI et al., 2017) e na produção de argamassas (MARINHO et al., 2017; SANTAMARÍA et al., 2020; SOUZA et al., 2020).

Os referidos materiais também são utilizados como material de construção em obras de pavimentação rodoviária. Há diversos estudos que comprovaram a eficiência de escórias de aciaria e cinzas volantes como materiais alternativos na fabricação de concretos asfálticos (SKAF et al., 2016; ALINEZHAD e SAHAF, 2019), concretos compactados a rolo (LAM, JARITNGAM e LE, 2017), blocos de pavimentação (PENTEADO et al., 2019), concretos para pavimentos rígidos (GUPTA e SACHDEVA, 2019) e como agregados para camadas de base e sub-base de pavimentos (PASETTO e BALDO, 2015; MAGHOOL et al., 2017).

No âmbito da engenharia civil, uma importante manifestação sobre a aplicação de coprodutos da indústria siderúrgica em obras de pavimentação ocorre, normalmente, com a adição desses materiais aos solos constituintes de camadas estruturais de pavimentos rodoviários, visando a sua melhoria ou estabilização. Alguns estudos comprovaram que as adições de escória de aciaria, cinza volante ou de misturas destes em solos tropicais são capazes de melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade desses materiais geológicos em relação às apresentadas em seus estados naturais (TASTAN et al., 2011; MANSO et al., 2013; AKINWUMI, 2014; AUTELITANO e GIULIANI, 2016; SOL-SÁNCHEZ et al., 2016; DINIZ et al., 2017; YONG-FENG et al., 2017; MAHEDI, CETIN e DAYIOGLU, 2019; MOZEJKO e FRANCISCA, 2019; GU et al., 2020).

O potencial de utilização da escória de aciaria como agente estabilizante de solos está relacionado à presença, em sua composição química, de compostos comuns ao cimento (silicato dicálcico, silicato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico), que conferem ao material propriedades cimentícias (PAPAYIANNI e ANASTASIOU, 2012; IACOBESCU et al., 2013; ASHANGO e PATRA, 2016). Além dos compostos cimentantes, de modo geral, a composição química da escória de aciaria elétrica pode ser representada por cinco compostos principais, a saber, CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (WU et al., 2019), sendo os compostos expansivos (CaO e MgO) um dos fatores limitantes da utilização da escória de aciaria em obras de pavimentação, visto que a instabilidade volumétrica proporcionada pela hidratação desses compostos pode ter impacto deletério nos pavimentos (WANG, 2010; PASSETO e BALDO, 2015; AUTELITANO e GIULIANI, 2016).

Abordando o potencial de estabilização de solos através da adição de escória de aciaria elétrica redutora, os estudos de Manso et al. (2013), Montenegro et al. (2013), Ortega-López et al. (2014), Shalabi, Asi e Qasrawi (2017) e Ismail, Awad e Mwafy (2019) constataram melhorias significativas nas propriedades mecânicas de solos.

Por sua vez, as cinzas volantes da classe C apresentam propriedades pozolânicas devidas ao alto teor de CaO (maior que 20%) na sua composição química, consistindo no principal motivo pelo qual esse material vem sendo estudado como alternativa aos ativadores tradicionalmente utilizados para estabilização de solos (cal e cimento) (OZDEMIR, 2016).

A influência da cinza volante como agente estabilizante de solos, visando sua aplicação em obras de pavimentação, é abordada em alguns estudos. Ozdemir (2016), Mahvash et al. (2017) e Phummiphan et al. (2018) constataram que a estabilização de solos com cinza volante aumentou substancialmente a Resistência à Compressão Simples (RCS) e o Índice de Suporte Califórnia (ISC), indicando o potencial desse material para promover a melhoria das propriedades de engenharia de solos para fins de aplicação em obras rodoviárias.

Já os estudos desenvolvidos por Montenegro et al. (2013), Ortega-López et al. (2014), Pitanga et al. (2016) e Santos et al. (2018) analisaram o potencial de estabilização de solos utilizando misturas de escória de aciaria elétrica redutora e cinza volante, constatando a melhoria das propriedades mecânicas em relação ao solo na condição natural, principalmente quanto aos valores de RCS, ISC e Expansão ISC.

Apesar da existência de estudos abordando a eficácia do uso de coprodutos siderúrgicos como agentes estabilizantes de solos, ainda não há um método fundamentado em planejamentos experimentais para a determinação de dosagens otimizadas de estabilizantes químicos não convencionais em misturas com solos. A ausência de critérios para guiar a utilização de um

determinado tipo de escória de aciaria em uma aplicação específica é um dos principais fatores que limitam a utilização desse resíduo em larga escala (WANG, WANG e GAO, 2010).

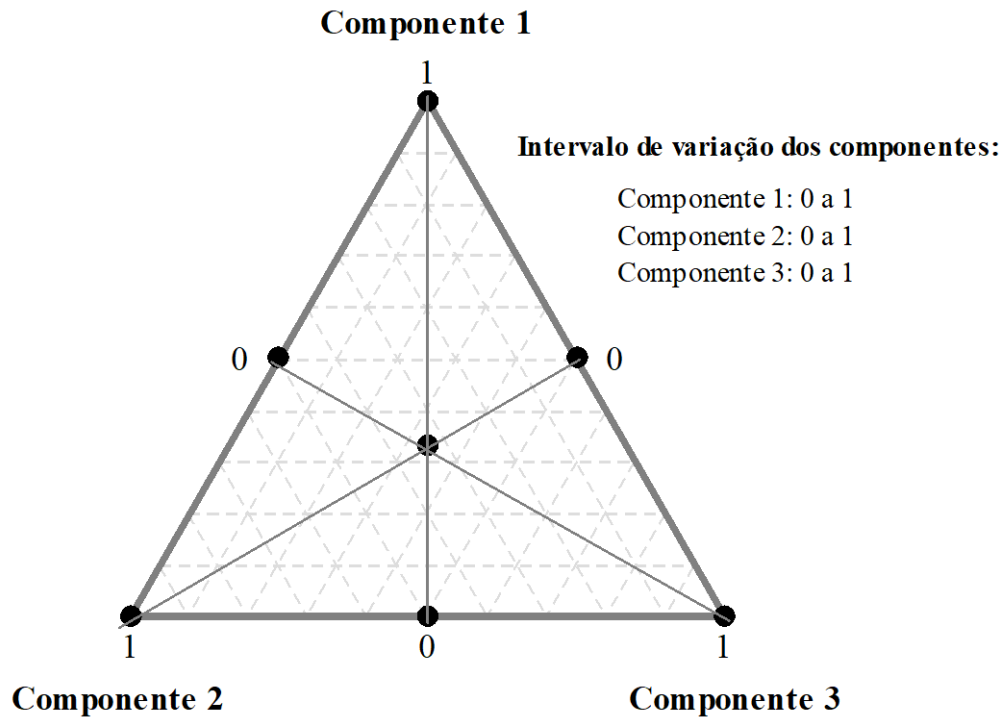
Uma forma de estimar a dosagem de componentes de misturas, de forma que estas atendam a parâmetros de projeto especificados em normas técnicas, é através do método Simplex-Centroide, que consiste em uma abordagem simplificada do método Simplex-Lattice, apresentada por Scheffé (1958), para a dosagem de misturas em planejamentos experimentais. A principal vantagem do método Simplex-Centroide consiste em estimar modelos matemáticos de maneira mais simples que o Simplex-Lattice, permitindo a obtenção de resultados confiáveis a partir de um número reduzido de ensaios (MEDEIROS et al., 2019).

A proposta do método Simplex-Centroide é, de forma geral, obter modelos matemáticos apropriados (na forma de polinômios) que sejam capazes de correlacionar variáveis de resposta com as variáveis de entrada. Através da análise desses modelos matemáticos polinomiais, pode-se estudar a influência que as variáveis de entrada exercem sobre as variáveis de resposta, permitindo também a análise da interação entre as variáveis de entrada. Adicionalmente, é possível determinar, através da otimização do modelo matemático, uma dosagem “ótima” da mistura em que a variável de resposta é otimizada em função das variáveis de entrada (NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2003).

As variáveis de entrada consistem nos valores máximos e mínimos que um determinado componente pode assumir em uma mistura. A partir desses valores, o método estabelece um diagrama, em função do número de componentes, para a realização da dosagem das misturas experimentais a partir das quais serão obtidas as variáveis de resposta (NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2003). Por exemplo, a utilização de três componentes na dosagem das misturas experimentais constitui um sistema ternário cuja superfície de resposta, segundo o método Simplex-Centroide, é um diagrama na forma de um triângulo equilátero, exemplificado na Figura 1.

No diagrama da Figura 1, todos os três componentes variam de 0 a 100% em relação à massa seca da mistura. Cada vértice do triângulo corresponde ao valor máximo que cada componente pode assumir na mistura, enquanto a mediana da aresta oposta a esse vértice corresponde ao valor mínimo que o mesmo componente pode assumir. Cada ponto localizado sobre as arestas e na parte interna do diagrama triangular corresponde a uma mistura experimental que deve ser submetida aos ensaios laboratoriais para a obtenção das variáveis de resposta (JIAO et al., 2018).

Figura 1 - Diagrama triangular padrão de um sistema ternário com componentes variando de 0 a 100%.



Fonte: O Autor (2022)

As variáveis de resposta podem ser uma determinada propriedade de engenharia do produto, como, por exemplo, a RCS, o ISC, a Expansão ISC, o MR, entre outras. A partir das variáveis de resposta e do número de componentes das misturas experimentais, o método fornece superfícies de respostas e modelos matemáticos que permitem a análise da interação entre os componentes e da influência que cada componente exerce numa propriedade final do produto. A Equação 1 exemplifica esses modelos matemáticos, apresentando a forma característica do modelo de regressão polinomial que melhor se ajusta a um sistema ternário (JIAO et al., 2018; WU et al., 2018).

$$Y(x_1x_2x_3) = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{123}x_1x_2x_3 \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

$Y(x_1x_2x_3)$ : Variável de resposta em função dos componentes;

$\beta_i$ : Coeficientes da regressão a serem calculados;

$x_1x_2x_3$ : Variáveis de entrada (porcentagem de cada componente na mistura, em que  $(x_1+x_2+x_3 = 1)$ ).

A aplicação do método Simplex-Centroide para a determinação de planejamentos experimentais é verificada em diversas áreas da engenharia. Coronado, Segadães e Andrés (2014), Ngum et al. (2014), Medeiros et al. (2019) e Mendes et al. (2019), por exemplo,

elaboraram modelos matemáticos que correlacionaram as quantidades de componentes de produtos cerâmicos com as propriedades finais dos produtos. Nesses estudos, os modelos matemáticos gerados também foram utilizados para otimizar a dosagem de componentes dos produtos cerâmicos finais. De forma similar, estudos relacionados à otimização de dosagem de componentes e à otimização de propriedades finais de argamassas e de concretos também utilizaram o método Simplex em seus programas experimentais (HE et al., 2014; SHI et al., 2016; JIAO et al., 2018; WU et al., 2018).

Entretanto, embora a versatilidade desse método permita sua aplicação em diversas áreas da engenharia, há poucos estudos vertendo sobre sua aplicabilidade na área de pavimentação, especialmente aqueles relacionados à melhoria e estabilização de solos. Nesse contexto, o método Simplex-Centroide tem aplicabilidade na formulação de modelos matemáticos polinomiais que podem ser utilizados na predição do potencial de expansão de solos, de valores de ISC e de RCS de solos estabilizados quimicamente (ONYELOWE et al., 2019).

No contexto da pavimentação rodoviária, entretanto, há poucos estudos explorando o método Simplex-Centroide no planejamento experimental para o estudo da dosagem de compostos. Iwanski, Buczynski e Mazurek (2016) utilizaram o método Simplex-Centroide para otimizar a dosagem do material cimentante utilizado na composição de uma Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) destinada à camada de base de pavimentos. Os referidos autores conseguiram otimizar a dosagem de componentes das misturas, maximizando a RCS e a durabilidade das misturas compactadas. Esse método também foi adotado por Onyelowe et al. (2019) para dosar as quantidades de pó de brita e água a serem adicionadas ao solo, visando a otimização de sua capacidade de suporte e a redução de sua expansão.

Por mais que o método Simplex-Centroide seja uma ferramenta confiável na otimização de dosagem de misturas em outras áreas da engenharia civil, sua aplicabilidade na área de pavimentação, principalmente para a estabilização de solos a partir de sua mistura com coprodutos siderúrgicos, ainda não é consolidada, o que reforça a necessidade de estudos sobre esse tema. Diante do exposto, este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica de aplicação do planejamento experimental baseado no método Simplex-Centroide na estimativa do comportamento mecânico [RCS, ISC, Expansão ISC e MR] de misturas entre solo, escória de aciaria elétrica redutora e cinza volante, assim como na otimização da dosagem dessas misturas, de forma que estas atendam a critérios que viabilizam sua utilização em camadas estruturais de pavimentos asfálticos. Pressupõe-se que a consolidação de um método eficiente para a dosagem desse tipo de mistura permitirá a melhor utilização desses coprodutos como

agentes estabilizantes químicos de solos, tornando-os uma alternativa viável técnica, ambiental e economicamente aos estabilizantes convencionais, estimulando a reutilização de materiais antes dispostos no meio físico, seja de forma indiscriminada, seja em aterros de contenção de resíduos sólidos.

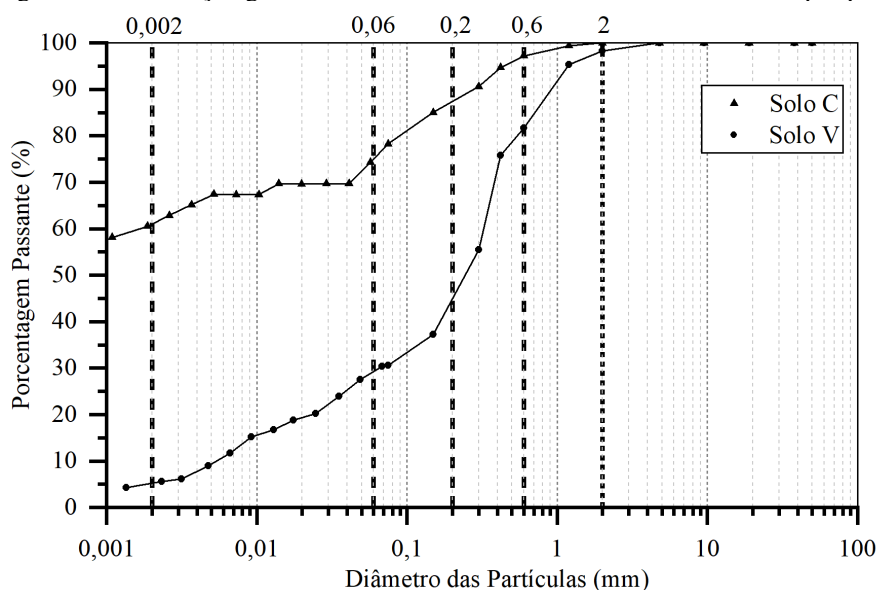
## 2.2. Materiais

### 2.2.1. Solos

Foram utilizadas duas amostras de solos (C e V) provenientes de jazidas de empréstimo localizadas no Município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil. As amostras de solos foram coletadas no estado deformado, seguindo as recomendações do procedimento PRO 003 (DNER, 1994a). As amostras foram conduzidas ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LEC/UFV) e preparadas para a realização de ensaios de laboratório, seguindo as recomendações da norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a).

A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica dos solos determinada a partir das recomendações da norma técnica NBR 7181 (ABNT, 2016c). As amostras de solos também foram submetidas a ensaios de laboratório para a determinação da massa específica dos grãos do solo, conforme a norma técnica NBR 6458 (ABNT, 2016d), e dos Limites de Atterberg, conforme as prescrições das normas técnicas NBR 6459 (ABNT, 2016e) e NBR 7180 (ABNT, 2016f). Os resultados dos ensaios supracitados bem como a classificação geotécnica das amostras de solos conforme as normas técnicas ASTM D2487 (ASTM, 2017), AASHTO M145-91 (AASHTO, 2017) e CLA 259 (DNER, 1996b) são apresentados na Tabela 1.

Figura 2 - Distribuição granulométrica das amostras dos solos utilizados na pesquisa.



Fonte: O Autor (2022)

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de caracterização e classificações geotécnicas das amostras dos solos utilizados na pesquisa.

Parâmetro (%)	Solo		Parâmetro	Solo	
	C	V		C	V
Argila ( $\Phi \leq 0,002$ mm)	61	5	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	28,14	26,57
Silte ( $0,002\text{mm} < \Phi \leq 0,06$ mm)	14	24	Limite de Liquidez (LL)/ Limite de Plasticidade (LP)	78/43	36/18
Areia Fina ( $0,06\text{ mm} < \Phi \leq 0,2$ mm)	12	13	Índice de Plasticidade (PI) (%)	35	18
Areia Média ( $0,2 < \Phi \leq 0,6$ mm)	10	40	Classificação USC	CH-MH	SC
Areia Grossa ( $0,6\text{mm} < \Phi \leq 2$ mm)	3	15	Classificação TRB	A-5-7 (32)	A-2-6
Pedregulho ( $\Phi > 2,0$ mm)	0	3	Classificação MCT	LA'	NA

$\Phi$ : diâmetro da partícula

Fonte: O Autor (2022)

Através dos sistemas USC e TRB, a amostra de solo C é classificada como uma argila de alta plasticidade que apresenta fraco a pobre comportamento geral quando utilizada como material de subleito (ASTM, 2017; AASHTO, 2017). Entretanto, quando considerada a classificação através da metodologia MCT, o solo C é classificado como (LA'), designação essa que remete à classe de solos arenosos lateríticos que apresentam boa capacidade suporte e comportamento resiliente, sendo adequados para a construção de camadas de base de pavimentos (NOGAMI e VILLIBOR, 1990).

Quanto à amostra de solo V, esta é classificada pelos sistemas USC e TRB como uma areia argilosa de média plasticidade, com comportamento variando entre excelente a bom quando atua como material constituinte de camadas de subleito de pavimentos (ASTM, 2017; AASHTO, 2017). Já segundo a metodologia MCT, a amostra de solo V apresentou designação NA' atribuída à classe de misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico que, segundo Nogami e Villibor (1990), apresentam boa capacidade de suporte e baixos valores de módulo de resiliência.

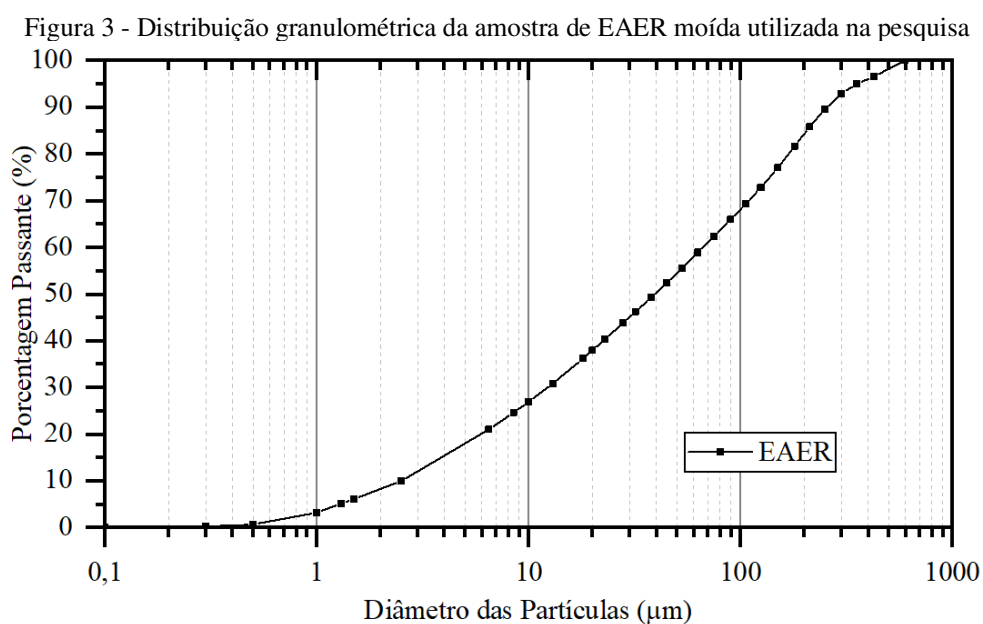
### 2.2.2. Escória de aciaria elétrica redutora

A amostra de escória de aciaria elétrica redutora (EAER) foi coletada em seu estado bruto no pátio de estocagem de uma empresa que atua no ramo de fabricação de tubos metálicos, localizada no Município de Jeceaba, Estado de Minas Gerais, Brasil. A amostragem do material seguiu as recomendações da norma técnica NBR 10007 (ABNT, 2004), e o tempo entre a

geração da EAER e sua amostragem não excedeu 72 horas. Logo, a amostra de EAER não foi submetida a nenhum processo de cura antes de seu transporte ao LEC/UFV.

Antes de sua utilização nesse estudo, a amostra bruta de EAER foi submetida ao processo de secagem ao ar, moagem e peneiramento para a retirada de partículas maiores que 0,6mm (peneira #30). A redução granulométrica por moagem da amostra bruta de EAER teve como objetivo aumentar a superfície específica desse material a níveis semelhantes aos utilizados em outros estudos envolvendo coprodutos siderúrgicos (MANSO et al., 2013; AKINWUMI, 2014; MAHMUDI et al., 2021; SHEEN et al., 2021).

A Figura 3 apresenta a distribuição granulométrica da amostra de EAER moída determinada por difração à laser conforme a norma ISO 13320 (ISO, 2020). A amostra de EAER apresentou índice de finura igual a 55,8% e superfície específica de 1604,4 cm<sup>2</sup>/g, determinados conforme as normas técnicas NBR 11579 (ABNT, 2012a) e NBR 16372 (ABNT, 2015), respectivamente. O peso específico das partículas sólidas da amostra de EAER é igual a 29,1 kN/m<sup>3</sup>, valor este obtido a partir dos procedimentos apresentados na norma técnica NBR 16605 (ABNT, 2017).



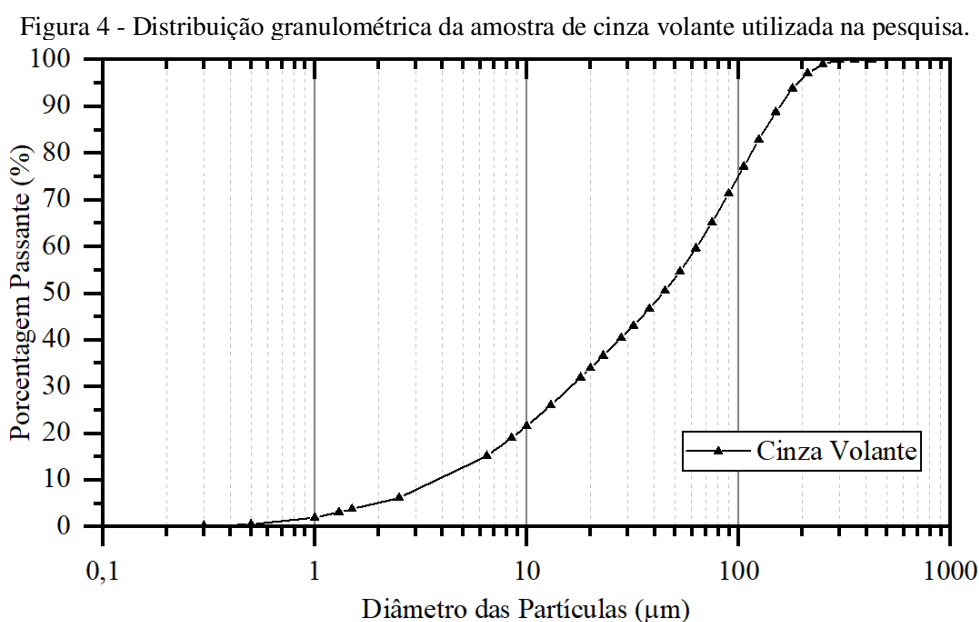
Fonte: O Autor (2022)

### 2.2.3. Cinza volante

A amostra de cinza volante (CV) utilizada nesta pesquisa foi fornecida por uma empresa que atua no mercado com beneficiamento e comercialização de cinzas pozolânicas, material proveniente da queima do carvão mineral, situada no Município de Capivari de Baixo, Estado de Santa Catarina, Brasil. Conforme informações do fabricante, o material é classificado como

cinza volante Classe C e atende aos requisitos de materiais pozolânicos prescritos na norma técnica NBR 12653 (ABNT, 2014).

A preparação do material para sua utilização nesse estudo seguiu os procedimentos estabelecidos pela norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a). A amostra de CV apresenta peso específico das partículas sólidas igual a  $20,8 \text{ kN/m}^3$ , determinada conforme a norma técnica NBR 16605 (ABNT, 2017), índice de finura de 23,71%, determinado por peneiramento conforme a norma técnica NBR 11579 (ABNT, 2012a), e superfície específica de  $1788,24 \text{ cm}^2/\text{g}$ , determinada através do método de Blaine [NBR 16372 (ABNT, 2015)]. A distribuição granulométrica da amostra de CV, apresentada na Figura 4, foi determinada por difração à laser, conforme a norma ISO 13320 (ISO, 2020).



Fonte: O Autor (2022)

#### 2.2.4. Caracterização química dos materiais

A identificação e quantificação dos principais óxidos presentes nas amostras de solos, EAER e CV foram determinadas através da técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX). Os testes foram realizados utilizando o equipamento PANalytical Epsilon3x, e os resultados destes são apresentados na Tabela 2. Salienta-se que os teores dos óxidos nas composições químicas dos materiais são apresentados considerando a normalização em 100% dos resultados.

A análise FRX permitiu verificar que as amostras de solo apresentaram elevados teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em sua composição. Adicionalmente, pôde-se constatar significativos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na composição química do solo C (predominantemente argiloso). A identificação desses óxidos e sua quantificação na matriz do solo podem ser relevantes para a quantidade e

qualidade de eventuais reações pozolânicas, visto que as amostras de solo utilizadas na pesquisa foram fontes de óxidos silicosos e aluminosos necessários para que essas reações ocorram.

Tabela 2 - Principais óxidos presentes nos materiais empregados na pesquisa.

Composto	Solo C (%)	Solo V (%)	EAER (%)	CV (%)
CaO	0,02	0,07	43,65	1,76
MgO	1,60	1,95	2,43	1,10
SiO <sub>2</sub>	33,74	50,19	22,22	61,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,52	33,63	11,16	24,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,52	2,66	17,41	4,26
K <sub>2</sub> O	0,08	1,80	0,35	2,84
Na <sub>2</sub> O	1,93	3,32	0,97	1,41
SO <sub>3</sub>	0,06	0,04	0,71	0,37
Cl	0,33	0,30	0,30	0,21
TiO <sub>2</sub>	1,90	0,25	0,71	1,13
PF*	14,30	5,80	0,09	1,60

\*Perda ao fogo

Fonte: O Autor (2022)

Os óxidos encontrados na composição química da EAER e seus respectivos teores dependem de diversos fatores, como matéria prima utilizada na fabricação do aço, processo de produção do aço, tipo de aço fabricado, condição de resfriamento, entre outros (YILDIRIM e PREZZI, 2017; ZHANG et al., 2019). Diante do exposto, a análise química da EAER focou na identificação e quantificação dos compostos que permitiram inferir sobre a hidraulicidade do material, como CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A hidraulicidade da escória pode ser avaliada a partir da sua basicidade, obtida através da relação  $[(\%CaO)/(\%SiO_2)]$  ou da relação  $[(\%CaO)/(\%SiO_2 + \%P_2O_5)]$  (SHI, 2004). A partir dos teores desses compostos na amostra de EAER analisada, obtém-se índice de hidraulicidade igual a 1,97, valor que remete a uma escória de baixa hidraulicidade (SHI, 2004; KAMBOLE et al., 2017), porém com significativas propriedades cimentícias (ZHANG et al., 2019).

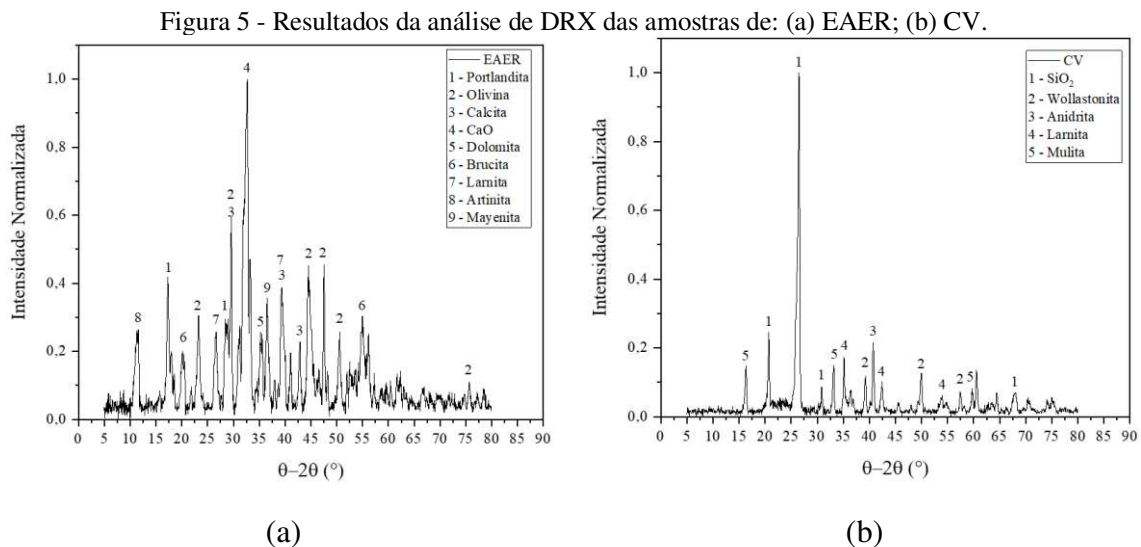
A análise de FRX realizada na amostra de CV utilizada nesta pesquisa permitiu a identificação de compostos usualmente encontrados em cinzas volantes da Classe C, como SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A predominância desses óxidos na composição do material esteve em concordância com os valores encontrados na literatura técnica, destacando os baixos teores de CaO, que é característico desse tipo de material.

A determinação dos teores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO é considerada relevante, pois eles são responsáveis por permitir que ocorram reações pozolânicas quando em contato com água, situação em que há a dissociação do CaO e a combinação com os materiais silicosos e aluminosos, formando os compostos pozolânicos que são responsáveis pelo ganho de resistência em curto e em longo prazos (TASTAN et al., 2011). Diante disso, a eficiência da CV como agente estabilizante pode ser mensurada a partir do seu potencial cimentício, dado

pela relação entre os teores de CaO e de SiO<sub>2</sub> (JANZ e JOHANSSON, 2002). Segundo estes mesmos autores, quanto maior a relação CaO/SiO<sub>2</sub>, maior é a hidraulicidade do material. Logo, para a CV desse estudo, obtêm-se valores baixos para essa relação, da ordem de 0,03, o que indica se tratar de um material com baixa hidraulicidade.

### 2.2.5. Caracterização mineralógica dos materiais

A caracterização mineralógica das amostras de EAER, CV e solos foi realizada através da técnica de Difração de Raios-X (DRX). Os difratogramas foram obtidos utilizando o difratômetro Bruker D8-Discover (radiação CuK $\alpha$ , 40kV, 30mA,  $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ , com medidas  $\theta$ - $2\theta$  na faixa de 5° a 80°, 0.02°/passo, 1s/passos). Na Figura 5 são apresentados os difratogramas das amostras de EAER e de CV, que foram utilizados para a identificação das principais fases mineralógicas presentes nesses materiais.



Fonte: O Autor (2022)

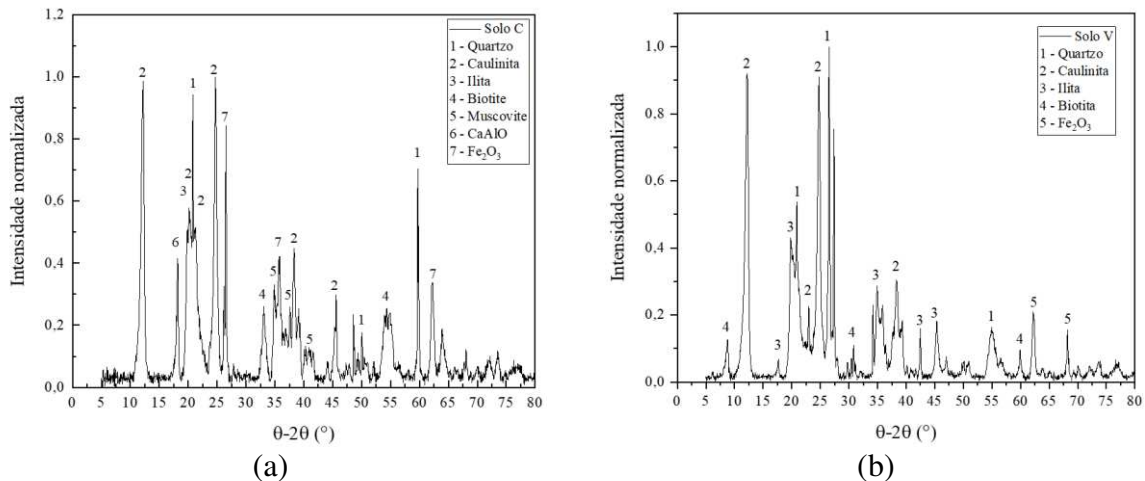
Para a amostra de EAER [Figura 5 (a)], as principais fases mineralógicas identificadas no material foram portlandita, olivina, calcita, dolomita, brucita, artinita e larnita. Quanto à amostra de CV, as principais fases mineralógicas identificadas foram mulita (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>), wollastonita (CaSiO<sub>3</sub>), quartzo (SiO<sub>2</sub>), óxido de cálcio (CaO), calcita (CaCO<sub>3</sub>), albita (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) e anidrita (CaSO<sub>4</sub>). A identificação dessas fases mineralógicas está em consonância com os minerais encontrados por outros autores em diversos estudos que abordam materiais similares aos desse estudo (VASSILEVA et al., 2003; ALDEEKY e HATTAMLEH, 2017; YILDIRIM e PREZZI, 2017) e pode ser um indicativo da reatividade do material, visto que minerais como a larnita, mayenita e wollastonita apresentam elevada hidraulicidade, o que pode favorecer a ocorrência de reações de hidratação desses compostos e a formação de

compostos cimentados de maior resistência (ALDEEKY e HATTAMLEH, 2017; DINIZ et al., 2017).

Os picos de maiores intensidades verificados no difratograma da amostra de CV [Figura 5 (b)] correspondem ao mineral mulita, composto pelo sistema binário  $Al_2O_3-SiO_2$  que confere a esse mineral boas propriedades físicas e mecânicas (MONTEIRO et al., 2004). Através dos picos de menores intensidades, identificaram-se traços de wollastonita, calcita e albita. Os principais minerais identificados na análise de DRX do solo V, como a mulita e a wollastonita, são compostos predominantemente por  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ , que são responsáveis pela formação de compostos cimentícios (YOOBANPOT et al., 2020), indicando que o material apresenta elevada hidráulica.

Quanto à caracterização mineralógica das amostras dos solos utilizados nessa pesquisa, a Figura 6 apresenta os respectivos difratogramas com a identificação das principais fases mineralógicas.

Figura 6 - Resultados da análise de DRX das amostras dos solos: Solo C (a); Solo V (b).



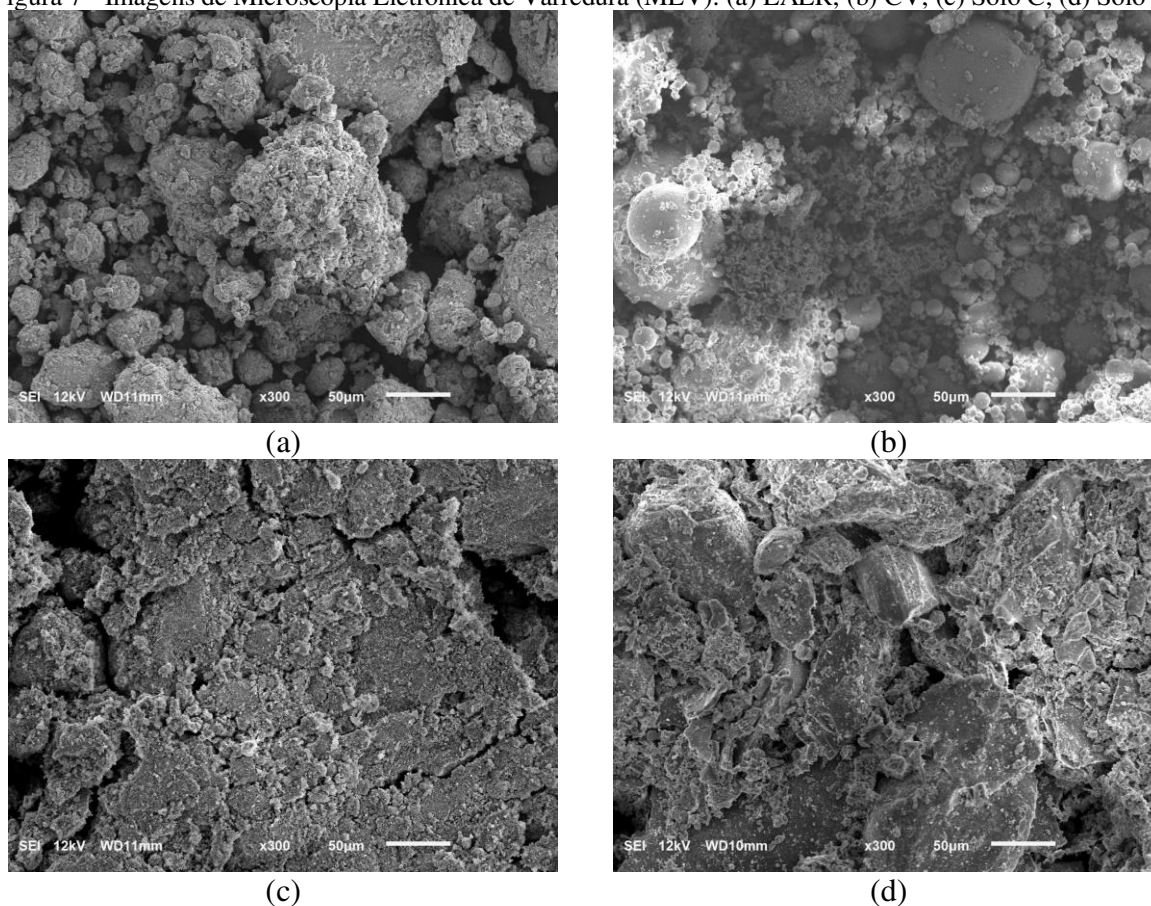
Fonte: O Autor (2022)

Em ambas as amostras de solo, os minerais encontrados que apresentaram picos mais intensos foram o quartzo e a caulinita, os quais são frequentemente encontrados em solos tropicais (LOPES et al., 2019). Os picos de menor intensidade obtidos na análise da amostra do solo C [Figura 6 (a)] referem-se à hematita, responsável pela coloração avermelhada do solo (LIU et al., 2021), e aos minerais ilita e muscovita. Para a amostra de solo V, os picos de menor intensidade foram correspondentes à dolomita, portlandita e biotita [Figura 6 (b)].

## 2.2.6. Caracterização microestrutural dos materiais

A caracterização microestrutural das amostras de EAER, CV e solos foi realizada através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A Figura 7 apresenta as imagens resultantes das análises realizadas utilizando o equipamento JEOL JSM-6010LA (resolução de 4 nm, feixe a 20 kV, magnificação de 8X a 300.000X e voltagem de aceleração de 500 V a 20 kV), com as amostras dos materiais metalizadas em ouro.

Figura 7 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): (a) EAER; (b) CV; (c) Solo C; (d) Solo V.



Fonte: O Autor (2022)

Pode-se observar que a amostra de EAER [Figura 7 (a)] apresenta partículas de geometrias variadas, variando entre as formas arredondada e angular, além de apresentar superfície rugosa e aspecto poroso. Quanto à morfologia das partículas de CV [Figura 7 (b)], destaca-se que esse material é composto majoritariamente por partículas esféricas maciças ou ocas de diversos tamanhos.

A imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra de solo C [Figura 7 (c)] revelou tratar-se de um material com estrutura compacta, dispersa e com os vazios preenchidos com minerais de menor tamanho. Já para a amostra de solo V [Figura 7 (d)],

verifica-se que esse solo não se apresenta tão compacto quanto a amostra de solo C, muito por decorrência dos minerais de quartzo de diversos tamanhos que se destacam na imagem.

## 2.3. Métodos

### 2.3.1. Planejamento Experimental das misturas

Para o atendimento das particularidades dessa pesquisa, as misturas experimentais foram constituídas por três componentes (solo, EAER e CV), constituindo, portanto, um sistema ternário. Para a elaboração do diagrama triangular do método Simplex-Centroide, exemplificado na Figura 1, foi necessário definir os valores máximos e mínimos (variáveis de entrada) que cada componente pode assumir nas misturas (porcentagem em relação à massa seca das misturas finais).

Conforme verificado nos estudos de Manso et al. (2013), Montenegro et al. (2013), Ortega-López et al. (2014), Jha e Sivapullaiah (2015) e Pitanga et al. (2016), a utilização de 5 a 20% de escória de aciaria em relação à massa seca das misturas foi suficiente para promover a estabilização de solos. Em relação à aplicação de cinza volante como agente estabilizante de solos, os estudos de Bin-Shafique et al. (2010), Pitanga et al. (2016) e Yildirim e Prezzi (2017) indicam teores entre 2 a 20%, especialmente quando utilizada conjuntamente com escória de aciaria (PITANGA et al., 2016; YILDIRIM e PREZZI, 2017).

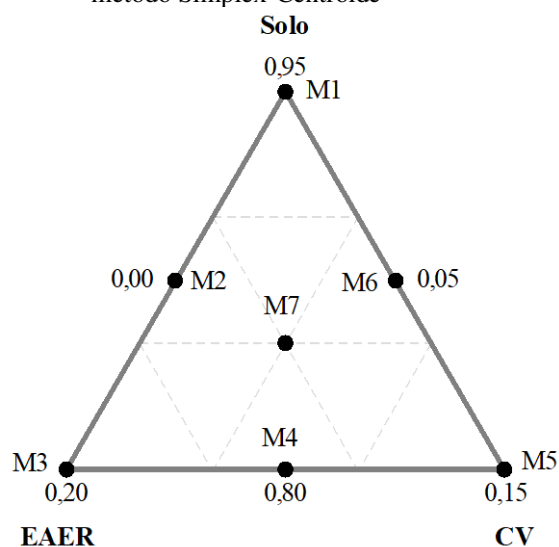
Com base nessas referências bibliográficas, considerou-se que as misturas solo-escória de aciaria elétrica redutora moída-cinza volante (SEC) dessa pesquisa fossem dosadas a partir da substituição de 5% a 20% da massa seca de solo por EAER e CV. No entanto, permitiu-se que o teor de EAER nas misturas variasse entre 5 e 20%, e o teor de CV variasse entre 0 e 15% em relação à massa seca das misturas finais. Como consequência dos teores máximos e mínimos de EAER e de CV adotados para a composição das misturas experimentais, a porcentagem de solo nas misturas experimentais variou entre 80% e 95% em relação à massa seca da mistura.

Após a determinação do intervalo de variação que cada componente pôde assumir nas misturas, o sistema ternário do método Simplex-Centroide foi gerado com auxílio do software Minitab® 2018. Como foram considerados três componentes nas misturas analisadas, o número de misturas experimentais que foram geradas pelo método foi dado por  $2^q - 1$ , em que “q” é o número de componentes, totalizando 7 misturas para cada planejamento experimental.

As sete misturas de cada planejamento experimental (M1 a M7) foram alocadas sobre as arestas, vértices e no baricentro do diagrama triangular. O diagrama triangular resultante, assim como a localização das misturas experimentais que foram utilizadas nessa pesquisa no

diagrama, são apresentados na Figura 8, enquanto as proporções de cada componente, em relação à massa seca total de cada mistura experimental, são apresentadas na Tabela 3.

Figura 8 - Identificação e composição das misturas experimentais no diagrama triangular obtido através do método Simplex-Centroide



Fonte: O Autor (2022)

Tabela 3 - Composição das misturas para o planejamento experimental realizado na pesquisa.

Material	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
<b>Solo (%)*</b>	95,0	87,5	80,0	80,0	80,0	87,5	85,0
<b>EAER (%)*</b>	5,0	12,5	20,0	12,5	5,0	5,0	10,0
<b>CV (%)*</b>	0,0	0,0	0,0	7,5	15,0	7,5	5,0

\* porcentagens em relação à massa seca da mistura.

Fonte: O Autor (2022)

### 2.3.2. Caracterização geomecânica dos solos e das misturas experimentais

A umidade ótima de compactação ( $W_{ot}$ ) e o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ ) das amostras dos solos e das misturas experimentais M1 a M7 de cada solo foram determinados através de ensaios de compactação, seguindo as normas técnicas NBR 7182 (ABNT, 2016g) e NBR 12023 (ABNT, 2012b). Os parâmetros ótimos de compactação dos solos e das misturas experimentais foram determinados considerando a energia Proctor Normal, considerada pela NBR 12023 (ABNT, 2012b) a mais adequada para promover a compactação de materiais com propriedades cimentícias.

Amostras dos solos C e V, assim como as misturas M1 a M7 do planejamento experimental, foram caracterizadas geomecanicamente através dos seguintes ensaios de laboratório: (i) Resistência à Compressão Simples (RCS) [NBR 12025 (ABNT, 2012c)]; (ii)

Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão ISC [NBR 9895 (ABNT, 2016h)]; e (iii) Módulo de Resiliência (MR) [DNIT ME-181 (DNIT, 2018)].

Os ensaios de RCS e ISC foram realizados em triplicata, com corpos de prova moldados nas umidades ótimas das curvas de compactação, aplicando-se a energia do Proctor Normal, e submetidos ao período de 7 dias de cura selada antes da ruptura. A magnitude final da respectiva propriedade foi definida como a média aritmética das três determinações, respeitando-se o coeficiente de variação máximo de 10%.

Os ensaios para a determinação do MR das amostras de solos e das misturas experimentais M1 a M7 foram realizados em duplicata. O modelo escolhido para calcular o valor do MR das misturas experimentais (M1 a M7) dosadas com cada amostra de solo é apresentado na Equação 2 e foi proposto por Pezo et al. (1992). Durante a realização dos ensaios, os pares de tensões foram os definidos pela norma técnica ME 134 (DNIT, 2017).

$$MR = k_1 \cdot (\sigma_3)^{k_2} (\sigma_d)^{k_3} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

- $MR$ : Módulo de Resiliência (MPa);
- $\sigma_3$ : Tensão confinante (MPa);
- $\sigma_d$ : Tensão desvio (MPa);
- $k_1, k_2, k_3$ : coeficientes da regressão

Para o cômputo do MR e a consequente avaliação da viabilidade técnica da aplicação das misturas SEC como material constituinte de camadas estruturais de pavimentos (base, sub-base e reforço do subleito), foram adotadas as tensões confinantes e desviatórias ( $\sigma_3$  e  $\sigma_d$ , respectivamente) apresentadas na Tabela 4. Os valores de tensões apresentados na Tabela 4 foram calculados a partir da análise estrutural do pavimento tipo proposto por Nega e Nikraz (2017), cujas particularidades são apresentadas na Tabela 5. A análise estrutural foi conduzida através do software AEMC (FRANCO, F.A.C.P., 2021), sendo feitas as seguintes considerações adicionais:

- As tensões atuantes em cada camada foram calculadas sob a roda do eixo padrão;
- Para a definição do estado de tensões representativo das tensões atuantes em cada camada estrutural do pavimento analisado, tomou-se como referência as tensões  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$  atuantes no centro das camadas de base, sub-base e de reforço de subleito (HUANG, 2004; ISLAM e TAREFDER, 2020).

Tabela 4 - Pares de tensões representativos do estado de tensões atuantes nas camadas estruturais do pavimento considerado nas análises.

Camada	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)
Base	0,030	0,160
Sub-Base	0,010	0,090
Reforço do Subleito	0,009	0,037

Fonte: O Autor (2022)

Tabela 5 - Propriedades dos materiais e demais características do pavimento tipo utilizado na análise estrutural.

Camada do Pavimento	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessura (cm)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
Concreto asfáltico	1.800	0,30	5,0	2400
Base Granular	1.200	0,35	15,0	2150
Sub-Base granular	500	0,35	25,0	1850
Reforço de Subleito	70	0,40	75,0	1700
Subleito	50	0,45	Infinita	1600

Fonte: Nega e Nikraz (2017)

### 2.3.3. Modelos descritivos e superfícies de resposta

A partir dos resultados dos ensaios de RCS, ISC, Expansão ISC e MR, foram estimados, para as misturas M1 a M7 de cada amostra de solo, modelos matemáticos polinomiais descritivos de cada uma das propriedades mecânicas analisadas (RCS, ISC, Expansão ISC e MR) em função dos teores de cada componente nas misturas.

Os modelos matemáticos foram estimados através de um processo iterativo, utilizando-se o software Minitab® 2018. Na estimativa dos modelos matemáticos foi utilizada a ferramenta “*stepwise*” e a análise de variância (ANOVA) para obter o modelo matemático que melhor se ajustou aos dados experimentais com relevância estatística (nível de significância de 5% e limite de confiança de 95%).

### 2.3.4. Otimização da dosagem através da função desejabilidade

A avaliação da eficácia do método Simplex-Centroide na predição do comportamento mecânico de misturas Solo-EAER-CV (SEC) foi realizada a partir da análise entre os resultados obtidos de forma experimental e os resultados estimados a partir dos modelos matemáticos calculados.

Para realizar a otimização das misturas, foi utilizada a função Desejabilidade disponível no MiniTab 2018®. A partir dessa função, obtém-se o índice de desejabilidade, que varia entre 0 e 1 e que representa o quão próximas as misturas otimizadas estão de atingir os valores de contorno definidos durante a otimização. Por exemplo, se o critério adotado para a RCS for igual a 690 kPa, e a mistura experimental apresentar RCS maior ou igual a esse valor, ela atende ao critério e, conseqüentemente, o valor de desejabilidade para essa propriedade será igual a

1,0. Caso essa mistura não atenda ao critério, o índice de desejabilidade da mistura para essa propriedade decresce de forma proporcional a quão distante ela está desse valor alvo. Logo, valores de desejabilidade próximos de 1,00 indicam que as misturas experimentais atendem em sua totalidade aos parâmetros definidos, enquanto valores próximos de zero indicam o não atendimento destes.

A otimização da dosagem das misturas SEC foi realizada com o objetivo de se obter uma proporção entre os componentes que resulte em uma mistura que mais se aproxime de atender aos diferentes requisitos mínimos de RCS, ISC, Expansão ISC e MR requeridos para a aplicação dessas misturas em camadas estruturais de pavimentos. Assim, para as particularidades desse estudo, a mistura cuja dosagem foi considerada otimizada foi aquela que apresentou maior valor de desejabilidade dentre as misturas experimentais analisadas para cada amostra de solo.

Para a avaliação das misturas como materiais de construção de camadas de base de pavimentos asfálticos, foram adotados os valores alvos de RCS, ISC, Expansão ISC e MR que essas misturas devem atender. A norma técnica AASHTO T 220-66 (AASHTO, 1996; ARDAH, CHEN e ABU-FARSAKH, 2017) sugere que materiais aplicados em camadas de base de pavimentos devem apresentar RCS igual a 690 kPa para ter um desempenho satisfatório quando aplicado nessa camada do pavimento. Quanto ao valor mínimo de MR que os solos devem apresentar para viabilizar sua aplicação em camadas de base de pavimentos, foram adotados os valores de 82,74 MPa, para o solo C, e de 165,47 MPa, para solo V, valores estes definidos com base nas recomendações mínimas do AASHTO (2018) para o MR de solos com características argilosas e arenosas, respectivamente. Já para os valores de ISC e Expansão ISC, DNIT (2006) recomenda que os materiais destinados à construção de camadas de base de pavimentos submetidos a baixo volume de tráfego apresentem ISC maiores que 60% e Expansão ISC menores que 0,5%.

A viabilidade técnica da utilização das misturas como materiais de camadas de sub-base de pavimentos foi pautada nos valores mínimos de RCS, ISC, Expansão ISC e MR recomendados por DNIT (2006) e AASHTO (2018). Para a RCS, foi definido o valor alvo de 690 kPa conforme sugere a norma técnica AASHTO T 220-66 (AASHTO, 1996; ARDAH, CHEN e ABU-FARSAKH, 2017). De acordo com DNIT (2006), os materiais utilizados em camadas de sub-base de pavimentos asfálticos devem apresentar ISC igual ou superior a 20% e Expansão ISC menor ou igual a 1,0%. Para o MR, foram definidos como alvos os valores de 82,74 MPa, para o solo C, e 165,47 MPa, para solo V, conforme recomendado por AASHTO (2018).

Já a aplicabilidade das misturas em camadas de reforço do subleito de pavimentos asfálticos também foi realizada tomando-se os valores de referência de RCS, ISC, Expansão ISC e de MR. Para a definição do valor de RCS mínimo que as misturas devem atender para sua aplicação em camadas de reforço do subleito, adotou-se o valor mínimo de 345 kPa (ARDAH, CHEN e ABU-FARSAKH, 2017). Quanto ao ISC e à Expansão ISC, DNIT (2006) estabelece que os materiais destinados à aplicação em camadas de reforço de subleito devem apresentar ISC superior a 2% e Expansão ISC igual ou inferior a 1%. Quanto ao valor mínimo de MR para viabilizar a aplicação das misturas como material constituinte de camadas de reforço de subleito de pavimentos asfálticos, adotou-se o valor de 68,95 MPa para as misturas dosadas com ambos os solos, seguindo as recomendações de AASHTO (2018).

## 2.4. Resultados e discussão

### 2.4.1. Caracterização geomecânica das misturas experimentais dosadas pelo método Simplex-Centroides

Os parâmetros de ótimo resultantes dos ensaios de compactação realizados com as amostras de solo (M0) e das misturas experimentais M1 a M7 são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de ótimo dos solos e das misturas compactados na energia Proctor Normal.

Mistura		M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Solo C	W <sub>ot</sub> (%)	31,6	29,6	28,3	27,7	28,4	28,6	29,3	28,9
	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	13,9	14,0	14,0	15,2	14,8	14,8	14,3	14,7
Solo V	W <sub>ot</sub> (%)	15,1	15,2	16,4	15,3	15,5	14,7	15,7	15,4
	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,2	17,4	17,5	17,6	17,2	17,5	17,3	17,5

Fonte: O Autor (2022)

A partir dos resultados dos ensaios de compactação apresentados na Tabela 6, observa-se que a adição de EAER e CV às amostras de solo proporcionou pequenas reduções no teor de umidade ótimo (W<sub>ot</sub>) e pequenos incrementos nos valores de peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) de compactação das misturas. De forma geral, esse comportamento foi mais evidente com o aumento do teor de coprodutos adicionado às misturas, independente do solo analisado.

Quando analisados os resultados referentes às misturas experimentais preparadas com amostras do solo C, verificou-se que as misturas com maiores teores de coprodutos em suas composições foram as que apresentaram maior redução no W<sub>ot</sub> e maior aumento de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  em relação à amostra de solo puro. Esse comportamento está relacionado à substituição parcial das amostras de solo pelos coprodutos, procedimento que contribuiu para a formação de uma

mistura com distribuição granulométrica melhor graduada. O solo C, por apresentar uma quantidade maior de partículas com diâmetros correspondentes à fração argila em sua composição granulométrica (Figura 2), requer maior quantidade de água para promover a orientação dos argilominerais durante a compactação. Assim, a substituição de parte dessas partículas por uma combinação de partículas EAER-CV de maiores diâmetros (fração silte) e maior peso específico confere às misturas uma estrutura mais granular, ocasionando a redução do  $W_{ot}$  e o aumento de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ .

Quanto à avaliação dos resultados dos ensaios de compactação realizados com as misturas com a amostra de solo V, não foi possível verificar uma tendência clara de mudança nos comportamentos do  $W_{ot}$  e do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  em função do teor de coprodutos adicionado às misturas. Esse comportamento é atribuído ao fato de o solo V ser bem graduado, além de suas partículas sólidas apresentarem peso específico similar à dos coprodutos siderúrgicos. Assim, a adição de coprodutos ao solo substitui parcialmente as partículas de solo por partículas de diâmetro e peso específico similares. Logo, os  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  das misturas experimentais dosadas com amostras de solo V são menos sensíveis à adição de diferentes teores de coprodutos siderúrgicos.

#### 2.4.2. Resposta experimental, superfícies de resposta e modelos matemáticos para RCS

Os resultados dos ensaios de RCS das amostras de solo (M0) e das misturas experimentais (M1 a M7) dosadas com as amostras de solos C e V são apresentados na Tabela 7.

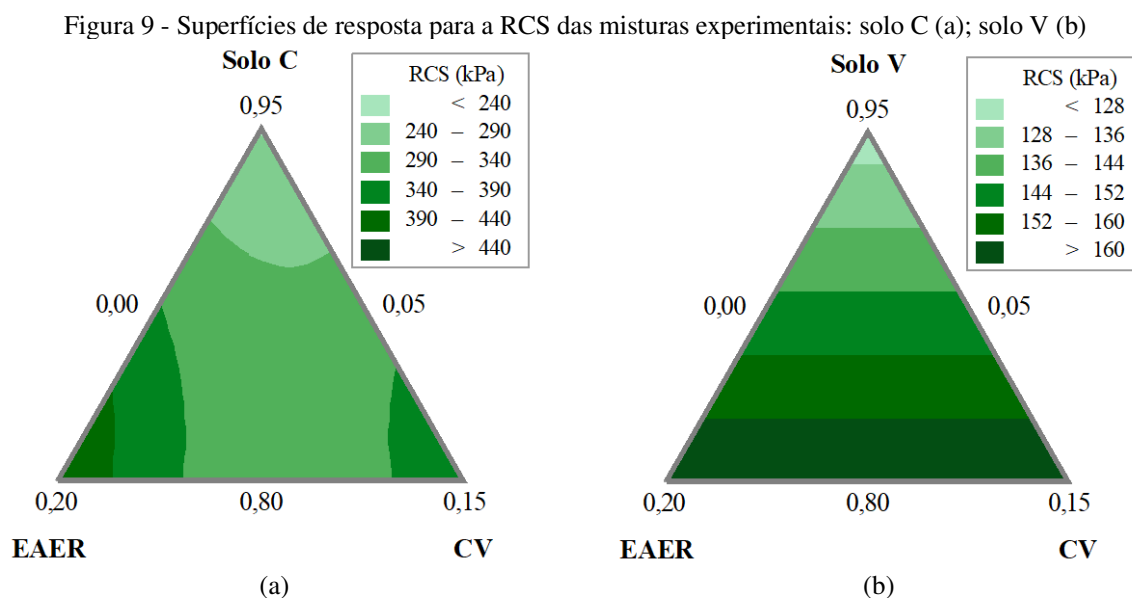
Tabela 7 - RCS (em kPa) dos solos e das misturas experimentais.

Material	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Solo C	203,7	243,2	293,7	469,6	309,0	377,2	339,5	322,0
Solo V	102,1	117,2	150,6	165,5	161,7	166,4	148,5	162,1

Fonte: O Autor (2022)

As superfícies de resposta apresentadas na Figura 9 representam graficamente a variação da RCS das misturas experimentais analisadas em função da percentagem em massa de cada componente na composição das misturas. A análise do diagrama apresentado na Figura 9 (a), referente às misturas dosadas com o solo C, além de permitir inferir que a RCS dessas misturas aumenta conforme o aumento do teor de coprodutos em sua composição, indica que há diferentes dosagens possíveis para se obter produtos com respostas mecânicas similares. Entretanto, o fato de os maiores valores de RCS terem sido verificados para as misturas localizadas mais próximas da porção inferior esquerda do diagrama, onde o teor de cinza

volante na mistura é mínimo, consiste em um indicativo de que a adição de cinza volante interfere em menor grau na RCS das misturas experimentais.



Fonte: O Autor (2022)

Essa hipótese pôde ser confirmada a partir da avaliação dos coeficientes do modelo matemático apresentado na Tabela 8 e na Equação 3. Visto que os coeficientes  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são positivos, espera-se que, em média, seja verificado acréscimo da RCS das misturas experimentais proporcional à magnitude desses coeficientes. Quando se compara a magnitude desses coeficientes, verifica-se que a adição de EAER às misturas foi a principal responsável pelo aumento nos valores médios de RCS em relação ao RCS médio desse solo em seu estado não estabilizado. Quanto à avaliação do coeficiente  $\beta_{23}$ , pode-se inferir que a combinação entre a EAER e a CV provoca a redução, em média, da RCS das misturas analisadas, quando mantidas as outras variáveis constantes.

É importante ressaltar que os coeficientes do modelo que expressaram a interação entre o solo C e a EAER ( $\beta_{12}$ ), solo C e a CV ( $\beta_{13}$ ) e entre os três componentes das misturas experimentais ( $\beta_{123}$ ) não apresentaram relevância estatística nessa análise, considerando o nível de significância de 95%. Embora três coeficientes não tenham apresentado relevância estatística, o modelo apresentado na Equação 3 apresentou  $R^2$  igual a 0,8752, demonstrando a boa correlação entre os dados analisados.

Já para o diagrama da Figura 9 (b), correspondente à RCS das misturas experimentais dosadas com solo V, verificou-se que a faixa de maiores valores de RCS se encontra no bordo inferior central do diagrama, indicando que as misturas M3, M4 e M5 foram as que apresentaram maiores valores para RCS. Cabe a observação que essas misturas foram as

dosadas com menores teores de solo em sua composição (80%), indicando que tanto a EAER quanto a CV culminam no acréscimo da RCS das misturas.

Essa hipótese é confirmada quando se avalia os coeficientes do modelo matemático apresentado na Tabela 8 e na Equação 4. Como os coeficientes  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são positivos, verifica-se que a adição tanto de EAER quanto de CV tem efeito positivo na RCS das misturas experimentais dosadas com amostras do solo V. Como os coeficientes  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são de mesma magnitude (402,1 e 401,3, respectivamente), pode-se inferir que a EAER e a CV têm o mesmo efeito na RCS das misturas experimentais.

Quanto aos outros coeficientes do modelo matemático apresentado na Equação 4 ( $\beta_{12}$ ,  $\beta_{13}$ ,  $\beta_{23}$  e  $\beta_{123}$ ) que representaram a interação entre os componentes da mistura, estes não apresentaram relevância estatística nesse estudo, considerando 95% de confiança. Apesar dessa constatação, o modelo apresentou  $R^2$  igual a 0,8897, indicando boa correlação entre os dados.

Tabela 8 - Coeficientes dos modelos matemáticos que melhor se ajustaram aos resultados de RCS.

Solo	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{23}$	$\beta_{123}$	$R^2$
C	166	1573	2139			-18733	-	0,8752
V	109,3	402,1	401,3	-	-	-	-	0,8897

Fonte: O Autor (2022)

$$RCS_C = 166 S + 1573 E + 2139 C - 18733 EC \quad \text{Equação 3}$$

$$RCS_V = 109,6 S + 396,6 E + 382,1 C \quad \text{Equação 4}$$

### 2.4.3. Resposta experimental, superfícies de resposta e modelos matemáticos para o ISC das misturas experimentais

A Tabela 9 apresenta os resultados das determinações do Índice de Suporte Califórnia (ISC) das amostras de solos (M0) e das misturas experimentais (M1 a M7) dosadas com amostras dos solos C e V.

Tabela 9 - Índice de Suporte Califórnia (ISC, em %) das amostras de solos e das misturas experimentais.

Material	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Solo C	11,2	17,8	29,0	32,6	18,2	12,1	18,2	28,4
Solo V	8,2	14,1	23,9	34,8	18,6	17,2	14,9	18,7

Fonte: O Autor (2022)

Na Tabela 10 apresentam-se os coeficientes dos modelos matemáticos (Equações 5 e 6) que descrevem o ISC das misturas experimentais em função da percentagem em massa de solo (S), escória de aciaria elétrica redutora (E) e cinza volante (C). As superfícies de resposta apresentadas na Figura 10 representam graficamente a variação do ISC das misturas

experimentais analisadas em função da porcentagem em massa de cada componente na composição das misturas.

Tabela 10 - Coeficientes dos modelos matemáticos que melhor se ajustaram aos resultados do ISC.

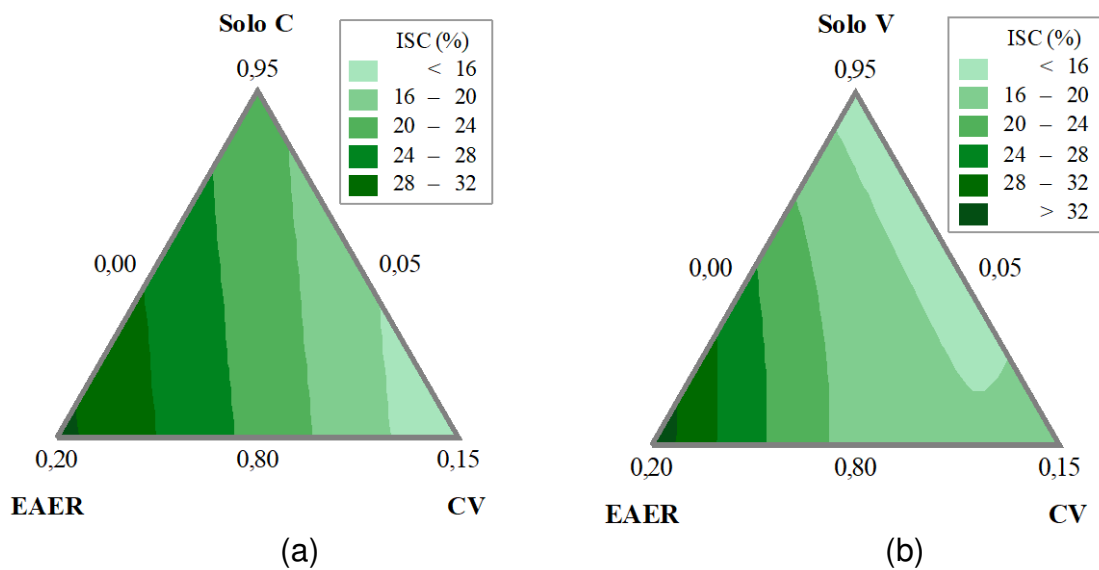
Solo	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{23}$	$\beta_{123}$	$R^2$
C	17,36	96,35	-41,44	-	-	-	-	77,92
V	7	145	92	-	-	-	-1583	99,87

Fonte: O Autor (2022)

$$ISC_C = 17,36S + 96,35E - 41,44C \quad \text{Equação 5}$$

$$ISC_V = 7S + 145E + 92C - 1583SEC \quad \text{Equação 6}$$

Figura 10 – Superfícies de resposta para o ISC das misturas experimentais: solo C (a); solo V (b)



Fonte: O Autor (2022)

Da superfície de resposta referente às misturas dosadas com amostras do solo C [Figura 10 (a)], verifica-se que os maiores valores de ISC se encontram no bordo inferior do diagrama, ou seja, na região em que as misturas experimentais apresentam, concomitantemente, maiores teores de EAER e menores teores de CV em sua composição. Essa constatação é um indício de que a adição de CV às misturas exerce pouca influência sobre os valores de ISC.

Esta hipótese é confirmada quando se avalia os coeficientes do modelo matemático de ajuste dos dados referentes às misturas dosadas com amostras de solo C. Conforme apresentado na Tabela 10, verifica-se que o coeficiente  $\beta_2$  é positivo, traduzindo a influência positiva do EAER no ISC das misturas experimentais se mantidas as outras variáveis constantes. De forma contrária, o coeficiente  $\beta_3$  apresentou valor negativo, indicando que a adição de CV tem impacto negativo no ISC das misturas experimentais.

Outro ponto importante de ser observado é que os coeficientes do modelo que expressaram a interação entre o solo C e EAER ( $\beta_{12}$ ), o solo C e CV ( $\beta_{13}$ ) e entre os três

componentes das misturas experimentais ( $\beta_{123}$ ) não apresentaram relevância estatística nessa análise, considerando o nível de significância de 95%. Embora três coeficientes do modelo cúbico especial proposto inicialmente não tenham apresentado relevância estatística, o modelo apresentado na Equação 5 apresentou  $R^2$  igual a 0,7792, demonstrando a boa correlação entre os dados analisados.

Quando avaliada a superfície de resposta obtida para as misturas dosadas com amostras de solo V [Figura 10 (b)], pôde-se verificar que as misturas que apresentaram maiores valores de ISC foram as localizadas na porção inferior esquerda, ou seja, na região correspondente às misturas com maiores teores de EAER e menores teores de CV em sua composição.

Diferentemente do observado para as misturas dosadas com amostras de solo C, ambos os coeficientes  $\beta_2$  e  $\beta_3$ , que mensuram, respectivamente, o impacto da adição de EAER e CV no ISC das misturas experimentais, são positivos e, conseqüentemente, indicam que tanto a adição de EAER quanto a de CV ao solo V impacta positivamente os valores de ISC das misturas experimentais, quando mantidas as demais variáveis constantes.

Do modelo matemático da Equação 6, ressalta-se que o coeficiente  $\beta_{123}$  apresentou relevância estatística quando considerado o nível de significância de 95%. Esse coeficiente mensura a interação entre os três componentes da mistura (solo V, EAER e CV) e, por apresentar valor negativo, indica que a combinação entre esses componentes tem impacto negativo no ISC das misturas experimentais dosadas com amostras de solo V. Os demais coeficientes do modelo representativo do ISC das misturas experimentais dosadas com amostras do solo V ( $\beta_{12}$ ,  $\beta_{13}$ ,  $\beta_{23}$ ), que representam, respectivamente, as interações entre solo-EAER, solo-CV e EAER-CV, não apresentaram relevância estatística quando considerado o nível de significância de 95%. Entretanto, o modelo proposto apresentou  $R^2$  igual a 0,9987, demonstrando a excelente correlação entre os dados.

#### **2.4.4. Resposta experimental, superfícies de resposta e modelos matemáticos da Expansão ISC das misturas experimentais**

A Tabela 11 apresenta os resultados das determinações da Expansão ISC das amostras de solos (M0) e das misturas experimentais (M1 a M7) dosadas com amostras dos solos C e V. Os resultados da Expansão ISC apresentados na Tabela 11 foram utilizados para a elaboração das superfícies de respostas apresentadas na Figura 11. As superfícies de respostas apresentadas nessa figura representam a variação da Expansão ISC das misturas experimentais em função da porcentagem de cada componente em sua composição. Os modelos matemáticos descritivos das

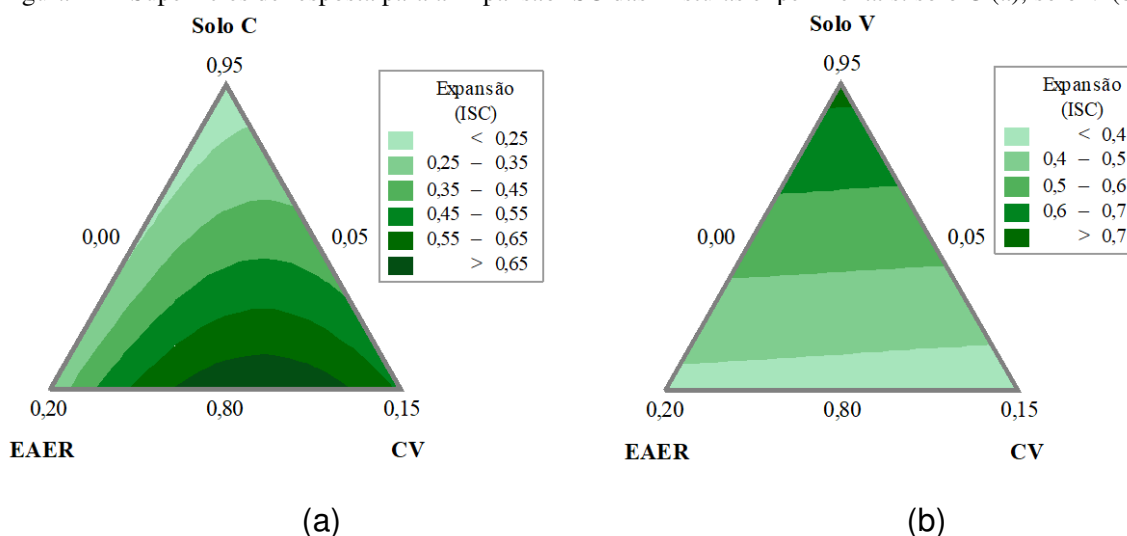
superfícies de respostas da Figura 11 são apresentados nas Equações 7 e 8, enquanto seus coeficientes constam na Tabela 12.

Tabela 11 - Expansão ISC (em %) dos solos e das misturas experimentais.

Misturas	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Solo C	0,7	0,2	0,3	0,3	0,8	0,5	0,5	0,4
Solo V	0,3	0,8	0,5	0,2	0,5	0,3	0,2	1,0

Fonte: O Autor (2022)

Figura 11 – Superfícies de resposta para a Expansão ISC das misturas experimentais: solo C (a); solo V (b)



Fonte: O Autor (2022)

Tabela 12 - Coeficientes dos modelos matemáticos que melhor se ajustaram aos resultados da Expansão ISC.

Solo	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{23}$	$\beta_{123}$	$R^2$
C	0,1697	0,6845	-0,3970	-	-	-	70,3849	90,63
V	0,849	-1,551	-1,737	-	-	-	-	22,81

Fonte: O Autor (2022)

$$\text{Expansão ISC}_C = 0,1697S + 0,6845E - 0,3970C + 70,3849 SEC \quad \text{Equação 7}$$

$$\text{Expansão ISC}_V = 0,849S - 1,551E - 1,737C \quad \text{Equação 8}$$

Para a superfície de resposta representativa da Expansão ISC das misturas dosadas com solo C [Figura 11(a)], observa-se que os maiores valores de expansão são verificados na porção inferior central do diagrama, região na qual as misturas apresentam os menores teores de solo e, conseqüentemente, maiores teores de EAER e CV em sua composição. O fato de os maiores valores de Expansão ISC terem sido verificados nessa região é um indicativo de que a combinação entre EAER e CV contribui para o aumento da expansão das misturas.

Essa hipótese é reforçada ao se avaliar os coeficientes da Equação 7. Dessa equação, observa-se que os coeficientes  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são opostos em sinal, indicando que maiores teores de EAER e CV nas misturas têm impactos contrários na expansão da mistura quando mantidas as

demais condições constantes. Embora tenham sinais opostos, esses coeficientes têm magnitudes que pouco interferem na expansão das misturas quando comparados com a influência exercida pela combinação entre os três componentes ( $\beta_{123}$ ) nessa propriedade. O fato do coeficiente  $\beta_{123}$  ser muito superior aos coeficientes  $\beta_1$  (0,1697),  $\beta_2$  (0,6845) e  $\beta_3$  (0,3970) indica que a interação entre os três componentes tem maior impacto na expansão das misturas dosadas com solo C e justifica o fato das maiores expansões terem sido verificadas numa região onde tem-se teores similares de EAER e CV na composição da mistura.

Para os resultados da Expansão ISC das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C, os dados experimentais da Expansão ISC resultaram em um modelo com bom coeficiente de ajuste de dados, com  $R^2$  igual a 0,9063. A boa correlação de ajuste de dados obtida na análise estatística permite inferir que não há interação estatisticamente relevante entre o solo C e a EAER e entre o solo C e a CV, visto que os coeficientes  $\beta_{12}$  e  $\beta_{13}$ , responsáveis por descrever essas relações, não apresentaram relevância significativa para o nível de significância adotado.

Quando avaliada a superfície de resposta da Expansão ISC das misturas dosadas com amostras de Solo V [Figura 11(b)], observa-se que os maiores valores se encontram na porção superior média do diagrama, na região que engloba misturas com menores teores de EAER e CV em sua composição. Esse comportamento também pode ser observado a partir da avaliação dos coeficientes do modelo descritivo da Expansão ISC dessas misturas, descrito na Equação 8 e Tabela 12. Desse modelo, tanto o coeficiente  $\beta_2$  quanto o  $\beta_3$ , que mensuram, respectivamente, o impacto da adição de EAER e CV na Expansão ISC das misturas experimentais, são negativos e, conseqüentemente, indicam que tanto a adição de EAER quanto a de CV ao solo V tendem a reduzir os valores de Expansão ISC das misturas, quando mantidas as demais variáveis constantes.

Os demais coeficientes do modelo representativo da Expansão ISC das misturas experimentais dosadas com amostras do solo V ( $\beta_{12}$ ,  $\beta_{13}$ ,  $\beta_{23}$ ) não apresentaram relevância estatística quando considerado o nível de significância de 95%, indicando que as interações entre solo-EAER, solo-CV e EAER-CV não foram significativas para alterações na Expansão ISC das misturas experimentais. Cabe destacar que, embora o modelo matemático apresentado na Equação 8 descreva a variação da Expansão ISC das misturas, este não apresentou boa correlação entre os dados, resultando em um  $R^2$  igual a 0,2281. Esse valor de  $R^2$  é baixo comparado aos demais valores de  $R^2$  obtidos nas análises desse estudo e não permite que a equação seja considerada representativa do comportamento da Expansão ISC das misturas

experimentais dosadas com amostras de Solo V, já que o modelo não tem respaldo estatístico. Assim, exclusivamente para esse solo, a Expansão ISC não será considerada como critério no processo de otimização da dosagem das misturas experimentais.

#### 2.4.5. Resposta experimental, superfícies de resposta e modelos matemáticos do Módulo de Resiliência das misturas experimentais

A Tabela 13 apresenta os coeficientes dos modelos de regressão representativos do MR das amostras de solos (M0) e das misturas experimentais (M1 a M7) dosadas com amostras dos solos C e V. A partir dos modelos de regressão supracitados, a Tabela 13 também apresenta os valores de MR de cada mistura estimados para as camadas de base, sub-base e de reforço de subleito, tomando-se como referência o estado de tensões atuante em cada camada estrutural do pavimento.

Tabela 13 - MR das amostras de solo e das misturas experimentais.

Mistura experimental	Coeficientes do Modelo				R <sup>2</sup>	MR estimado (MPa)		
	k1	k2	k3	Base <sup>1</sup>		Sub-Base <sup>2</sup>	Ref. Subleito <sup>3</sup>	
Solo C	M0	423,609	-0,016	-0,634	0,729	28,32	29,63	35,81
	M1	42,041	0,173	-0,139	0,685	29,57	26,49	29,43
	M2	64,314	0,237	-0,228	0,939	42,54	37,39	44,66
	M3	70,111	0,153	-0,160	0,732	54,97	50,95	57,79
	M4	45,12	0,139	-0,179	0,819	38,47	36,61	42,30
	M5	51,607	0,241	-0,160	0,728	29,72	25,01	28,10
	M6	34,038	0,096	-0,160	0,728	32,59	32,16	36,70
	M7	62,018	0,164	-0,151	0,751	46,02	41,92	47,12
Solo V	M0	146,541	0,563	-0,026	0,690	21,34	11,67	11,26
	M1	57,391	0,308	-0,249	0,731	30,76	25,31	30,57
	M2	158,408	0,305	0,129	0,921	42,92	28,50	24,61
	M3	311,022	0,401	0,246	0,972	48,57	27,14	20,90
	M4	107,273	0,356	-0,114	0,686	37,94	27,40	29,20
	M5	108,962	0,327	-0,017	0,938	35,71	25,18	24,70
	M6	89,001	0,294	-0,008	0,941	32,21	23,43	22,88
	M7	118,068	0,448	-0,253	0,729	39,02	27,59	32,95

1 – MR estimado para os pares de tensão  $\sigma_3 = 0,030$  MPa e  $\sigma_d = 0,160$  MPa; 2 – MR estimado para os pares de tensão  $\sigma_3 = 0,010$  MPa e  $\sigma_d = 0,090$  MPa; 3 – MR estimado para os pares de tensão  $\sigma_3 = 0,009$  MPa e  $\sigma_d = 0,037$  MPa.

Fonte: O Autor (2022)

Na Tabela 14 apresentam-se, para cada camada estrutural do pavimento, os coeficientes dos modelos matemáticos (Equações 9 a 14) que descrevem o MR das misturas experimentais em função da percentagem em massa de solo (S), escória de aciaria elétrica redutora (E) e cinza volante (C). Nessa mesma tabela também são apresentados os coeficientes de ajuste dos dados de cada modelo (R<sup>2</sup>).

Tabela 14 - Coeficientes do modelo de regressão polinomial ajustados aos resultados de MR estimados para as camadas estruturais de pavimentos.

Solo	Camada	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{23}$	$\beta_{123}$	R <sup>2</sup>
C	Base	24,51	175,66	14,46	-	-	-	-	0,8604
	Sub-Base	18,0	183,0	-1191,0	-	1499,0	-	-	0,9511
	Ref. Subleito	20,0	212,0	-1339,0	-	1682,0	-	-	0,9670
V	Base	26,48	136,75	39,60	-	-	-	-	0,8952
	Sub-Base	24,51	44,86	20,88	-	-	-	-	0,4980
	Ref. Subleito	32,70	-25,85	-89,64	-	-	1588,89	-	0,6700

Fonte: O Autor (2022)

$$MR_{C(\text{Base})} = 24,51 S + 175,66 E + 14,46 C \quad \text{Equação 9}$$

$$MR_{C(\text{Sub-Base})} = 18,00 S + 183,00 E - 1191,00 C + 1499 SC \quad \text{Equação 10}$$

$$MR_{C(\text{ref.subleito})} = 20,00 S + 212,0 E - 1339,00 C + 1682 SC \quad \text{Equação 11}$$

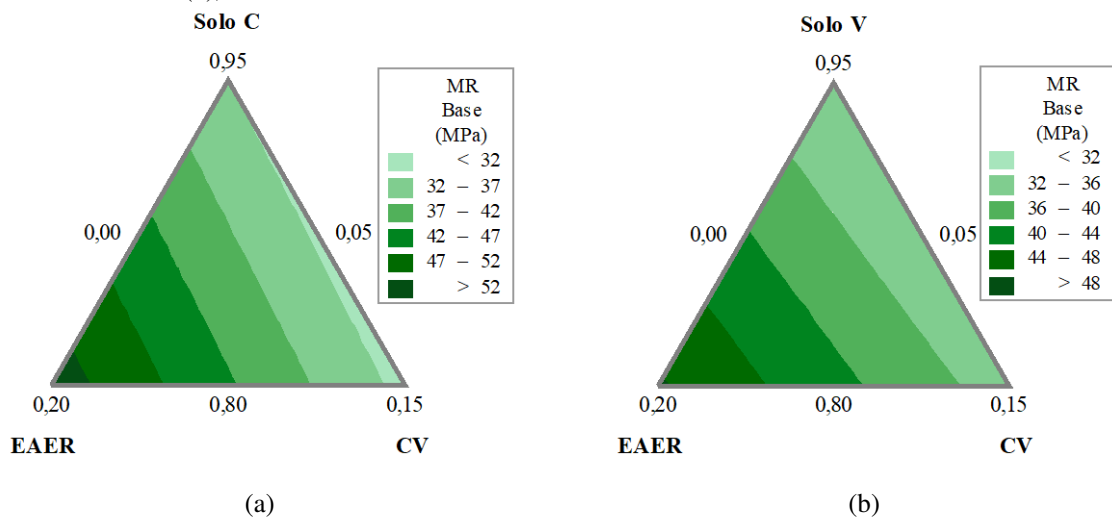
$$MR_{V(\text{Base})} = 26,48 S + 136,75 E + 39,60 C \quad \text{Equação 12}$$

$$MR_{V(\text{Sub-Base})} = 24,51 S + 44,86 E + 20,88 C \quad \text{Equação 13}$$

$$MR_{V(\text{ref.subleito})} = 32,70 S - 25,85 E - 89,64 C + 1588,89 EC \quad \text{Equação 14}$$

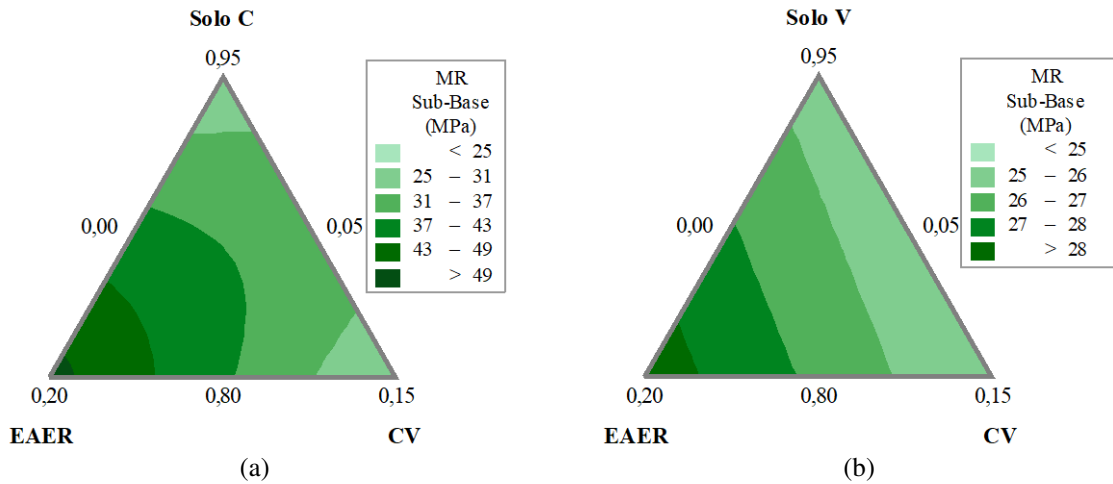
As superfícies de resposta apresentadas nas Figuras 12, 13 e 14 apresentam graficamente a variação do MR das misturas experimentais analisadas em função da percentagem em massa de cada componente na composição das misturas. A Figura 12 apresenta os valores de MR calculados tomando-se como referência o estado de tensões considerado para a camada de base de pavimentos flexíveis, enquanto a Figura 13 e a Figura 14 apresentam os valores de MR calculados com base nos estados de tensões atuantes em camadas de sub-base e de reforço de subleito, respectivamente.

Figura 12 - Superfícies de resposta para o MR das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C (a) e solo V (b), considerando-se o estado de tensões atuante no centro da camada de base.



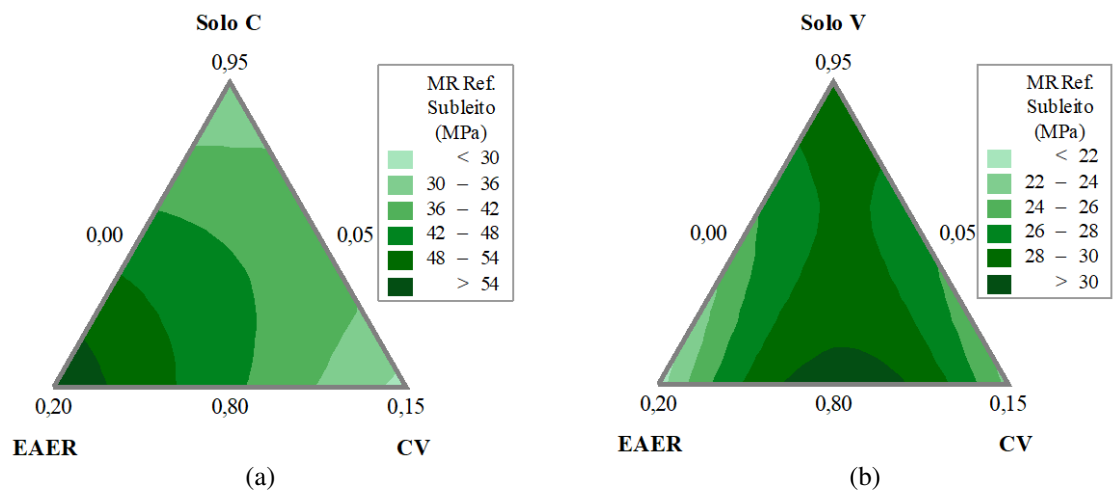
Fonte: O Autor (2022)

Figura 13 - Superfícies de resposta para o MR das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C (a) e solo V (b), considerando-se o estado de tensões atuante no centro da camada de sub-base.



Fonte: O Autor (2022)

Figura 14 - Superfícies de resposta para o MR das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C (a) e solo V (b), considerando-se o estado de tensões atuante no centro da camada de reforço de subleito.



Fonte: O Autor (2022)

Pela análise dos diagramas apresentados na Figura 12 (a), Figura 13 (a) e Figura 14 (a), verifica-se que as misturas dosadas com amostras de solo C que apresentaram os maiores valores de MR se concentram na porção inferior esquerda do diagrama, independentemente do estado de tensões considerado na determinação do MR. Essa região do diagrama corresponde à região onde o teor de EAER na composição das misturas é máximo. Essa constatação é um indicativo de que a EAER exerce maior influência positiva no MR das misturas experimentais quando comparada com a influência exercida pela CV nessa propriedade. Tal hipótese é reforçada a partir da avaliação dos coeficientes  $\beta_2$  e  $\beta_3$  das equações 9, 10 e 11. Nestas equações, os coeficientes  $\beta_2$  são positivos e os coeficientes  $\beta_3$  são negativos, indicando que a EAER exerce influência positiva no MR das misturas enquanto a CV, influência negativa.

Das equações 10 e 11 também foi possível constatar, através do coeficiente  $\beta_{13}$ , que a interação entre solo e CV contribui positivamente para o MR das misturas experimentais quando considerados os níveis de tensões atuantes em camadas de sub-base e reforço de subleito. Para o estado de tensões atuante em camadas de base, a interação entre solo e CV ( $\beta_{13}$ ) não tem influência significativa no MR das misturas experimentais.

Para todas os estados de tensões considerados nas determinações do MR, os demais coeficientes que expressam a interação entre solo e EAER ( $\beta_{12}$ ), EAER e CV ( $\beta_{23}$ ) e entre os três componentes das misturas experimentais ( $\beta_{123}$ ) não apresentaram relevância estatística considerando o nível de significância de 95%, indicando que a combinação entre esses componentes não tem impacto significativo no MR das misturas experimentais dosadas com amostra de solo C. Embora os coeficiente supracitados não tenham apresentado relevância estatística, os modelos apresentados nas equações 9, 10 e 11 apresentaram  $R^2$  superiores a 0,8604, demonstrando boa correlação entre os dados analisados.

Para as misturas dosadas com amostras de solos V, verificou-se que os maiores valores de MR correspondentes aos estados de tensões atuantes em camadas de base e sub-base concentram-se na porção inferior esquerda dos diagramas apresentados nas Figuras 12 (b) e 13 (b). Nessa região, o teor de EAER na mistura é máximo (20%) e o de CV, mínimo. Assim, presume-se que a EAER exerce maior influência no MR das misturas experimentais quando comparada à influência da CV nessa propriedade quando são considerados os estados de tensões atuantes na base e sub-base de pavimentos. Essa hipótese é reforçada através da avaliação dos coeficientes  $\beta_2$  e  $\beta_3$  das Equações 12 e 13. Uma vez que  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são positivos, estes exercem influência positiva no MR das misturas experimentais. Entretanto, como  $\beta_2$  é maior que  $\beta_3$ , fica constatado que a EAER exerce maior influência no MR das misturas experimentais.

Quando considerado o estado de tensões atuante na camada de reforço de subleito de pavimentos na determinação do MR, foi verificado, conforme apresentado na Figura 14 (b), que os maiores valores de MR se concentram na porção inferior central do diagrama. Nessa região, a mistura experimental é composta pelo teor mínimo de solo (80%) e por 12,5% de EAER e 7,5% de CV. Da equação 14, verifica-se que, para o estado de tensões atuante na camada de reforço de subleito, EAER e CV individualmente exercem influência negativa no MR das misturas, visto que os coeficientes  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são negativos. Entretanto, da Equação 14, verifica-se que a interação entre EAER e CV, representada pelo coeficiente  $\beta_{23}$ , influencia positivamente no MR das misturas experimentais, justificando o comportamento indicado no diagrama da Figura 14 (b).

Quanto aos coeficientes que expressam a interação entre solo V e EAER ( $\beta_{12}$ ), solo V e CV ( $\beta_{13}$ ) e entre os três componentes das misturas experimentais ( $\beta_{123}$ ), estes não apresentaram relevância estatística considerando-se o nível de significância de 95%, indicando que a combinação entre os componentes das misturas não tem impacto significativo no MR das misturas experimentais de ambos os solos. Quanto aos ajustes dos modelos descritivos do MR elaborados a partir dos dados observados, obteve-se boa correlação para os valores de MR estimados para o estado de tensões representativo da camada de base de pavimentos ( $R^2 = 0,8952$ ). Para os modelos descritivos do MR correspondentes aos estados de tensões representativos das camadas de sub-base e reforço de subleito, verificou-se uma piora na correlação dos dados ( $R^2=0,4980$  para sub-base e  $R^2 = 0,6700$  para reforço do subleito) quando comparado ao modelo obtido para o MR da camada de base. Mesmo após essa constatação, os modelos referentes às camadas de sub-base e reforço de subleito foram considerados representativos do comportamento do MR das misturas para a realização do processo de otimização.

#### 2.4.6. Avaliação da eficácia do método Simplex-Centroide

A avaliação da eficácia do método Simplex-Centroide na predição do comportamento mecânico de misturas entre solo-EAER-CV foi realizado a partir da análise entre os resultados obtidos de forma experimental e os resultados estimados a partir dos modelos matemáticos calculados nos itens anteriores. A Tabela 15 apresenta o resultado dessa avaliação para a RCS das misturas experimentais.

Tabela 15 – Avaliação da eficácia do método Simplex-Centroide na estimativa da RCS das misturas experimentais.

Mistura	Solo C			Solo V		
	Experimental	Modelo	Variação	Experimental	Modelo	Variação
M1	243,2	236,4	2,8%	117,2	123,9	-5,8%
M2	293,7	341,9	-16,4%	150,6	145,9	3,1%
M3	469,6	447,4	4,7%	165,5	167,9	-1,4%
M4	309,0	314,2	-1,7%	161,7	167,8	-3,8%
M5	377,2	391,8	-3,9%	166,4	167,7	-0,8%
M6	339,5	314,1	7,5%	148,5	145,8	1,8%
M7	322,0	311,7	3,2%	162,1	153,2	5,5%
	<b>Variação média</b>		<b>5,7%</b>	<b>Variação média</b>		<b>3,2%</b>

Fonte: O Autor (2022)

A partir da análise dos resultados de RCS (Tabela 15), verificou-se que, com exceção da mistura M2 dosada com o solo C, os valores de RCS das misturas experimentais estimados através dos modelos matemáticos convergiram com os resultados obtidos experimentalmente.

A variação entre os resultados estimados e observados em laboratório foi inferior a 10% para todas as misturas. Quanto à variação média dos resultados, esta é inferior a 5,7% para as misturas dosadas com ambos os solos, indicando que o método utilizado permite a estimativa eficiente da RCS de misturas compostas por diferentes teores de solo, EAER e CV em sua composição.

Quanto à predição do ISC das misturas experimentais (Tabela 16), o método se mostrou eficiente para as misturas dosadas com amostras de solo V. A eficiência do método vem da constatação de variações inferiores a 6% entre os valores de ISC estimados através do modelo matemático e o ISC obtido de forma experimental.

Já para as misturas dosadas com amostras de solo C, foram observadas variações da ordem de 20% para três misturas experimentais (M1, M4 e M7) e inferiores a 7% para as demais (M2, M3, M5 e M6). Acredita-se que as maiores variações observadas estejam relacionadas às variações inerentes ao processo de moldagem dos corpos de prova e à heterogeneidade dos materiais.

Embora tenham sido verificadas variações dessa grandeza (20%), a maioria das misturas dosadas com solo C apresentou variações da ordem de 7%, indicando que os modelos matemáticos são capazes de estimar o ISC de misturas de Solo-EAER-CV de forma eficiente.

Tabela 16 – Avaliação da eficácia do método Simplex-Centroide na estimativa do Índice de Suporte Califórnia (ISC) das misturas experimentais.

Mistura	ISC (%)					
	Solo C			Solo V		
	Experimental	Modelo	Variação	Experimental	Modelo	Variação
<b>M1</b>	17,8	21,3	-20,0%	14,1	13,9	1,4%
<b>M2</b>	29,0	27,2	6,0%	23,9	24,3	-1,5%
<b>M3</b>	32,6	33,2	-1,9%	34,8	34,6	0,6%
<b>M4</b>	18,2	22,8	-25,1%	18,6	18,8	-0,8%
<b>M5</b>	12,1	12,5	-3,2%	17,2	17,2	0,3%
<b>M6</b>	18,2	16,9	7,1%	14,9	15,1	-1,2%
<b>M7</b>	28,4	22,3	21,5%	18,7	18,3	2,0%
	<b>Variação média</b>		<b>12,1%</b>	<b>Variação média</b>		<b>1,1%</b>

Fonte: O Autor (2022)

Quanto à Expansão ISC das misturas experimentais, a partir dos resultados apresentados na Tabela 17, observou-se que o método não se mostrou tão eficiente na estimativa dessa propriedade, visto que a maioria das misturas experimentais dosadas com solo C apresentou variações superiores a 15% entre os resultados estimados pelos modelos matemáticos e os obtidos em laboratório. Já para a Expansão ISC das misturas dosadas com amostras de solo V, observaram-se variações superiores a 100% entre os resultados estimados pelo modelo e os

obtidos experimentalmente. Tais variações estão relacionadas à baixa correlação entre o modelo matemático estimado e os dados de laboratório que fomentaram a elaboração do modelo.

Tabela 17 – Avaliação da eficácia do método Simplex-Centroide na estimativa da Expansão ISC das misturas experimentais.

Mistura	EXPANSÃO ISC (%)					
	Solo C			Solo V		
	Experimental	Modelo	Variação	Experimental	Modelo	Variação
M1	0,2	0,2	-22,2%	0,8	0,7	2,8%
M2	0,3	0,2	16,4%	0,5	0,5	-3,6%
M3	0,3	0,3	-4,9%	0,2	0,4	-130,6%
M4	0,8	0,7	5,3%	0,5	0,4	26,0%
M5	0,5	0,5	-6,5%	0,3	0,3	-17,6%
M6	0,5	0,4	18,3%	0,2	0,5	-167,5%
M7	0,4	0,5	-23,0%	1,0	0,5	49,5%
	<b>Variação média</b>		<b>13,8%</b>	<b>Variação média</b>		<b>56,8%</b>

Fonte: O Autor (2022)

A avaliação dos valores de MR estimados através dos modelos matemáticos e os obtidos em laboratório (Tabela 18) permitiu verificar que a variação máxima entre esses dois valores de MR foi de 15% para as misturas dosadas com amostras de solo C e de 16,1% para as misturas dosadas com amostras de solo V. Embora tenham sido observadas variações dessa grandeza (15,0 a 16,1%), a variação média absoluta entre os valores de MR das misturas experimentais dosadas com ambos os solos ficou entre 2,8% e 6,7%, evidenciando a eficácia do método na predição do MR das misturas experimentais dosadas com solo, EAER e CV, independente da camada estrutural analisada.

Tabela 18 – Resultados do Módulo de Resiliência (MR) das misturas experimentais.

	MR (MPa) – Solo C								
	Base			Sub-base			Ref. subleito		
	Exp.	Modelo	Var.	Exp.	Modelo	Var.	Exp.	Modelo	Var.
M1	29,57	32,07	-8,4%	26,49	26,25	0,9%	29,43	29,60	-0,6%
M2	42,54	43,40	-2,0%	37,39	38,63	-3,3%	44,66	44,00	1,5%
M3	54,97	54,74	0,4%	50,95	51,00	-0,1%	57,79	58,40	-1,1%
M4	38,47	42,65	-10,9%	36,61	37,89	-3,5%	42,30	43,00	-1,6%
M5	29,72	30,56	-2,8%	25,01	24,78	0,9%	28,10	27,59	1,8%
M6	32,59	31,31	3,9%	32,16	33,95	-5,6%	36,70	38,06	-3,7%
M7	46,02	39,12	15,0%	41,92	37,76	9,9%	47,12	42,74	9,3%
	<b>Var. Média</b>		<b>6,2%</b>	<b>Var. Média</b>		<b>3,5%</b>	<b>Var. Média</b>		<b>2,8%</b>

	MR (MPa) – Solo V								
	Base			Sub-base			Ref. subleito		
	Exp.	Modelo	Var.	Exp.	Modelo	Var.	Exp.	Modelo	Var.
M1	30,76	32,0	-4,0%	25,31	25,53	-0,9%	30,57	29,77	2,6%
M2	42,92	40,3	6,2%	28,50	27,05	5,1%	24,61	25,38	-3,1%
M3	48,57	48,5	0,1%	27,14	28,58	-5,3%	20,90	20,99	-0,4%
M4	37,94	41,2	-8,7%	27,40	26,78	2,2%	29,20	31,10	-6,5%
M5	35,71	34,0	4,9%	25,18	24,98	0,8%	24,70	23,34	5,5%
M6	32,21	33,0	-2,4%	23,43	25,26	-7,8%	22,88	26,56	-16,1%
M7	39,02	38,2	2,2%	27,59	26,36	4,4%	32,95	28,67	13,0%
	<b>Var. Média</b>		<b>4,1%</b>	<b>Var. Média</b>		<b>3,8%</b>	<b>Var. Média</b>		<b>6,7%</b>

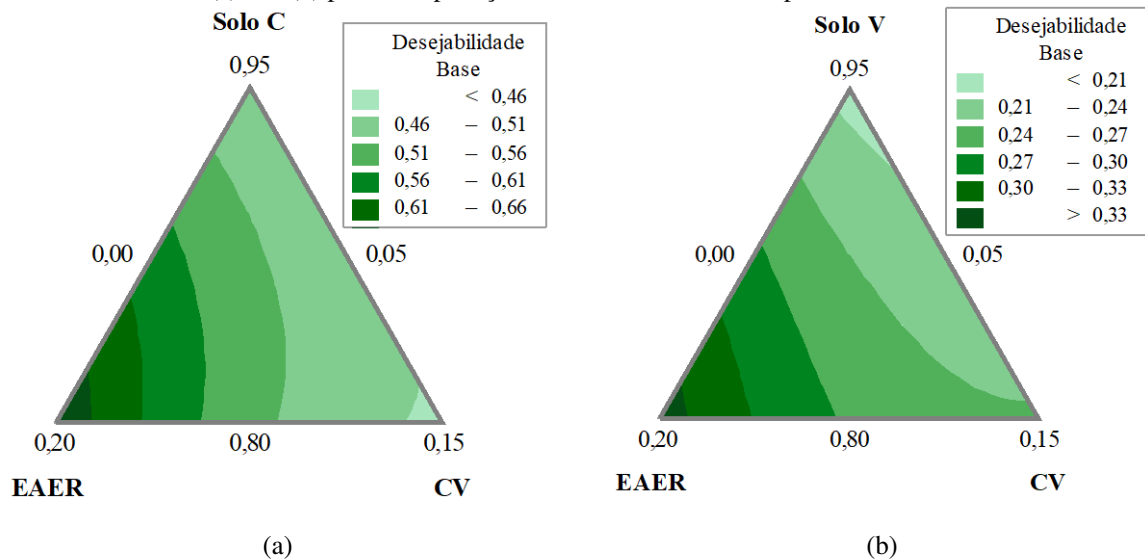
Fonte: O Autor (2022)

## 2.4.7. Otimização da dosagem das misturas

### 2.4.7.1. Otimização para aplicação em camadas de base de pavimentos asfálticos

As superfícies de resposta resultantes do processo de otimização das dosagens das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C e V, visando sua aplicação em camadas de base de pavimentos asfálticos, são apresentadas, respectivamente, nas Figura 15 (a) e (b). Durante o processo de otimização das misturas experimentais dosadas com amostras de solo V, optou-se por desconsiderar o critério de Expansão ISC para sua aplicação em camadas de base de pavimentos, visto que o modelo matemático representativo dessa propriedade apresentou baixo valor de  $R^2$ .

Figura 15 - Superfícies de resposta para a desejabilidade das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C (a) e V (b) para sua aplicação em camadas de base de pavimentos asfálticos.



Fonte: O Autor (2022)

Para as misturas dosadas com amostras de solo C e V, os maiores valores de desejabilidade foram obtidos para as misturas localizadas na região inferior esquerda do diagrama, cuja composição é dada por 80% de solo e 20% de EAER (M3). Para a mistura M3 dosada com amostra de solo C, obteve-se valor de desejabilidade da ordem de 0,66, enquanto para a mesma mistura dosada com amostra de solo V, o valor de desejabilidade obtido é da ordem de 0,33.

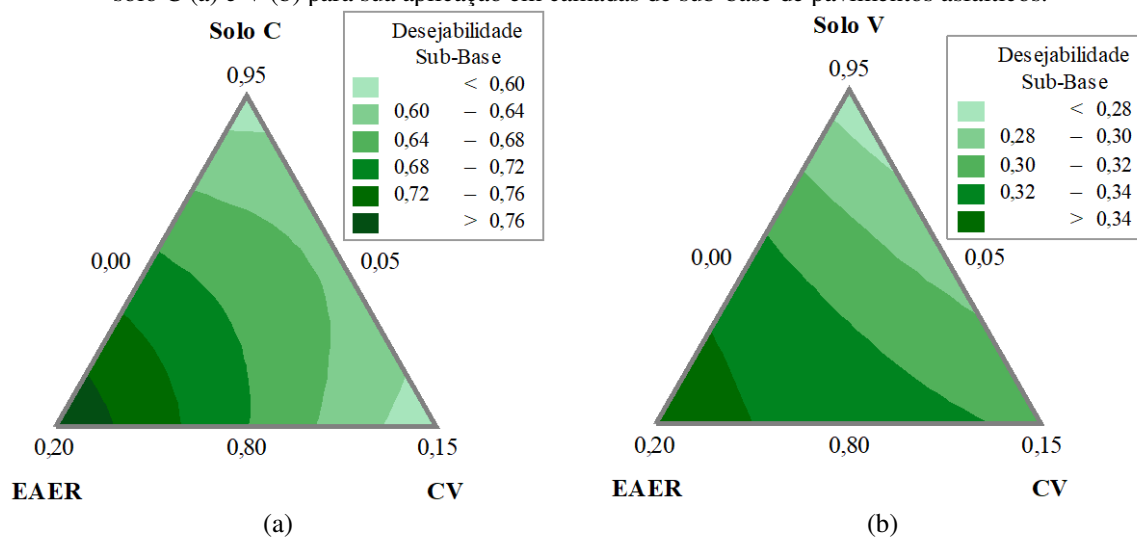
Como apresentaram maior valor de desejabilidade dentre as misturas avaliadas, as misturas M3 dosadas com cada amostra de solo foram as que mais se aproximaram, concomitantemente, dos valores limites de RCS, ISC, Expansão ISC e MR definidos anteriormente e, portanto, podem ser consideradas as misturas cujas dosagens foram otimizadas para ambos os solos. Salienta-se, porém, que embora essas misturas sejam as melhores dentre

as avaliadas para cada solo, os valores de desejabilidade verificados, inferiores a 1,0, indicam que elas não atendem concomitantemente a todos os critérios técnicos adotados que viabilizam sua utilização em camadas de base de pavimentos.

#### 2.4.7.2. Otimização para aplicação em camadas de sub-base de pavimentos asfálticos

As superfícies de resposta resultantes do processo de otimização das dosagens das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C e V, visando sua aplicação em camadas de sub-base de pavimentos asfálticos, são apresentadas na Figura 16.

Figura 16 - Superfícies de resposta para a desejabilidade das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C (a) e V (b) para sua aplicação em camadas de sub-base de pavimentos asfálticos.



Fonte: O Autor (2022)

Para as misturas experimentais dosadas com amostras do solo C [Figura 16 (a)] e de solo V [Figura 16 (b)], observou-se que os valores de desejabilidade das misturas aumentam em direção ao bordo inferior esquerdo, de forma que as misturas M3 dosadas com cada amostra de solo foram as que apresentaram maiores valores de desejabilidade entre as misturas analisadas. Diante dessa constatação, as misturas M3 dosadas com amostras de solo C e solo V, que apresentaram valores de desejabilidade iguais a 0,795 e 0,347, respectivamente, podem ser consideradas as misturas cujas dosagens foram otimizadas visto que estas foram as que mais se aproximaram de atender aos critérios definidos na avaliação da aplicabilidade das misturas como materiais de construção de camadas de sub-base de pavimentos.

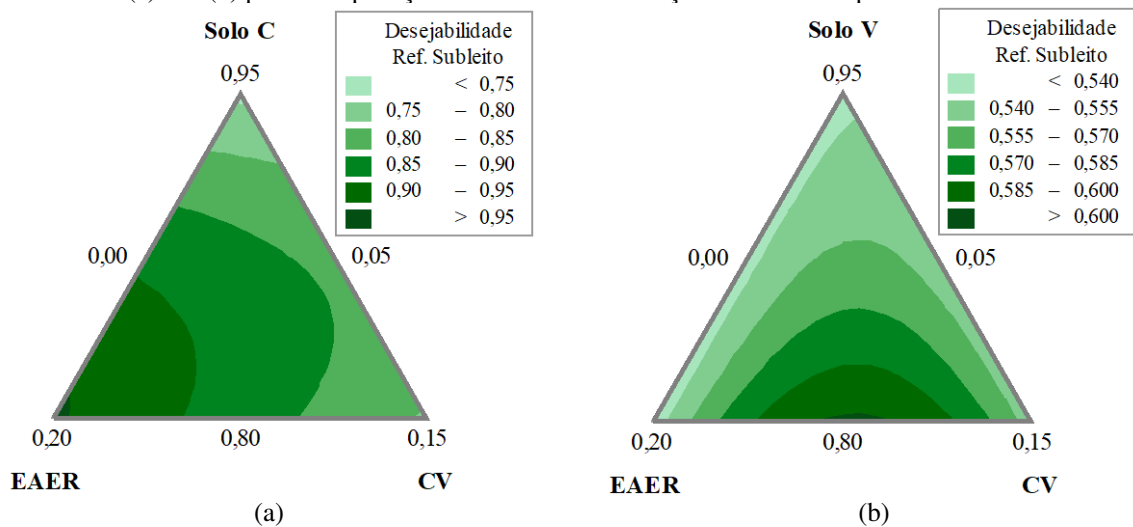
As misturas otimizadas dosadas com amostras de cada solo não atenderam simultaneamente a todos os critérios que viabilizam sua utilização em camadas de sub-base de pavimentos, uma vez que apresentaram valores de desejabilidade inferiores a 1,0. Embora tenham apresentado valores de desejabilidade inferiores a 1,0, algumas misturas experimentais

atendem aos critérios de ISC e Expansão ISC definidos por DNIT (2006) para sua aplicação em camadas de sub-base de pavimentos, contribuindo para que se obtenha maiores valores de desejabilidade. Entretanto, os valores de RCS e MR das misturas experimentais otimizadas são inferiores aos requisitos mínimos considerados, o que acarreta valores de desejabilidade inferiores a 1,0.

### 2.4.7.3. Otimização para aplicação em camadas de reforço de subleito de pavimentos asfálticos

As superfícies de resposta resultantes do processo de otimização das dosagens das misturas experimentais dosadas com amostras de solo C e V, visando sua aplicação em camadas de reforço de subleito de pavimentos asfálticos, são apresentadas, respectivamente, na Figura 17 (a) e (b).

Figura 17 - Superfícies de resposta para a desejabilidade das misturas experimentais dosadas com amostras de Solo C (a) e V (b) para sua aplicação em camadas de reforço de subleito de pavimentos asfálticos.



Fonte: O Autor (2022)

Para as misturas experimentais dosadas com amostras de solo C [Figura 17 (a)], foram obtidos maiores valores de desejabilidade conforme o aumento do teor de EAER e a redução do teor de CV na composição das misturas experimentais. A mistura com maior valor de desejabilidade (0,960) foi a M3, o que permite considerá-la, dentro das misturas analisadas, como a mistura cuja dosagem é otimizada. Essa consideração é feita diante do fato dessa mistura atender simultaneamente, e quase em sua totalidade, aos critérios adotados para sua utilização em camadas de reforço do subleito.

Para as misturas experimentais dosadas com amostras de solo V [Figura 17 (b)], o valor de desejabilidade aumenta em direção ao bordo inferior central do diagrama, de forma que a

mistura M4 foi a que apresentou maior valor de desejabilidade, com valor igual a 0,603. Assim, essa mistura foi a que mais se aproximou dos valores mínimos estabelecidos e, portanto, consiste na mistura dosada com amostra de solo V cuja dosagem foi otimizada.

## 2.5. Conclusões

As principais conclusões acerca desse estudo foram:

- A adição de escória de aciaria elétrica redutora moída (EAER) e de cinza volante (CV) em diferentes proporções aos solos investigados melhorou a Resistência à Compressão Simples (RCS), o Índice de Suporte Califórnia (ISC) e o Módulo de Resiliência (MR) e pouco interferiu na Expansão ISC destes materiais compactados na energia Proctor Normal. Essas constatações indicam o potencial da EAER e da CV como agentes estabilizantes químicos de solos lateríticos quando dosados de forma adequada;
- Os modelos matemáticos que melhor representaram as variações das propriedades avaliadas em função do teor de cada material na composição das misturas apresentaram  $R^2$  entre 0,760 e 0,998. Esses valores de  $R^2$  evidenciam o potencial do método Simplex-Centroide na descrição do comportamento mecânico de misturas solo-escória de aciaria elétrica redutora-cinza volante;
- Quanto à eficácia do método Simplex Centroide na predição da Expansão ISC das misturas experimentais, o modelo matemático obtido para as misturas dosadas com solo C apresentou bom coeficiente de correlação entre os dados ( $R^2 = 0,9063$ ), descrevendo de forma consistente o comportamento observado em laboratório. Já o modelo matemático obtido para as amostras dosadas com solo V não apresentou um bom ajuste de dados ( $R^2 = 0,2281$ ), resultando em maiores variações entre os valores estimados pelos modelos matemáticos e os valores obtidos em laboratório;
- As baixas variações médias entre os valores de RCS, ISC e MR estimados através dos modelos matemáticos resultantes do processo de otimização e os valores obtidos em laboratório reforçam a eficácia do método Simplex-Centroide na descrição destas propriedades em função da composição das misturas experimentais;
- Para as misturas dosadas com amostras de solo C, o teor de EAER na mistura exerce maior influência no ISC e no MR das misturas quando comparado com a influência exercida pelo teor de CV nessas propriedades. Quanto à RCS das misturas dosadas com solo C, o teor de CV exerceu maior influência em seu incremento, porém a

combinação entre EAER e CV teve impacto negativo sobre essa propriedade, indicando que a CV contribui negativamente para a melhoria das propriedades avaliadas (RCS, ISC, Expansão ISC e MR) das misturas;

- Para as amostras dosadas com amostras do solo V, a EAER e a CV influenciam positivamente e em mesmo grau na RCS das misturas. Para o MR das misturas dosadas com solo V, também se verificou que ambos os coprodutos contribuem positivamente para o incremento do MR das misturas, entretanto a influência da EAER é maior quando comparada com a da CV nessa propriedade. Quanto ao ISC das misturas dosadas com o solo V, foi observado que essa propriedade é influenciada principalmente pelo teor de EAER na sua composição, mas a interação entre EAER e CV tende a reduzir o ISC das misturas;
- O método Simplex-Centroide se mostrou eficiente para promover a otimização das dosagens de misturas SEC, independentemente do tipo de solo analisado nesse estudo. Dentro dos critérios estabelecidos através do processo de otimização, pôde-se obter as dosagens de misturas SEC que mais se aproximaram dos valores limites definidos nas análises, indicando, assim, a composição da mistura que tende a apresentar o melhor desempenho quando utilizada como material de construção de diferentes camadas estruturais de pavimentos asfálticos.
- Para as particularidades desse estudo, as misturas experimentais otimizadas para ambos os solos apresentaram valores de desejabilidade inferiores a 1,0, indicando que as mesmas não foram capazes de atender simultaneamente a todos os valores limites estabelecidos para as propriedades de referência adotadas (RCS, ISC, Expansão ISC e MR). Supõe-se que a adoção de uma energia de compactação mais elevada que a adotada na pesquisa (Proctor Normal) seja capaz de conduzir o índice de desejabilidade das misturas otimizadas para o valor unitário, considerando-se todos os critérios adotados no processo de otimização;

### Referências Bibliográficas

ADEGOLOYE, G.; BEAUCOUR, A. L.; ORTOLA, S.; NOUMOWE, A. Mineralogical composition of EAF slag and stabilised AOD slag aggregates and dimensional stability of slag aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 171-178, 2016. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.036>

AKINWUMI, I. Soil Modification by the Application of Steel Slag (R<sup>7</sup> periodica polytechnica ci creative commons attribution). **Periodica Polytechnica Civ. Eng.**, v.58 (4), p. 371–377, 2014.

ALDEEKY, H. & HATTAMLEH, O. A. Experimental Study on the Utilization of Fine Steel Slag on Stabilizing High Plastic Subgrade Soil. **Hindawi Advances in Civil Engineering**, v.2017, 11p, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9230279>

ALINEZHAD, M.; SAHAF, A. Investigation of the fatigue characteristics of warm stone matrix asphalt (WSMA) containing electric arc furnace (EAF) steel slag as coarse aggregate and Sasobit as warm mix additive. **Case Studies in Construction Materials**, v.11, e00265, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00265>

ALTHEMAN, D.; FERREIRA, G. C.; MONTINI, M.; GALLO, J. B.; ROCHA; A. I. B. C. Evaluation of coal fly ash in cementitious matrices. **Ibracon structures and materials journal**, v. 10, n. 6, p. 1320-1337, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000600009>

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 220-66 – “Standard Method of Test for Determination of the Strength of Soil-Lime Mixtures”, 13p, 1996.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Guide for the Local Calibration of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. Washington, D.C. (2010)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2487-17e1. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshocken, PA, 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO M145-91. Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. AASHTO, Washington, DC, 2017.

ANASTASIOU, E. K.; PAPAYIANNI, I.; PAPACHRISTOFOROU, M. Behavior of self-compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement. **Materials and Design**, v. 59, p. 454-460, 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.030>.

ARDAH, A.; CHEN, Q. & ABU-FARSAKH, M. Evaluating the performance of very weak subgrade soils treated/stabilized with cementitious materials for sustainable pavements. **Transportation Geotechnics**, v. 11, p. 107-119, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.05.002>

ASHANGO, A. A.; PATRA, N. R. Behavior of Expansive Soil Treated with Steel Slag, Rice Husk Ash, and Lime. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 28-7, 06016008, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001547

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 18 – Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012a, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT 5753. Cimento Portland - Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6457. Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a, 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, 2016d, 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6459. Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016e, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7180. Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016f, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181. Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 12p, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182. Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016g, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9895. Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016h, 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004, 21p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11579 – MB-3432. Cimento Portland – determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012a. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11589/2017 - Preparação, padronização e estocagem de soluções para análises químicas. Rio de Janeiro, 2017, 25p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12023/2012 - Solo-cimento — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012b, 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12025 – MB 3361. Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2012c, 2p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12653. Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992a, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12770. Solo coesivo – determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992b, 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, 2017, 4p.

AUTELITANO, F.; GIULIANI, F. Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 280-289, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.054>

BIN-SHAFIQUE, S.; RAHMAN, K.; YAYKIRAN, M.; AZFAR, I. The long-term performance of two fly ash stabilized fine-grained soil subbases. **Resources, Conservation and Recycling**, v.54, n.10, p.666-672, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.007>

BISKRI, Y.; ACHOURA, D.; CHELGHOUM, N.; MOURET, M. Mechanical and durability characteristics of High-Performance Concrete containing steel slag and crystalized slag as aggregates. **Construction and Building Materials**, v.150, p.167-178, 2017.

CORONADO, M.; SEGADÃES, A. M.; ANDRÉS, A. Combining mixture design of experiments with phase diagrams in the evaluation of structural ceramics containing foundry by-products. **Applied Clay Science**, v. 101, p. 390–400, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER–CLA259/96. Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996b. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER–ME 256/94. Solos compactados em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 1994c. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER–ME 258/94. Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro, 1994b. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – PRO 003/94. Coleta de Amostras Deformadas de Solos. Rio de Janeiro, 1994a. 12p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – PRO 199/96. Redução de amostra de campo de agregado para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996a, 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Pavimentação. 3.ed. Rio de Janeiro, 2006, 274p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 134/2018 – ME. Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018a, 11p.

DIAS, A. C.; FONTESA, M. P. F.; REIS, C. BELLATOB, S. F.; FENDORF, S. Simplex-Centroid mixture design applied to arsenic (V) removal from waters using synthetic minerals. **Journal of Environmental Management**, v.238, p. 92-101, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.099>

DINIZ, D.H.; CARVALHO, J. M. F.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Blast oxygen furnace slag as chemical soil stabilizer for use in roads. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.29, n.9, 7p., 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001969.

GU, X.; YU, B.; DONG, Q.; DENG, Y. Application of secondary steel slag in subgrade: Performance evaluation and enhancement. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 102-108, 2018.

GUPTA, T.; SACHDEVA, S. N. Laboratory investigation and modeling of concrete pavements containing AOD steel slag. **Cement and Concrete Research**, v. 124, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105808>

FRANCO, F. A. C. P. AEMC – Método de cálculo de tensões e deformações. Versão 2.4.1, jan. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1.5> Acesso em: 18 dez.2021.

HE, P.; ZHANG, B.; LU, J.; POON, C. S. A ternary optimization of alkali-activated cement mortars incorporating glass powder, slag and calcium aluminate cement. **Construction and Building Materials**, v.240, 117983, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117983>

HUANG, Y. H. Pavement Analysis and Desing. Sencond Edition, Pearson Educatoin INC. 2004.

IACOBESCU, R. I.; PONTIKES, Y.; KOUMPOURI, D.; ANGELOPOULOS, G.N. Synthesis, characterization and properties of calcium ferroaluminate belite cements produced with electric arc furnace steel slag as raw material. **Cement & Concrete Composites**, v. 44, p. 1-8, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.08.002>

INSTITUTO AÇO BRASIL - IAB. Relatório de Sustentabilidade. Rio de Janeiro - RJ: Instituto Aço Brasil. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>, 2018. Acesso em: 03 de agosto de 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 13320. Particle size analysis — Laser diffraction methods. Comitê: ISO/TC 24 Sieves, sieving and other sizing methods, 59p., 2020.

ISMAIL, A. I. M.; AWAD, S. A.; MWAFY, M. A. G. The utilization of Electric Arc Furnace Slag in Soil Improvement. **Geotech. Geol. Eng.**, v. 37, p.401-411, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0619-3>

ISLAM, M. R. e TAREFDER, R. A. Pavement Desing. Materials, Analysis, and Highways. McGraw Hill, 2020.

IWANSKI, M.; BUCZYNSKI, P.; MAZUREK, G. Optimization of the road binder used in the base layer in the roadconstruction. **Construction and Building Materials**, v.125, p. 1044-1054, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.112>

JHA, A. K. E SIVAPULLAIAH, P.V. Mechanism of improvement in the strength and volume change behaviorof lime stabilized soil. **Engineering Geology**, V. 198, P. 53-64, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.08.020>

JIAO, D.; SHI, C.; YUAN, Q.; AN, X.; LIU, Y. Mixture design of concrete using simplex centroid design method. **Cement and Concrete Composite**, v.89, p.76-88, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.001>

KAMBOLE, C.; PAIGE-GREEN, P; KUPOLATE, W. K.; NDAMBUKI, J. M.; ADEBOJE, A. O. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. **Construction and Building Materials**, v.148, p.618-631, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.036>

LAM, M. N.; JARITNGAM, S.; LE, D. Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v.154, 482-495, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.240>

LI, P., LIN, C., CHENG, H., DUAN, X., LEI, K.. Contamination and health risks of soil heavy metals around a lead/zinc smelter in southwestern China. **Ecotoxicol. Environ. Saf.** 113, 391–399, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.025>.

LIU, C.; STARCHER, R.D. Effects of curing conditions on unconfined compressive strength of Cement- and Cement-Fiber-Improved Soils. **J. Mater. Civ. Eng.**, 25(8): 1134-1141, 2013.

LOPES, M. M. S.; ALVARENGA, R. C. S. S.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L.; CARVALHO, A. F.; CARDOSO, F. P.; MENDES, B. C. Influence of the incorporation of granite waste on the hiding power and abrasion resistance of soil pigment-based paints. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 463-474, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.046>

LU, S., WANG, Y., TENG, Y., YU, X. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils near a zinc-lead mining area in Hunan. **Environ. Monit. Assess.** 187 (627), 1–12, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-015-4835-5>

LUXÁN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J.. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, 19 (1): 63–68, 1989.

MAGHOOL, F.; ARULRAJAH, A.; DU, Y.; HORPIBULSUK, S.; CHINKULKIJNIWAT, S. Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials. **Clean Techn Environ Policy**, v. 19, p. 949–958, 2017. DOI 10.1007/s10098-016-1289-6

MAHEDI, M.; CETIN, B.; DAYIOGLU, A. Y. Effect of cement incorporation on the leaching characteristics of elements from fly ash and slag treated soils. **Journal of Environmental Management**, v. 253, 12 p., 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109720>

MAHVASH, S.; LÓPEZ-QUEROL, S.; BAHADORI-JAHROMI, A. Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization. **Heliyon**, v. 3, n. 3, p. e00274, 2017.

MANSO, J. M.; ORTEGA-LOPEZ, V.; POLANCO, J. A.; SETIÉN, J. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 126–134, 2013.

MARINHO, A. L. B.; SANTOS, C.M.M.; CARVALHO, J.M.F.; MENDES, J.C.; BRIGOLINI, G.J.; PEIXOTO R. A. F. Ladle Furnace Slag as Binder for Cement-Based Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 11, p. 04017207, 2017.

MEDEIROS, V. S. C.; PEDROTI, L. G.; MENDES, B. C. M.; PITANGA, H. N.; SILVA, T. O. Study of mixtures using simplex design for the addition of chamotte in clay bricks. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 16, p. 2349–2361, 2019. DOI: 10.1111/ijac.13346.

MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, J. C. L.; VIEIRA, C. M. F.; PACHECO, A.A.; AZEVEDO, A. R. G. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. **Construction and Building Materials**, v.227, 116669, 2019.

MONTEIRO, R.R.; SABIONI, A. C. S.; DA COSTA, G.M. Preparação de mulita a partir do mineral topázio. **Cerâmica**, 50 (316), 2004. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132004000400006>

MONTENEGRO, J. M.; CELEMÍN-MATACHANA, M.; CAÑIZAL, J.; SETIÉN, J. Ladle furnace slag in the construction of embankments: Expansive behavior. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 8, p. 972–979, 2013.

MOZEJKO, C. A.; FRANCISCA, F. M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. **Construction and Building Materials**, v, 239, 10 p. , 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117901>.

NEGA, A.; NIKRAZ, H. Evaluation of Tire-Pavement Contact Stress Distribution of Pavement Response and Some Effects on the Flexible Pavements. **International Conference on Highway Pavements and Airfield Technology 2017**, p. 174-185, 2017.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. How to do experiments: research and development in science and industry, second ed., Campinas, Sp, 2003.

NOGAMI, J.S., VILLIBOR, D.F. Identificação tecnológica de solos pela metodologia MCT. **6º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia de Fundações**. Salvador,. Anais., p.242-256, 1990.

ONYELOWE, K.; ALANEME, G.; IGBOAYAKA, C.; ORJI, F.; UGWUANYI, H.; VAN, D. B.; VAN, M. N. Scheffe optimization of swelling, California bearing ratio, compressive strength, and durability potentials of quarry dust stabilized soft clay soil. **Materials Science for Energy Technologies**, v.2, p.67-77, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.10.005>

ORTEGA-LÓPEZ, V.; MANSO, J. M.; CUESTA, I. I.; GONZÁLEZ, J. J. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 455–464, 2014.

OZDEMIR, M. A. Improvement in Bearing Capacity of a Soft Soil by Addition of Fly Ash. **Procedia Engineering**, v. 143, n. Ictg, p. 498–505, 2016.

PAPAYIANNI, I.; ANASTASIOU, E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, p. 400-407, 2012. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.015

PASETTO, M.; BALDO, N. Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3458–3468, 2011.

PASETTO, M; BALDO, N. Experimental analysis of hydraulically bound mixtures made with waste foundry sand and steel slag. **Materials and Structures**, v. 48, p. 2489-2503, 2015. DOI 10.1617/s11527-014-0333-4

PHUMMIPHAN, I.; HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; ARULRAJAH, A.; SHEN, S-L.; CHINDAPRASIRT, P. High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material. **Journal of Hazardous Materials**, v. 341, p. 257–267, 2018.

PENTEADO, C. S. G.; EVANGELISTA, B. L.; FERREIRA, G. C. dos S.; BORGES, P. H. A.; LINTZ, R. C. C. Use of electric arc furnace slag for producing concrete paving blocks. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 21-32, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000200305>.

PEZO, Z. R., CLAROS, G., HUDSON, W. R. & STOKE, K. H. Development of a reliable resilient modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design. Center for Transportation Research, 1992.

PITANGA, H. N.; SILVA, T. O.; SANTOS, A. L.; SILVA, A. C. B.; LIMA, D. C. Classificação MCT de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante compactadas visando a aplicação em estradas florestais. **Revista Arvore**, v. 40, n. 5, p. 911–919, 2016.

POH, H.; GHATAORA, G. S.; GHAZIREH, N. Soil stabilization using basic oxygen steelslag fines. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.18, p. 229-240, 2006. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561).

SANTAMARÍA, A.; GONZÁLEZ, J. J.; LOSÁÑEZ, M. M.; SKAF, M.; ORTEGA-LOPEZ, V. The design of self-compacting structural mortar containing steelmaking slags as aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 111, 103627, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103627>

SANTOS, A. L.; PITANGA, H. N.; SILVA, A. C. B.; SILVA, T. O. Caracterização do comportamento mecânico de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante visando a aplicação em obras de pavimentação. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, p. 16–29, 2018.

SCHEFFE, H. The Simplex-Centroid design for experiments with mixtures. **Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)**, v. 25, n. 2, p. 235-263, 1963.

SHALABI, F. I.; ASI, I. M.; QASRAWI, H. Y. Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 29, n. 4, p. 394–399, 2017.

SHI, C. Steel slag - Its production, processing, characteristics, and cementitious properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 230–236, 2004.

SHI, Z.; SHI, C.; ZHAO, R.; WANG, D.; HE, F. Factorial Design Method for Designing Ternary Composite Cements to Mitigate ASR Expansion. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.28 (9), 6p. 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001568

SKAF, M.; ORTEGA-LÓPEZ, V.; FUENTE-ALONSO, J. A.; SANTAMARÍA, A.; MANSO, J. M. Ladle furnace slag in asphalt mixes. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 488-495, 2016.

SOL-SÁNCHEZ, M; CASTRO, J.; UREÑA, C. G.; AZAÑÓN, J. M. Stabilisation of clayey and marly soils using industrial wastes: pH and laser granulometry indicators. **Engineering Geology**, v.200, p.10-17, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.11.008>

SOUZA, A. T.; CALDAS, R. B.; LUDVIG, P.; SANTOS; W. J. The effects of mixture's components on the mechanical properties and durability indicators of mixed mortar using simplex network method. **Construction and Building Materials**, v. 249, 118840, 2020.

TASTAN, E. O.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H.; AYDILEK, A. H. Stabilization of Organic Soils with Fly Ash. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 137, nº 9, p. 819-833, 2011. Doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000502.

UNAL S., YUCEL O., KURT M., GUL S. Iron-steel slag from waste to product. **Advanced technologies workshop**, 255–267, 2014.

VASSILEVA, S.V.; MENENDEZ, R.; ALVAREZ, D.; DIAZ-SOMOANOB, M.. Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. Characterization of feed coals and fly ashes. **Fuel**, 82:1793-1811, 2003.

WANG, G. Determination of the expansion force of coarse steel slag aggregate. **Construction and Building Materials**, v.24, p. 1961–1966, 2010.

WANG, G.; WANG, Y.; GAO, Z. Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. **Journal of Hazardous Materials**, v. 184, n. 1–3, p. 555–560, 2010.

WU, M.; ZHANG, Y.; LIU, WU, Z.; YANG, Y.; SUN, W. Experimental study on the performance of lime-based low carbon cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v.168, p.780-793, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.156>

WU, J.; LIU, Q.; DENG, Y.; YU, X.; FENG, Q. YAN. C. Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways. **Soils and Foundations**, v.59, p. 955–965, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.03.009>

YI, H.; XU, G.; CHENG, H.; WANG, J.; WAN, Y.; CHEN, H. An Overview of Utilization of Steel Slag. **Procedia Environmental Sciences**, v. 16, p. 791–801, 2012.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Experimental evaluation of EAF ladle steel slag as a geo-fill material: Mineralogical, physical & mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 23–33, 2017.

YOOBANPOT, N., JAMSAWANG, P., POORAHONG, H., JONGPRADIST, P. & LIKITLERSUANG, S. Multiscale laboratory investigation of the mechanical and microstructural properties of dredged sediments stabilized with cement and fly ash. **Engineering Geology**, 267, 105491, 2020.

YONG-FENG, D.; TONG-WEI, Z.; YU, Z.; QIAN-WEN, L.; QIONG, W. Mechanical behaviour and microstructure of steelslag-based composite and its application for softclay stabilisation. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 16p., 2017. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1357787>

ZHANG, N.; WU, L.; XIAOMING, L.; ZHANG, Y. Structural characteristics and cementitious behavior of basic oxygen furnace slag mud and electric arc furnace slag. **Construction and Building Materials**, 210:11-18, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.156>

### **CAPÍTULO 3: Efeito da carbonatação acelerada nas propriedades mecânicas e de expansibilidade de misturas de solo-escória de aciaria elétrica redutora**

#### **RESUMO**

A busca por materiais de construção alternativos aos convencionalmente utilizados e que sejam técnica, ambiental e economicamente viáveis é um desafio atual para engenheiros e pesquisadores. Nesse contexto, as escórias de aciaria elétrica redutora (EAER) surgem como um material alternativo para promover a estabilização química de solos em obras de pavimentação. Entretanto, o potencial técnico da EAER nesta aplicação ainda é questionado devido às variações dos parâmetros mecânicos e de expansibilidade dos produtos resultantes de misturas entre solos e EAER. Uma técnica capaz de avaliar o comportamento mecânico e de expansibilidade de misturas solo-EAER ao longo do tempo é a carbonatação acelerada. Assim, esse estudo avaliou o efeito da carbonatação acelerada na Resistência à Compressão Simples (RCS), Módulo de Resiliência (MR), Índice Mini-CBR (M-CBR), e Expansão Mini-CBR (EM-CBR)] de misturas solo-EAER compactadas. Tais propriedades foram determinadas após submeter os corpos de prova a três procedimentos de cura distintos: (i) em câmara úmida; (ii) em câmara de carbonatação; e (iii) cura da EAER na câmara de carbonatação antes da moldagem dos corpos de prova. Os resultados indicaram que a submissão dos corpos de prova à carbonatação acelerada promoveu melhorias significativas na RCS, M-CBR e MR, além de reduzir a E-CBR das misturas, quando comparada aos demais procedimentos de cura. As análises dos resultados de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura e Difração de Raios-X realizados em amostras dos corpos de prova submetidos aos diferentes procedimentos de cura permitiram identificar a hidratação de compostos cimentícios e a formação de compostos carbonatados nas misturas carbonatadas, presumindo-se que estes sejam os responsáveis pela melhoria das propriedades mecânicas e de expansibilidade verificada durante a caracterização das misturas. O estudo permitiu compreender os mecanismos relacionados à carbonatação da EAER e de suas misturas com solos lateríticos, além de evidenciar o potencial técnico da utilização de EAER como agente estabilizante químico de solos na construção de pavimentos.

**Palavras-chave:** Carbonatação acelerada; Escória de aciaria elétrica redutora; estabilização de solos; solos lateríticos

## **Accelerated carbonation impact on mechanical and expansion properties of soil-ladle furnace slags mixtures**

### **ABSTRACT**

The seek for economically, environmentally and technically suitable alternative construction materials in substitution of those conventionally utilized consist of a challenge for engineers and researchers. In this context, ladle steel slags (LFS) rise as an alternative material in soil stabilization applications in highway engineering. However, its potential as chemical soil stabilizer remains under concern regarding the mechanical properties' variability of soil-LFS mixtures, and the volumetric instability of LFS. A promising technique able to improve mechanical and expansion properties of soil-LFS mixtures is the acceleration carbonation curing. Therefore, this study evaluated the effects of accelerated carbonation curing on the Unconfined Compressive Strength (UCS), Resilient Modulus (RM), Mini-California Bearing Ratio index (M-CBR), and expansion Mini-CBR (EM-CBR) of compacted soil-LFS mixtures. The aforementioned properties were analyzed after submitting the specimens under three distinct curing procedures: (i) humid chamber; (ii) carbonation chamber; and (iii) LFS carbonation in carbonation chamber prior the compaction of the specimens. The results indicates that accelerated carbonation significantly improve the UCS, M-CBR and RM of soil-LFS mixtures and reduce mixture expansion when compared to the other curing procedures. Scanning electronic microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) analysis performed with specimen samples submitted under each curing procedure, allowed the identification of hydrated cementitious compounds and the formation of carbonated products inside the specimens, which were responsible for improving mixture mechanical behavior, and reducing its expansion. This study contributed to enlightening the mechanisms regarding the carbonation of soil-LFS mixtures, in addition to highlighting the technical suitability of LFS as soil stabilizer and the accelerated carbonation technique in pavement engineering.

**Keywords:** Accelerated carbonation; ladle Furnace Slags; Soil stabilization; lateritic soil.

### 3.1. Introdução

Segundo a World Steel Association (2020), o Brasil ocupa hoje a nona posição no ranking mundial de produção de aço, com produção anual estimada em 32,2 milhões de toneladas. O grande volume de aço produzido gera, conseqüentemente, grandes volumes de resíduos e coprodutos, como as escórias de aciaria. Atualmente, estima-se que aproximadamente 150 kg de escória são gerados a cada tonelada de aço cru produzido. Ainda que parte da quantidade total de escória produzida seja reutilizada em aplicações relacionadas à engenharia civil, por exemplo, na produção de concretos asfálticos, na produção de cimento e concretos convencionais, na construção de aterros e na estabilização de solos (YILDIRIM e PREZZI, 2009), grandes volumes desses materiais continuam sendo dispostos em aterros ou em pátios de estocagem, ocupando e degradando grandes áreas, bem como aumentando o risco de contaminação do meio físico em decorrência da lixiviação de metais pesados eventualmente presentes nesse material (ZHANG e HONG, 2011; O'CONNOR *et al.*, 2021).

Da produção do aço podem ser gerados diversos tipos de escórias, de modo que fatores como tipo de forno utilizado, tipo de aço a ser produzido, matéria prima utilizada, temperatura dos fornos, taxa de resfriamento da escória, entre outros, vão interferir diretamente na composição química e nas propriedades físicas e mecânicas das escórias geradas (YILDIRIM e PREZZI, 2017; DHOBLE e AHMED, 2018). Dentre os diversos tipos de escórias, destacam-se as Escórias de Aciaria Elétrica Redutoras (EAER). Esse tipo de escória é formado durante o refino secundário do aço em fornos elétricos, processo no qual são retiradas impurezas da liga metálica em produção através da injeção de fluxos de oxigênio e outros elementos químicos à liga metálica (YILDIRIM e PREZZI, 2017; YANG *et al.*, 2018).

Embora apresentem composição química variável em função das particularidades em que são geradas, é comum encontrar na composição química das EAER diversos compostos, tais como silicato dicálcico (em diferentes fases cristalinas), aluminatos de cálcio, cal livre (cal, portlandita) e MgO livre (periclásio) (MANSO *et al.*, 2013). Tais compostos conferem ao material certas propriedades cimentícias, favorecendo a formação de compostos cimentados quando em contato com a água, o que torna esse material interessante do ponto de vista técnico em diversas aplicações, tais como em técnicas relacionadas à estabilização de solos para fins de construção de obras geotécnicas e de pavimentação (PAPAYIANNI e ANASTASIOU, 2012; IACOBESCU *et al.*, 2013; MANSO *et al.*, 2013; ANDREAS, DIENER e LAGERKVIST, 2014; ASHANGO e PATRA, 2016).

Entretanto, um eventual fator limitante para a aplicação da escória de aciaria elétrica redutora em larga escala principalmente na engenharia rodoviária está relacionado à

instabilidade volumétrica ocasionada pela presença de compostos químicos expansivos, como CaO e MgO (PASSETO e BALDO, 2015). Esses compostos são encontrados em grandes teores nas EAER e, quando em contato com a água, dão origem a novos compostos químicos de maior volume, aumentando a expansibilidade do material, podendo causar impacto deletério quando aplicado em camadas estruturais de pavimentos (WANG, 2010; PASSETO e BALDO, 2015; AUTELITANO e GIULIANI, 2016).

Uma forma de se controlar o problema de expansão das EAER é promover a carbonatação dos compostos expansivos presentes nesse material. A carbonatação consiste, dentre outras reações, na reação do óxido de cálcio e de magnésio com o CO<sub>2</sub> disponível no meio para a formação de produtos carbonatados estáveis (MAHOUTIAN, GHOULEH e SHAO, 2014; SIRIWARDENA e PEEYTHAMPARAN, 2015; YADAV e MEHRA, 2017; SONG *et al.*, 2021). A carbonatação pode, ainda, promover mudanças significativas na microestrutura deste material, provocando a redução da porosidade, a redistribuição dos poros da matriz sólida e a melhoria de suas propriedades mecânicas (MORANDEAU, THIÉRYA e DANGLA, 2014; GHOULEH *et al.*, 2015; WANG, CHANG e ANSARI, 2019). Além das vantagens supracitadas, o processo de carbonatação também provoca a redução do pH dos produtos, mitigando os problemas relacionados à lixiviação de metais pesados, e consiste numa alternativa para promover o sequestro de carbono e a consequente redução de gases de efeito estufa, visto que nesse processo pode-se consumir grandes quantidades de CO<sub>2</sub> que seriam liberadas na atmosfera (van ZOMEREN *et al.*, 2011; QUAGHEBEUR *et al.*, 2015; PAN *et al.*, 2017; MAYES *et al.*, 2018).

Qualquer material que esteja exposto ao CO<sub>2</sub> presente na atmosfera está submetido ao processo de carbonatação que naturalmente ocorre em baixíssimas velocidades (DENELEE *et al.*, 2021). Uma técnica capaz de acelerar o processo de carbonatação de materiais e avaliar, em curto prazo o impacto da carbonatação nas propriedades mecânicas do material em longo prazo, é a carbonatação acelerada (SUER *et al.*, 2009; GURTUBAY *et al.*, 2014). Particularmente para as escórias de aciaria, tal técnica consiste em submeter esse material a altas concentrações de CO<sub>2</sub> durante um determinado período, para que os íons de cálcio (Ca) e magnésio (Mg), bem como outros compostos, como portlandita, Ca(OH)<sub>2</sub> e Mg(OH)<sub>2</sub>, possam reagir com o CO<sub>2</sub> disponível no meio para formar produtos carbonatados estáveis (MAHOUTIAN, GHOULEH e SHAO, 2014; SIRIWARDENA e PEEYTHAMPARAN, 2015; YADAV e MEHRA, 2017; SONG *et al.*, 2021).

Na literatura técnica, constam alguns estudos de laboratório que evidenciam a eficácia da técnica de carbonatação acelerada como forma de melhorar as propriedades mecânicas de

amostras de escórias (BACIOCCHI *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2013; KO, CHEN e JIAN, 2015; WANG, CHANG e ANSARI, 2019), enquanto outros estudos, focam na avaliação de alterações microestruturais de escórias submetidas à carbonatação (HOU *et al.*, 2021). Entretanto, grande parte dos estudos encontrados na literatura técnica aborda o estudo de tipos de escórias mais frequentes, como a escória primária BOF (KO, CHEN e JIAN, 2015; WANG, CHANG e ANSARI, 2019), deixando uma lacuna na literatura técnica quanto ao impacto da carbonatação nas propriedades mecânicas, físicas, de expansibilidade e alterações microestruturais das EAER. Essa lacuna na literatura técnica se torna ainda maior quando se considera o estudo dos efeitos da carbonatação sobre as propriedades mecânicas dos produtos da mistura entre EAER e solos lateríticos, com o objetivo de estabilizar quimicamente solos de baixa capacidade de suporte.

Diante do exposto, o objetivo principal dessa pesquisa consiste em avaliar o efeito da carbonatação em longo prazo na Resistência à Compressão Simples (RCS), Módulo de Resiliência (MR), Índice Mini-CBR (M-CBR) e Expansão Mini-CBR (EM-CBR) de misturas entre solos tropicais e EAER, submetidas a diferentes procedimentos de cura que envolvem a aplicação da técnica de carbonatação acelerada. Essa abordagem visa compreender os mecanismos relacionados à carbonatação da EAER e de suas misturas com solos, e analisar, em longo prazo, o desempenho da EAER como material alternativo na construção de pavimentos, particularmente como agente estabilizante químico de solos tropicais, culminando em vantagens do ponto de vista ambiental e econômicos relacionados à reutilização desse material.

### **3.2. Materiais**

Nesse estudo, as amostras de solos utilizadas foram as mesmas amostras utilizadas no estudo apresentado no Capítulo 2. As amostras de solos tiveram suas denominações mantidas (solos C e V) e os resultados de suas caracterizações físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais são apresentados no item 2.2.

Quanto à amostra escória de aciaria elétrica redutora (EAER) utilizada nesse estudo, esta também foi a mesma utilizada durante a elaboração do estudo apresentado no Capítulo 2 desse documento. Os resultados de sua caracterização física, química, mineralógica e microestrutural também são apresentados no item 2.2.

### 3.3. Métodos

#### 3.3.1. Definição da mistura de referência

Para esse estudo, a dosagem de referência para as misturas entre amostras de solos (C e V) e EAER foi de 80% de solo e 20% de EAER em relação à massa seca total da mistura. Essa dosagem foi definida com base nos resultados do programa experimental apresentados no Capítulo 2 dessa dissertação. Como exposto no referido capítulo, após a realização da caracterização geomecânica das misturas experimentais, verificou-se que a mistura composta por 80% de solo e 20% de EAER em relação à massa seca total da mistura, para ambos os solos considerados, foi a dosagem que resultou em maiores valores de desejabilidade. Cabe ressaltar também que o teor de 20% de EAER na composição da mistura com solos ainda é compatível com os teores de EAER considerados por Montenegro *et al.* (2013), Aldeeky e Hattamleh (2017) e Ismail, Awad e Mwafy (2019) em seus estudos que abordaram a estabilização de solos através de sua mistura com EAER.

#### 3.3.2. Caracterizações mecânica e de expansibilidade das misturas

As propriedades mecânicas avaliadas nesse estudo foram a Resistência à Compressão Simples (RCS), o Módulo de Resiliência (MR) e o índice Mini-CBR (M-CBR), enquanto o parâmetro de expansibilidade avaliado nesse estudo foi o índice de Expansão Mini-CBR (EM-CBR). A Tabela 19 apresenta a relação dos ensaios de laboratório realizados e suas respectivas normas técnicas consultadas em cada determinação.

Tabela 19 – Ralação dos ensaios de laboratório realizados e suas respectivas normas técnicas de referência.

Ensaio	Norma Técnica Utilizada
Resistência à Compressão Simples	NBR 12025 (ABNT, 2012b)
Módulo de Resiliência	ME 134 (DNIT, 2018)
Índice Mini-CBR (M-CBR)	ME 254 (DNIT, 1997)
Expansão Mini-CBR (EM-CBR)	

Fonte: O Autor (2022)

Os corpos de prova destinados à realização dos ensaios supracitados foram moldados no ponto ótimo da curva de compactação Proctor normal. Para as determinações da RCS e do MR, foram utilizados corpos de prova com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Tais dimensões atendem aos requisitos da norma técnica D5102 (ASTM, 2009) e são similares às dimensões dos corpos de prova utilizados nos estudos de Hossen *et al.* (2022), Xu *et al.* (2022), Deneele *et al.* (2021) e Li *et al.* (2021). Os corpos de prova destinados à determinação dos índices M-CBR e EM-CBR das misturas foram moldados seguindo as prescrições da norma técnica ME 228 (DNIT, 1994). Os valores de RCS, M-CBR e EM-CBR das misturas foram

calculados a partir da média aritmética dos resultados obtidos a partir da testagem de 3 corpos de prova, respeitando-se o coeficiente de variação de 10% em relação à média das determinações.

A metodologia adotada nesse estudo para a determinação do modelo de regressão dos dados de MR das misturas foi a mesma adotada para a determinação do MR das misturas experimentais M0 a M7 referentes ao estudo desenvolvido no Capítulo 2 (ver item 2.3.2).

Após a determinação do modelo de regressão de dados para as misturas, os valores de MR das misturas correspondentes a cada camada estrutural de pavimento (base, sub-base e reforço do subleito) foram estimados a partir das tensões confinante ( $\sigma_3$ ) e desviatória ( $\sigma_d$ ) apresentados na Tabela 4 do capítulo 2 (ver item 2.3.2).

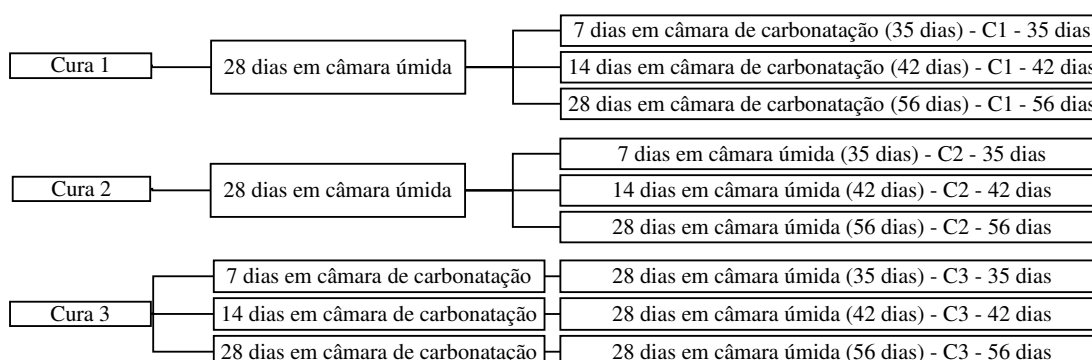
### 3.3.3. Procedimentos de cura

Buscando avaliar o efeito da carbonatação acelerada sobre os parâmetros RCS, MR, M-CBR e EM-CBR das misturas de solos com EAER, foram adotados os três procedimentos de cura descritos a seguir e ilustrados na Figura 18:

- Cura 1: Os corpos de prova foram submetidos a 28 dias de cura selada em câmara úmida e, após esse período, os mesmos foram submetidos ao processo de carbonatação durante 7, 14 e 28 dias antes da ruptura. Esse procedimento visa simular, em um curto espaço de tempo, o processo natural de carbonatação que ocorre em materiais expostos às intempéries climáticas. Embora não exista uma técnica consolidada que permita a execução da carbonatação acelerada através de  $\text{CO}_2$  na forma gasosa de grandes volumes de materiais compactados em campo, esse procedimento pode ser reproduzido com soluções aquosas na qual é dissolvido  $\text{CO}_2$ ;
- Cura 2: Inicialmente, os corpos de prova foram submetidos a 28 dias de cura selada em câmara úmida. Após esse período, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida por 7, 14 e 28 dias adicionais, totalizando 35, 42 e 56 dias de cura selada em câmara úmida antes da ruptura. Esse procedimento visa simular o procedimento convencional de cura sobre o qual camadas de pavimentos são submetidas após sua compactação;
- Cura 3: Antes da moldagem dos corpos de prova, amostras de EAER foram submetidas ao processo de carbonatação acelerada. Ao completar 7, 14 e 28 dias de carbonatação, as amostras de EAER foram retiradas da câmara de carbonatação

e utilizadas na moldagem dos corpos de prova. Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos à cura selada em câmara úmida durante 28 dias antes da sua ruptura, totalizando 35, 42 e 56 dias de cura. Esse procedimento visa simular a carbonatação da EAER ainda nos pátios de estocagem, antes de seu transporte ao local da obra, o que reduziria a quantidade de material a ser submetida à carbonatação e aumentaria o controle do processo.

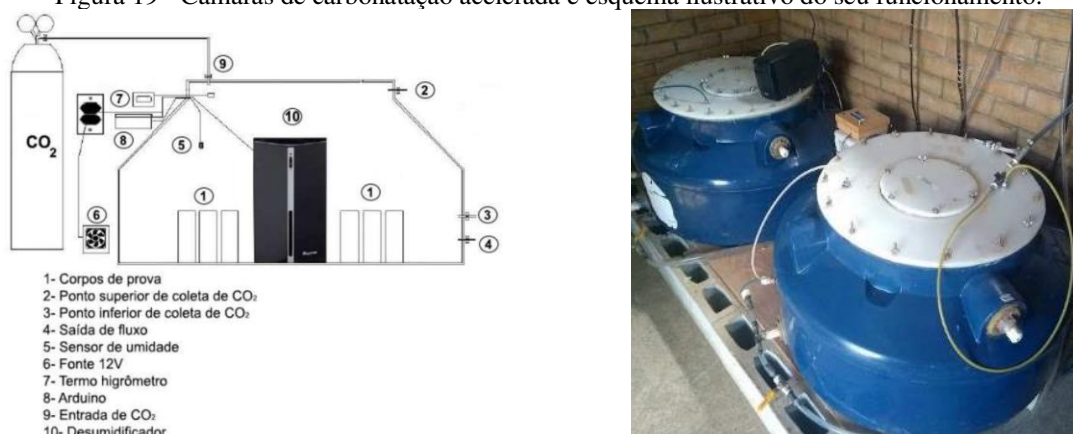
Figura 18 - Esquema ilustrativo dos procedimentos de cura adotados no estudo.



Fonte: O Autor (2022)

A Figura 19 apresenta a câmara de carbonatação utilizada para promover a carbonatação acelerada dos corpos de prova e da EAER durante a realização dos procedimentos de cura 1 e 3. A câmara de carbonatação utilizada foi desenvolvida no estudo de Martins *et al.* (2018) e utilizada em outros estudos (CASTELLOTE *et al.*, 2004; KIRCHHEIM *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2019).

Figura 19 - Câmaras de carbonatação acelerada e esquema ilustrativo do seu funcionamento.



Fonte: Martins *et al.* (2018)

As câmaras são hermeticamente vedadas e permitem o controle da saturação de CO<sub>2</sub> dentro do sistema através de fluxos de CO<sub>2</sub>. A temperatura e a umidade relativa do ar dentro

das câmaras são controladas através de um sistema *Arduíno*. Nesse estudo, a saturação de CO<sub>2</sub> dentro das câmaras foi mantida em 100%, enquanto a temperatura e a umidade relativa do ar variaram dentro das faixas de 20 e 25°C e 65 e 80%, respectivamente.

Como forma de avaliar se o tempo de cura interfere significativa na RCS, M-CBR e EM-CBR dos corpos de prova submetidos aos três procedimentos de cura, foi realizado o teste t entre médias de amostras independentes. As referidas análises estatísticas, foram realizadas tomando-se como referência as seguintes hipóteses: (i) Ho: as médias não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância de 95%; (ii) Ha: as médias são estatisticamente diferentes entre si ao nível de significância de 95%.

### **3.3.4. Análises mineralógicas e microestruturais dos produtos**

Para avaliar eventuais alterações na composição mineralógica e na microestrutura das amostras decorrentes dos três procedimentos de cura adotados, amostras dos corpos de prova foram coletadas logo após sua ruptura para a realização de ensaios de Difração de Raios-X (DRX) e de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A realização desses ensaios teve por objetivo identificar a formação de novos compostos carbonatados e investigar os mecanismos associados à carbonatação das misturas solo-EAER que justifiquem os resultados obtidos a partir da caracterização mecânica e de expansibilidade. Para tanto, foram escolhidos, para a realização das análises de DRX e MEV, os corpos de prova submetidos a 35 e 56 dias de cada procedimento de cura. A definição dessas idades de cura para a realização dessas análises foi baseada no fato de que a taxa de carbonatação é maior nas primeiras idades, sofrendo redução com o tempo de carbonatação (WANG, CHANG E ANSARI, 2019; SONG *et al.*, 2021).

## **3.4. Resultados e Discussão**

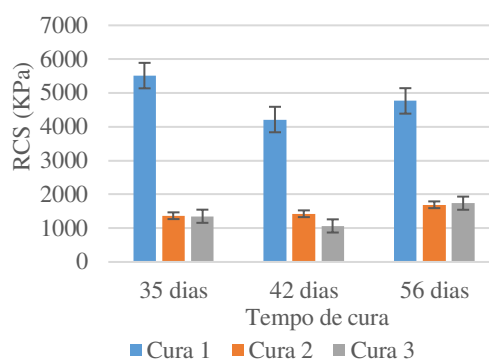
### **3.4.1. Misturas dosadas com amostras de solo C**

Os resultados provenientes dos ensaios de laboratório direcionados para promover as caracterizações mecânica e de expansibilidade das misturas solo-EAER dosadas com amostras de solo C são apresentadas no item 3.4.1.1. Já os resultados das análises de mineralógicas e microestruturais realizadas para a compreensão das observações experimentais referentes às misturas dosadas com amostras de solo C são apresentados no item 3.4.1.2

### 3.4.1.1. Caracterizações mecânica e de expansibilidade das misturas dosadas com amostras de solo C

Na Figura 20 são apresentados os resultados de Resistência à Compressão Simples (RCS) dos corpos de prova das misturas solo-EAER dosadas com amostras de solo C e submetidos aos três procedimentos de cura adotados nesse estudo.

Figura 20 – RCS das misturas solo-EAER dosadas com amostras de solo C e submetidas aos três procedimentos de cura adotados.



Fonte: O Autor (2022)

Dos resultados apresentados na Figura 20 observou-se que o processo de carbonatação acelerada (Cura 1) resultou em valores de RCS em até 407% superiores quando comparado à RCS dos corpos de prova submetidos aos demais procedimentos de cura (Cura 2 e Cura 3). Quanto aos demais procedimentos de cura avaliados, verificou-se que os corpos de prova submetidos ao procedimento de cura 2 apresentaram valores de RCS próximos dos valores encontrados para os corpos de prova submetidos ao processo de cura 3, independentemente do tempo de cura analisado.

Ao se avaliar a evolução da RCS dos corpos de prova submetidos ao procedimento de cura 1 ao longo do período considerado, verificou-se que a RCS após 28 dias de carbonatação é aproximadamente 10% inferior ao verificado para os corpos de prova submetidos a 7 dias de carbonatação. A análise estatística realizada (Tabela 20) demonstra que a redução da RCS ao longo do tempo é estatisticamente significativa, o que permite inferir que o aumento do tempo de exposição do corpo de prova à carbonatação tem impactos deletérios na RCS do material. Os motivos relacionados ao comportamento verificado experimentalmente são discutidos no item 3.4.1.2 com o auxílio das análises mineralógicas e microestruturais das amostras coletadas dos corpos de prova ensaiados.

Outra constatação feita a partir dos resultados apresentados na Figura 20 consiste na verificação de que a RCS dos corpos de prova submetidos aos procedimentos de cura 2 e 3 aumenta conforme o aumento do tempo de exposição dos corpos de provas aos seus respectivos

tratamentos. O acréscimo da RCS ao longo do tempo é estatisticamente significativo, indicando que a RCS dos corpos de prova tende a aumentar com o aumento do tempo de cura.

Tabela 20 – Resultado da análise estatística realizada sobre os valores médios de RCS dos corpos de prova dosados com amostras de solo C.

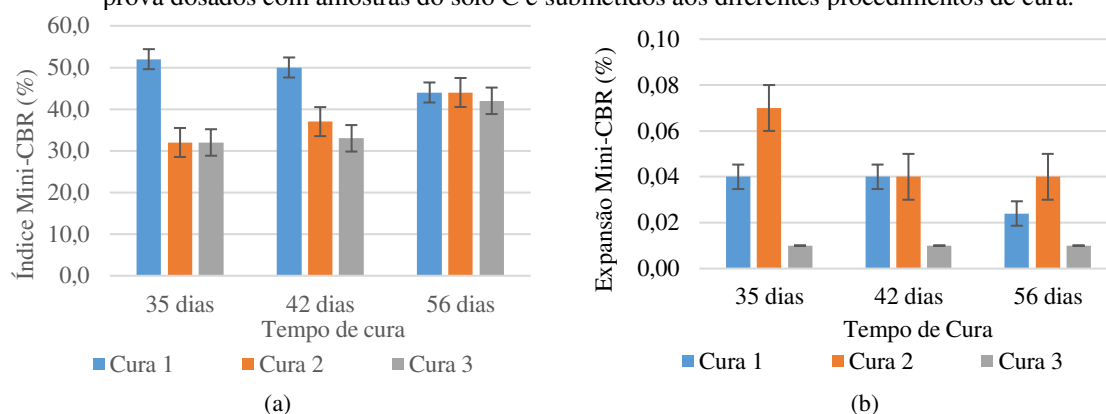
Procedimento de Cura	RCS médio 35 dias (kPa)	RCS médio 56 dias (kPa)	t-valor	p-valor	Decisão
1	5513,44	4764,10	4,4724	0,01105	Rejeita-se H0
2	1367,05	1691,51	-5,3302	0,00596	Rejeita-se H0
3	1351,84	1738,52	-3,4890	0,02515	Rejeita-se H0

Fonte: O Autor (2022)

Quanto aos resultados do Índice Mini-CBR (M-CBR) e da Expansão Mini-CBR (EM-CBR) dos corpos de prova das misturas solo-EAER dosadas com amostra de solo C e submetidos aos três procedimentos de cura, estes são apresentados na Figura 21 (a) e (b) respectivamente.

Quanto ao Índice Mini-CBR (M-CBR) dos corpos de prova dosados com amostras de solo C [Figura 21 (a)], verificou-se que o procedimento de cura 1 resultou em maiores valores de M-CBR comparativamente aos demais procedimentos de cura considerados, principalmente aos 35 dias de cura, tendendo a valores similares aos obtidos para os procedimentos de cura 2 e 3 aos 56 dias. Essa constatação indica que ao longo do tempo, os tratamentos tendem a resultar em corpos de prova com M-CBR equivalentes entre si.

Figura 21 – Resultados das determinações do (a) Índice Mini-CBR e (b) Expansão Mini-CBR dos corpos de prova dosados com amostras do solo C e submetidos aos diferentes procedimentos de cura.



Fonte: O Autor (2022)

Quanto à avaliação do impacto do tempo de cura no M-CBR das misturas, embora tenha sido verificada a tendência de redução do M-CBR dos corpos de prova submetidos ao procedimento de cura 1 com o aumento do tempo de cura, esta tendência não é estatisticamente significativa, como apontam os resultados apresentados na Tabela 21. Quanto aos corpos de prova dosados com amostras de solo C e submetidos aos procedimentos de cura 2 e 3, foi

observada uma tendência de aumento do M-CBR com o aumento do tempo de exposição a ambos os procedimentos de cura (Cura 2 e 3). Entretanto, de forma similar ao constatado para o procedimento de cura 1, este aumento não é estatisticamente significativo. Visto que as médias dos resultados para 35 e 56 dias de todos os tratamentos não diferem estatisticamente entre si considerando o nível de significância de 95%, pode-se inferir que o tempo de exposição aos tratamentos não interfere significativamente no M-CBR dos corpos de prova.

Tabela 21 – Resultado da análise estatística realizada sobre os valores médios de M-CBR dos corpos de prova dosados com amostras de solo C.

<b>Procedimento de Cura</b>	<b>M-CBR médio 35 dias (%)</b>	<b>M-CBR médio 56 dias (%)</b>	<b>t-valor</b>	<b>p-valor</b>	<b>Decisão</b>
1	52,33	44,33	2,5880	0,06081	Não se rejeita Ho
2	31,33	43,67	-2,6985	0,05418	Não se rejeita Ho
3	32,00	42,33	-1,6116	0,18234	Não se rejeita Ho

Fonte: O Autor (2022)

Quanto à avaliação da expansão dos corpos de prova através da Expansão Mini-CBR (EM-CBR), os resultados apresentados na Figura 21 (b) permitem inferir que o procedimento de cura convencional (Cura 2) resulta nos maiores valores de expansão comparado aos demais tratamentos, principalmente aos 35 e 56 dias. A mesma figura demonstra que a carbonatação da EAER antes da moldagem dos corpos de prova é a forma mais eficiente para a redução da expansão da mistura dentre os procedimentos de cura adotados, uma vez que os corpos de prova submetidos a esse procedimento de cura (cura 3) resultaram nos menores valores de EM-CBR.

Ao avaliar a influência do tempo de exposição aos tratamentos na EM-CBR dos corpos de prova, os resultados da análise estatística realizada sobre as médias de EM-CBR obtidos para cada tratamento, apresentados na Tabela 22, indicam que o aumento do tempo de exposição dos corpos de prova aos procedimentos de cura 1 e 2 reduz significativamente a expansão das misturas. Em contrapartida, o resultado da análise estatística realizada com os resultados dos corpos de prova submetidos ao procedimento de cura 3 indica que o aumento do tempo de exposição a este tratamento não impacta significativamente na expansão (EM-CBR) dos corpos de prova.

Tabela 22 – Resultado da análise estatística realizada sobre os valores médios de EM-CBR dos corpos de prova dosados com amostras de solo C.

<b>Procedimento de Cura</b>	<b>EM-CBR médio 35 dias (kPa)</b>	<b>EM-CBR médio 56 dias (kPa)</b>	<b>t-valor</b>	<b>p-valor</b>	<b>Decisão</b>
1	0,39	0,24	4,1576	0,01417	Rejeita-se H0
2	0,07	0,02	3,5000	0,02490	Rejeita-se H0
3	0,01	0,01	0,0000	1,00000	Não se rejeita Ho

Fonte: O Autor (2022)

Para a avaliação do MR dos corpos de prova dosados com EAER e amostras de solo C, e submetidos aos três procedimentos de cura, a Tabela 23 apresenta, os respectivos coeficientes dos modelos de regressão [Equação 2] descritivos do MR, bem como os respectivos coeficientes de ajuste dos dados ( $R^2$ ). Tais modelos, conforme exposto na metodologia do estudo, foram utilizados na estimativa dos valores de MR correspondentes ao estado de tensões representativo das camadas de base, sub-base e reforço do subleito, sendo os resultados dessa estimativa apresentados graficamente na Figura 22.

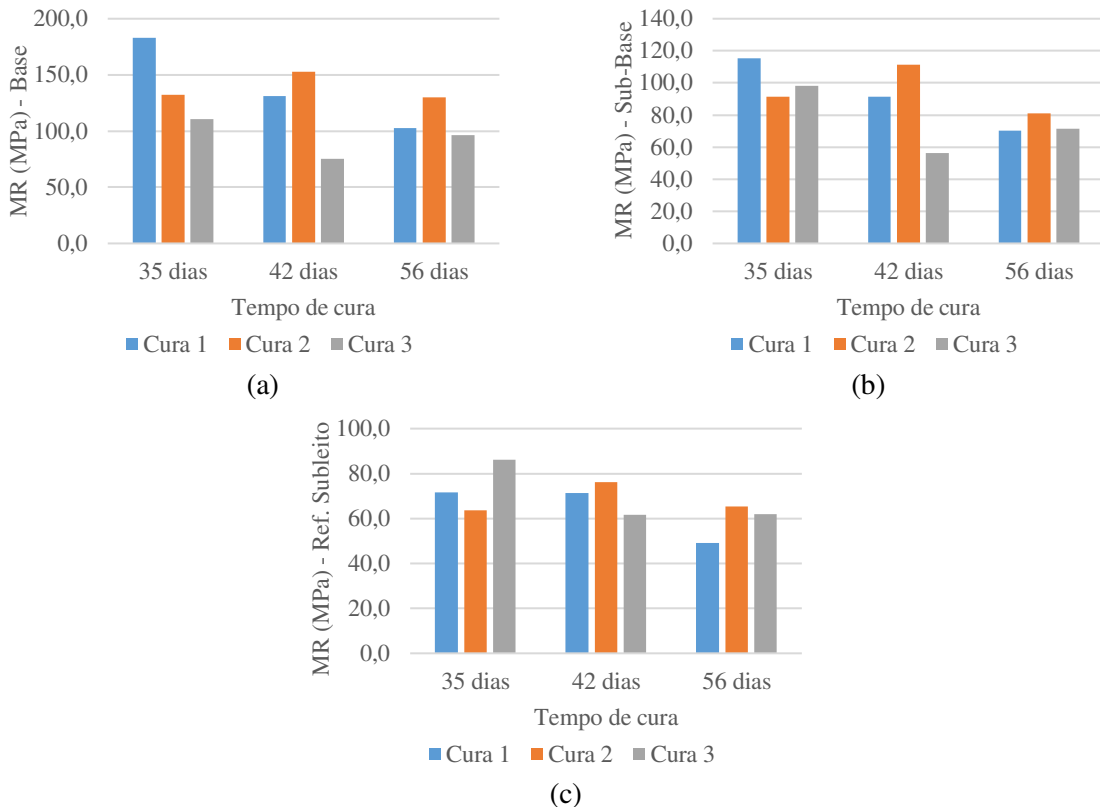
Tabela 23 – Coeficientes dos modelos de regressão descritivos dos valores de MR.

Descrição da mistura	Coeficientes do Modelo			$R^2$	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)		
	k1	k2	k3		Base <sup>1</sup>	Sub-base <sup>2</sup>	Ref. subleito <sup>3</sup>		
Solo C	Cura 1 (C1)	35 dias	799,46	0,150	0,517	0,916	183,2	115,4	71,7
		42 dias	414,55	0,192	0,260	0,827	131,3	91,6	71,2
		56 dias	347,58	0,149	0,380	0,798	102,7	70,1	49,2
	Cura 2 (C2)	35 dias	428,17	0,129	0,394	0,895	132,3	91,5	63,6
		42 dias	419,23	0,067	0,422	0,717	153,0	111,5	76,1
		56 dias	588,64	0,324	0,204	0,897	130,0	81,0	65,3
	Cura 3 (C3)	35 dias	162,15	0,036	0,140	0,759	110,6	98,1	86,3
		42 dias	193,07	0,342	-0,142	0,940	75,5	56,3	61,6
		56 dias	246,58	0,197	0,137	0,938	96,1	71,6	62,1

<sup>1</sup> - MR determinado para o estado de tensões correspondente a  $\sigma_3 = 0,03$  MPa e  $\sigma_d = 0,16$  MPa; MR determinado para o estado de tensões correspondente a  $\sigma_3 = 0,01$  MPa e  $\sigma_d = 0,09$  MPa; e <sup>3</sup> - MR determinado para o estado de tensões correspondente a  $\sigma_3 = 0,009$  MPa e  $\sigma_d = 0,037$  MPa.

Fonte: O Autor (2022)

Figura 22 – Módulo de Resiliência (MR) das misturas dosadas com amostras de solo C estimado a partir dos pares de tensões atuantes em camadas de base (a), sub-base (b) e reforço de subleito (c)



Fonte: O Autor (2022)

A partir dos resultados apresentados na Figura 22, verificou-se que o procedimento de cura C1 é mais eficiente que os demais tratamentos apenas nos estágios iniciais de cura (35 dias) para os MR determinados com base nos estados de tensões representativos das camadas de base e sub-base de pavimentos. Quando se considerou o estado de tensões representativo da camada de reforço de subleito, os corpos de prova submetidos ao procedimento de cura C1 por 35 dias apresentaram desempenho inferior ao constatado para os corpos de prova submetidos aos demais procedimentos (C2 e C3) por tempo equivalente. Para períodos mais longos de cura (42 e 56 dias), os resultados indicam tendência de redução do MR dos corpos de prova submetidos ao tratamento C1. Essa redução nos valores de MR com o aumento do tempo de cura, fez com que o MR dos corpos de prova submetidos ao tratamento C1 fossem superados pelo MR dos corpos de prova submetidos aos procedimentos de cura C2 ou C3 por 42 e 56 dias, independente do estado de tensões considerado no cômputo do MR.

Para os corpos de prova submetidos ao procedimento de cura C2, os resultados apresentados na Figura 22 indicam que este procedimento é mais eficiente que os demais quando os corpos de prova foram submetidos a maiores períodos de exposição às curas (42 e 56 dias), independentemente do estado de tensões utilizado na estimativa do MR. Quando se compara a variação ao longo do tempo dos valores de MR dos corpos de prova submetidos ao procedimento de cura C2, para os três pares de tensões considerados, verificou-se que estes valores tendem a se manter constantes ao longo do tempo, principalmente quando se avalia os resultados ao 35 e 56 dias de cura.

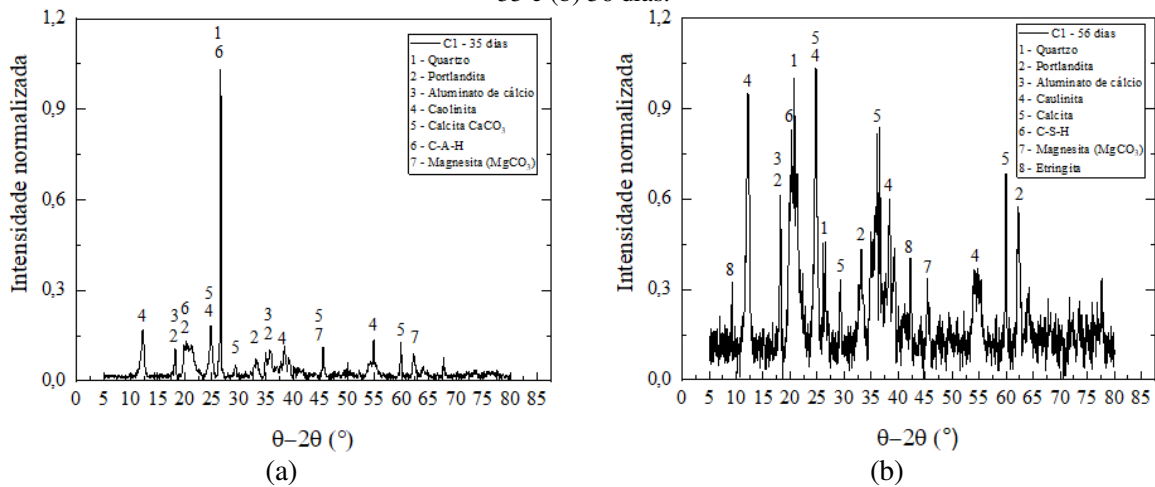
No que se refere aos valores de MR dos corpos de prova submetidos ao procedimento de cura C3, foi verificado, a partir da Figura 22, que este procedimento somente foi superior aos demais quando considerados os pares de tensões representativos de camadas de reforço de subleito e 35 dias de cura. Para os valores de MR determinados para os demais estados de tensões considerados, os corpos de prova submetidos aos procedimentos de cura C3 apresentaram MR inferiores aos submetidos aos demais tratamentos, independentemente do período de cura considerado. Adicionalmente, a Figura 22 indica que o aumento do tempo de exposição da EAER à carbonatação acelerada antes da moldagem dos corpos de prova tem efeito deletério no MR da mistura.

#### **3.4.1.2. Análises mineralógicas e microestruturais das misturas dosadas com amostras de solo C**

Os difratogramas das amostras dosadas com solo C e submetidas ao procedimento de cura 1 (C1) durante 35 e 56 dias são apresentados na Figura 23. Os difratogramas de ambas as

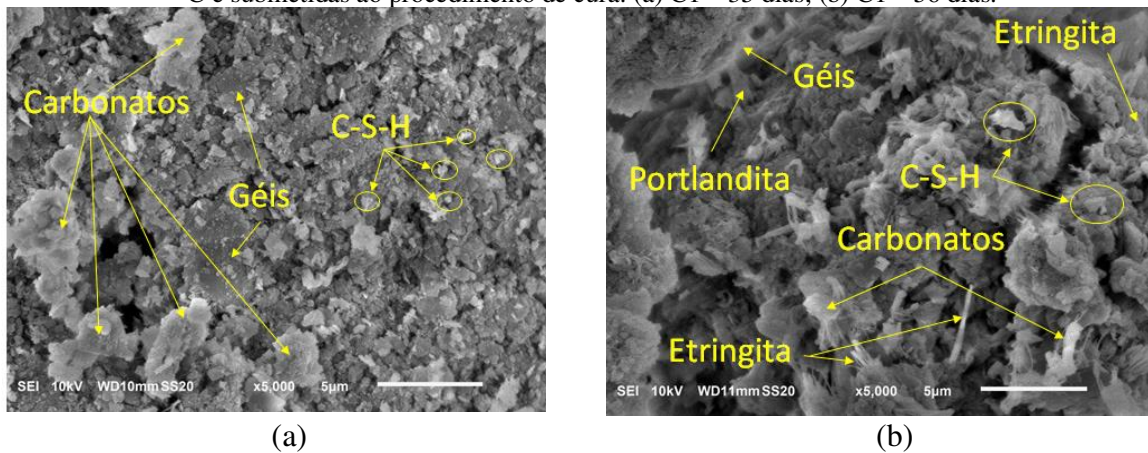
amostras (C1 – 35 dias e C1- 56 dias) permitiram identificar a presença de picos correspondentes aos minerais portlandita, quartzo e caulinita. Os difratogramas também permitiram identificar traços de compostos cimentícios hidratados (silicato de cálcio hidratado ou C-S-H) em ambas as amostras. A presença dos minerais supracitados pôde ser confirmada através das imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) [Figura 24 (a) e (b)] obtidas de amostras retiradas dos mesmos corpos de prova utilizados nas análises de DRX.

Figura 23 – Difratogramas das misturas com solo C submetidas aos diferentes procedimentos de cura 1 por (a) 35 e (b) 56 dias.



Fonte: O Autor (2022)

Figura 24 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das misturas dosadas com amostras de solo C e submetidas ao procedimento de cura: (a) C1 – 35 dias; (b) C1 – 56 dias.



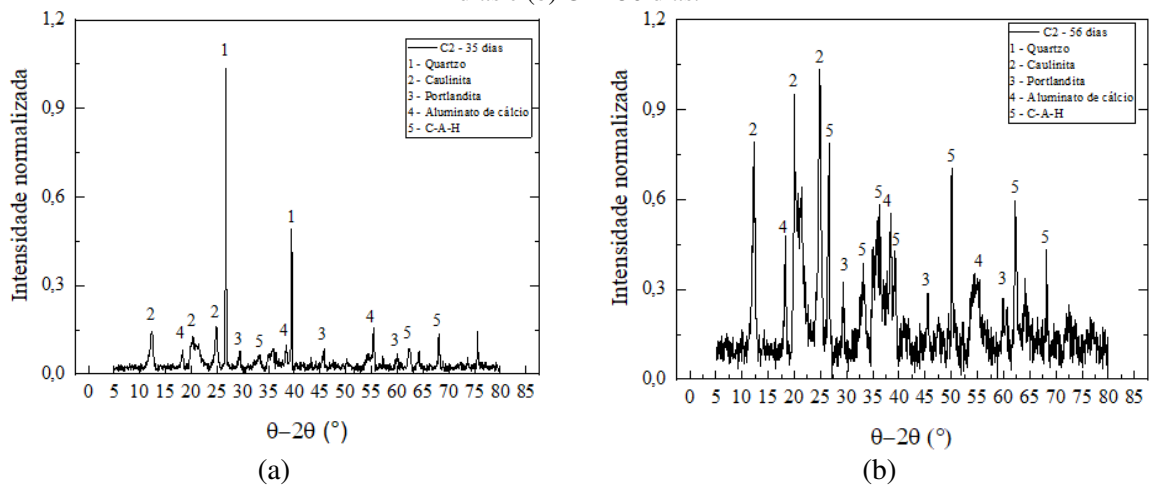
Fonte: O Autor (2022)

Outro ponto de destaque decorrente da comparação entre os difratogramas das amostras C1 - 35 dias e C1 – 56 dias consiste na identificação de picos associados ao mineral etringita na amostra submetida ao procedimento de cura 1 por 56 dias. Como não foram verificados picos referentes à etringita no difratograma da amostra submetida ao procedimento de cura 1 por 35 dias, acredita-se que esse mineral tenha se formado ao longo do período de cura considerado.

Visto que a etringita tem impacto deletério nas propriedades mecânicas de materiais cimentícios (TOSUN e BARADAN, 2010), acredita-se que o seu desenvolvimento ao longo do tempo de cura tenha sido responsável pela redução verificada experimentalmente dos valores de RCS, M-CBR e MR ao longo do tempo, como pode ser observada nas Figuras 20, 21 e 22.

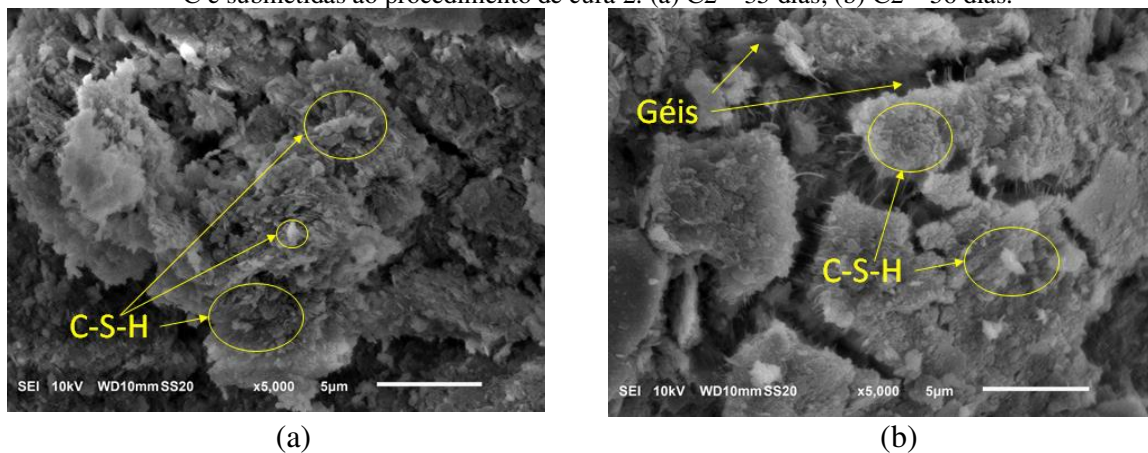
Quanto aos difratogramas referentes às amostras submetidas ao procedimento de cura 2 por 35 dias (C2 – 35 dias) e por 56 dias (C2 – 56 dias), estes permitiram a identificação de minerais como a portlandita, silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H) (Figura 25). A presença de alguns desses compostos pôde ser confirmada através das análises de MEV realizadas em amostras de corpos de prova submetidos ao mesmo tratamento (C2 – 35 dias e C2 – 56 dias), cujas micrografias são apresentadas nas Figura 26 (a) e (b).

Figura 25 – Difratogramas das misturas dosadas com solo C submetidas ao procedimento de cura 2: (a) C2 – 35 dias e (b) C2 – 56 dias.



Fonte: O Autor (2022)

Figura 26 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das misturas dosadas com amostras de solo C e submetidas ao procedimento de cura 2: (a) C2 – 35 dias; (b) C2 – 56 dias.



Fonte: O Autor (2022)

Os aumentos de RCS, M-CBR e MR dessa mistura com o aumento do tempo de cura podem estar relacionados com a formação dos compostos hidratados (C-S-H e C-A-H), visto que estes promovem o fechamento de poros da matriz sólida, favorecendo a formação de uma matriz sólida mais densa e rígida, contribuindo, assim, positivamente para a resposta mecânica de seus produtos (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; AMINI e GHASEMI, 2019; WU *et al.*, 2019).

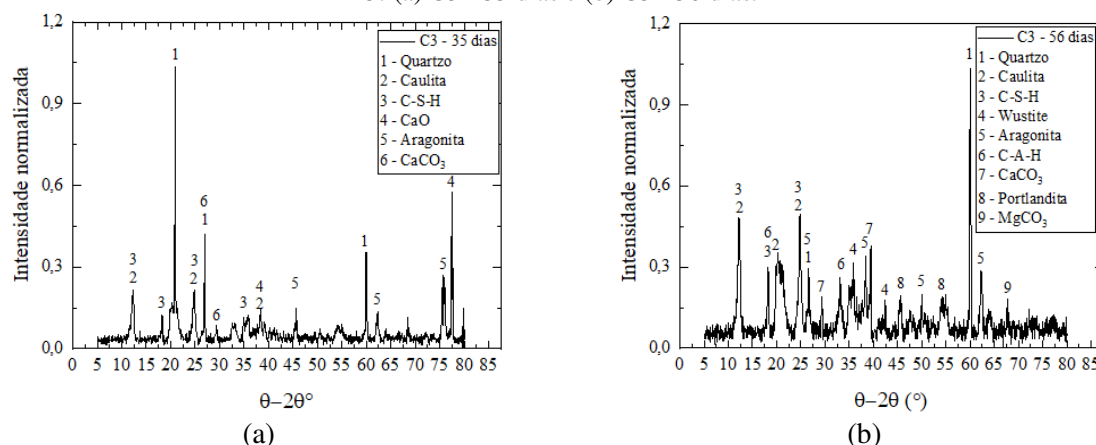
Além disso, os picos adicionais de compostos cimentícios verificados no difratograma correspondente ao corpo de prova submetido ao procedimento de cura 2 por 56 dias indicam o desenvolvimento de reações cimentícias ao longo do tempo, formando novos compostos hidratados que justificam o acréscimo de resistência verificado quando comparados os corpos de prova C2 - 56 dias e C2 - 35 dias.

A análise dos efeitos dos procedimentos de cura adotados nas respostas mecânicas dos corpos de prova pode ser realizada através da comparação entre os difratogramas da Figura 25 (a) e (b). Na análise de DRX das amostras submetidas ao procedimento de carbonatação [Figura 25 (a)], foram verificados picos relacionados a compostos carbonatados, como a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e a magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ). Como tais picos não aparecem nos difratogramas das amostras submetidas ao procedimento de cura convencional [Figura 25 (b)], pode-se inferir que o procedimento de carbonatação acelerada promoveu a carbonatação de compostos presentes inicialmente na amostra.

Ao levar em consideração que os compostos carbonatados, como a calcita e a magnesita, preenchem os vazios das misturas, aumentando o peso específico e a rigidez de sua matriz sólida (HAAS e RITTER, 2019; JORAT *et al.*, 2020; PARK *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2020; DENELEE *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2021), é possível atribuir ao desenvolvimento desses compostos os maiores valores de RCS, M-CBR e MR verificados para as misturas submetidas ao tratamento C1 quando comparados aos valores destas mesmas propriedades obtidos para as misturas submetidas ao tratamento C2.

Os difratogramas resultantes das análises de DRX realizadas em amostras dos corpos de prova dosados com amostras de solo C e submetidos ao procedimento de cura 3 durante 35 dias (C3 – 35 dias) e 56 dias (C3 – 56 dias) são apresentados na Figura 27 (a) e (b), respectivamente.

Figura 27 – Difratomogramas das misturas dosadas com amostras de solo C e submetidas ao procedimento de cura 3: (a) C3 - 35 dias e (b) C3 - 56 dias.

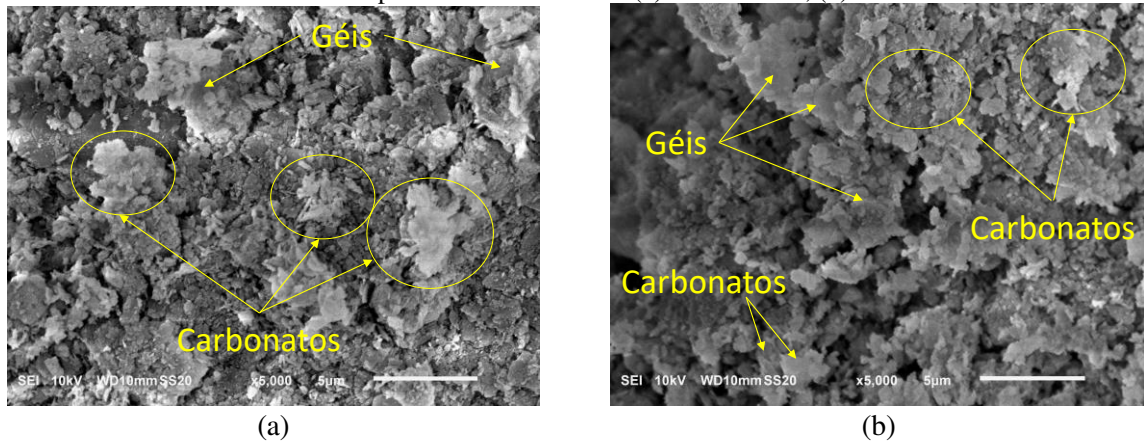


Fonte: O Autor (2022)

O difratograma correspondente à mistura C3 – 35 dias apresentada na Figura 27 (a) permitiu a identificação de compostos hidratados de silício (C-S-H) e de compostos carbonatados, como a calcita e a aragonita (ambas CaCO<sub>3</sub>). Acredita-se que os compostos hidratados tenham se formado durante o tempo de exposição dos corpos de prova em câmara úmida após sua moldagem, enquanto os carbonatados durante o tempo de exposição da EAER à carbonatação acelerada antes da moldagem dos corpos de prova. Outra constatação relevante sobre o difratograma da amostra C3 – 35 dias foi a identificação de picos atribuídos à cal (CaO), o que pode ser um indício que nem todo CaO presente na amostra reagiu com o CO<sub>2</sub> do meio para a formação de CaCO<sub>3</sub>. A hipótese de formação de tais compostos é reforçada através dos resultados da análise de MEV realizada em amostras do mesmo corpo de prova, cujo resultado é apresentado na Figura 28 (a), que permitiu identificar tais estruturas na amostra.

Já no difratograma referente à amostra C3 – 56 dias apresentado na Figura 27 (b), foram identificados os mesmos minerais (C-S-H, aragonita e calcita) verificados na amostra C3 – 35 dias, com exceção da cal (CaO), ausente na amostra C3 – 56 dias. Em contrapartida, na amostra C3 – 56 dias foram identificados novos picos, os quais foram atribuídos a compostos hidratados, como o C-A-H e a portlandita, além de novos picos referentes a compostos carbonatados, como a calcita e a aragonita (CaCO<sub>3</sub>), além da magnesita (MgCO<sub>3</sub>). A Figura 28 (b) apresenta a micrografia resultante da análise de MEV realizada em amostra do mesmo corpo de prova, a qual possibilitou a identificação de algumas das estruturas supracitadas. Acredita-se que a formação de novos compostos carbonatados seja decorrente do tempo adicional que a amostra de EAER ficou submetida à carbonatação em relação à amostra C3 – 35 dias e que a presença de tais compostos carbonatados na mistura tenha contribuído para o aumento da magnitude da RCS e M-CBR da mistura com o aumento do tempo de cura.

Figura 28 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das misturas dosadas com amostras de solo V e submetidas aos procedimentos de cura: (a) C3 – 35 dias; (b) C3 – 56 dias.



Fonte: O Autor (2022)

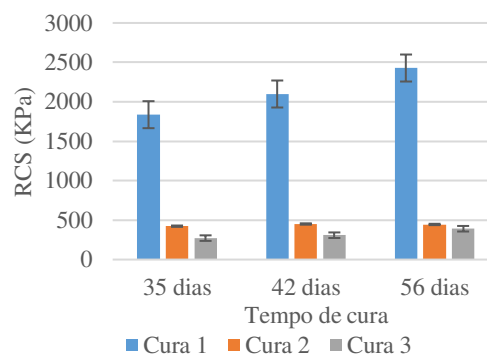
### 3.4.2. Misturas dosadas com amostras de solo V

Os resultados provenientes dos ensaios de laboratório direcionados para promover as caracterizações mecânica e de expansibilidade das misturas solo-EAER dosadas com amostras de solo V são apresentadas no item 3.4.2.1. Já os resultados das análises mineralógicas e microestruturais realizadas para a compreensão das observações experimentais referentes às misturas dosadas com amostras de solo V são apresentados no item 3.4.2.2

#### 3.4.2.1. Caracterização mecânica e de expansibilidade das misturas dosadas com amostras de solo V.

Na Figura 29 são apresentados os resultados de Resistência à Compressão Simples (RCS) dos corpos de prova das misturas solo-EAER dosadas com amostras de solo V e submetidos aos três procedimentos de cura adotados nesse estudo.

Figura 29 – RCS das misturas solo-EAER dosadas com amostras de solo V e submetidas aos três procedimentos de cura adotados



Fonte: O Autor (2022)

Da Figura 29 observou-se que o processo de carbonatação acelerada (Cura C1) resultou em corpos de prova com valores de RCS até 680% superiores aos valores observados para os corpos de prova submetidos aos demais processos de cura (Cura C2 e Cura C3). Essa constatação ressalta a vantagem do ponto de vista técnico da carbonatação acelerada adotada no procedimento de cura 1, uma vez que, para um mesmo material, pode-se obter maiores valores de RCS apenas através da carbonatação dos corpos de prova. Os resultados apresentados também permitiram observar que submeter a EAER ao processo de carbonatação antes da moldagem dos corpos de prova (Cura 3) resulta em corpos de prova com RCS similares, porém levemente inferiores, aos valores observados para os corpos de prova submetidos ao processo convencional de cura (Cura 2).

Avaliando a influência do tempo de cura na RCS dos corpos de prova, os resultados apresentados indicam que o aumento do tempo de exposição dos corpos de prova ao procedimento de cura 1 tende a aumentar a RCS dos corpos de prova. Tal constatação é reforçada a partir da análise estatística realizada com os valores médios dos corpos de prova submetidos a este tratamento (Tabela 24), a qual indica haver diferença significativa entre a RCS dos corpos de prova submetidos a 35 e 56 dias de cura.

Ao se avaliar a influência do tempo de cura na RCS dos corpos de prova submetidos aos procedimentos de cura 2 e 3, os resultados da Figura 29, conjuntamente com os resultados apresentados na Tabela 24, permitem afirmar que o tempo em que os corpos de prova ficam submetidos a cada tratamento (curas 2 e 3) exerce influência positiva e significativa na RCS dos corpos de prova.

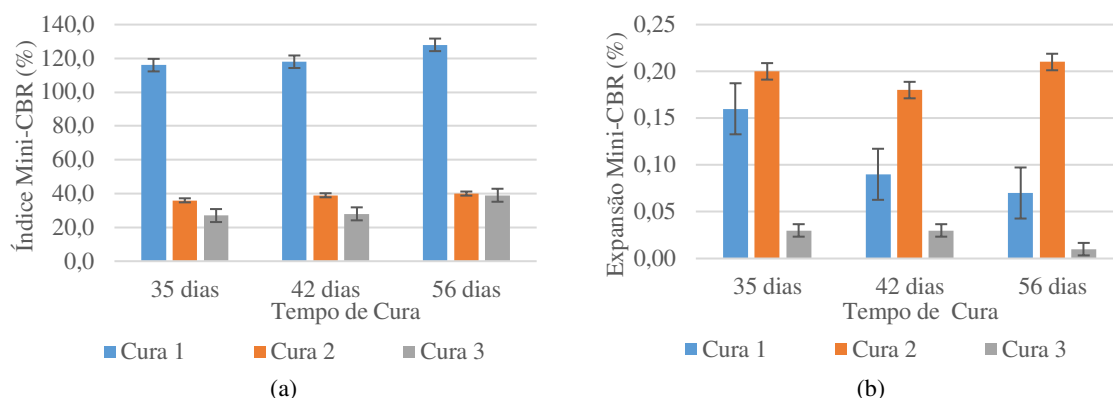
Tabela 24 – Resultado da análise estatística realizada sobre os valores médios de RCS dos corpos de prova dosados com amostras de solo V.

<b>Procedimento de Cura</b>	<b>RCS médio 35 dias (kPa)</b>	<b>RCS médio 56 dias (kPa)</b>	<b>t-valor</b>	<b>p-valor</b>	<b>Decisão</b>
1	1837,00	2428,47	-3,5603	0,02358	Rejeita-se Ho
2	422,96	444,87	-0,3128	0,77008	Rejeita-se Ho
3	271,74	390,97	-3,2725	0,03072	Rejeita-se Ho

Fonte: O Autor (2022)

Quanto aos resultados do Índice Mini-CBR (M-CBR) e da Expansão Mini-CBR (EM-CBR) dos corpos de prova das misturas solo-EAER dosadas com amostra de solo V e submetidos aos três procedimentos de cura, estes são apresentados na Figura 30 (a) e (b), respectivamente.

Figura 30 - Resultados das determinações do (a) Índice Mini-CBR e (b) Expansão Mini-CBR dos corpos de prova dosados com amostras do solo V e submetidos aos diferentes procedimentos de cura.



Fonte: O Autor (2022)

Quanto ao M-CBR dos corpos de prova submetidos ao procedimento de cura 1, os resultados apresentados na Figura 30 (a) permitiram verificar que este procedimento resultou em maiores valores comparativamente aos demais procedimentos de cura considerados. Já para os procedimentos de cura 2 e 3, os resultados da Figura 30 (a) indica que o tratamento 2 é mais eficiente que o tratamento 3 quando se avaliou a M-CBR dos corpos de prova em estágios iniciais de cura, ou seja, aos 35 e 42 dias de cura. A diferença entre os procedimentos de cura 2 e 3 se reduz aos 56 dias de cura, uma vez que ambos os procedimentos resultaram em corpos de prova com M-CBR próximos entre si (40,00% e 38,67%, respectivamente), permitindo inferir que, em longo prazo, ambos os tratamentos têm o mesmo efeito no M-CBR dos corpos de prova.

Embora tenha sido verificado acréscimo do M-CBR dos corpos de prova submetidos aos procedimentos de cura 1 e 2 ao longo do tempo [Figura 30 (a)], a análise estatística realizada (Tabela 25) não identificou diferença significativa entre as médias de M-CBR dos corpos de prova aos 35 e 56 dias para estes tratamentos. Logo, pode-se inferir que o aumento do tempo de exposição aos procedimentos de cura 1 e 2 não influencia significativamente no M-CBR dos corpos de prova. Um aspecto positivo dessa constatação consiste no fato de que poucos dias de exposição do corpo de prova à carbonatação acelerada e à cura selada, se mostra suficiente para que se atinja o M-CBR máximo dos corpos de prova.

Diferentemente do que foi constatado para os corpos de prova submetidos aos procedimentos de cura 1 e 2, a análise estatística realizada sobre as médias dos corpos de prova submetidos ao procedimento de cura 3 (Tabela 25), indica haver diferença significativa entre as médias dos corpos de prova submetidos a 35 e 56 dias de cura. Assim, pode-se afirmar que o M-CBR dos corpos de prova tende a aumento conforme os aumentos do tempo de exposição da EAER à carbonatação acelerada antes da moldagem dos corpos de prova.

Tabela 25 – Resultado da análise estatística realizada sobre os valores médios de M-CBR dos corpos de prova dosados com amostras de solo V.

Procedimento de Cura	M-CBR médio 35 dias (%)	M-CBR médio 56 dias (%)	t-valor	p-valor	Decisão
1	116,00	128,33	-2,5117	0,06594	Não se rejeita Ho
2	36,33	40,00	-2,0788	0,10617	Não se rejeita Ho
3	27,33	38,67	-7,0895	0,00209	Rejeita-se Ho

Fonte: O Autor (2022)

Quanto à expansão das misturas, os resultados apresentados na Figura 30 (b) permitem verificar que o procedimento de cura 3 é o mais eficiente quando se tem por objetivo a redução da expansão dos corpos de prova, enquanto o procedimento de cura convencional (cura 2) é o mais ineficaz.

Quando se avalia o impacto do tempo de exposição aos diferentes procedimentos de cura na EM-CBR dos corpos de prova, a Figura 30 (b), conjuntamente com os resultados da análise estatística apresentados na Tabela 26, indicam que não há diferença significativa na expansão dos corpos de prova com o aumento do tempo de exposição aos procedimentos de cura 2 e 3. Os resultados apresentados na Figura 30 (b) e Tabela 26 também permitiram identificar diferença significativa entre as médias de EM-CBR dos corpos de prova submetidos ao procedimento de cura 1 aos 35 e 56 dias. Tal constatação permite inferir que, ao submeter os corpos de prova ao processo de carbonatação (cura 1), a expansão dos corpos de prova tende a diminuir conforme o tempo de exposição a esse procedimento de cura.

Tabela 26 – Resultado da análise estatística realizada sobre os valores médios de EM-CBR dos corpos de prova dosados com amostras de solo V.

Procedimento de Cura	EM-CBR médio 35 dias (%)	EM-CBR médio 56 dias (%)	t-valor	p-valor	Decisão
1	0,16	0,07	2,9824	0,04064	Rejeita-se Ho
2	0,20	0,19	0,3162	0,76764	Não se rejeita Ho
3	0,03	0,01	2,6458	0,05724	Não se rejeita Ho

Fonte: O Autor (2022)

A Tabela 27 apresenta os respectivos coeficientes dos modelos de regressão [Equação 2] descritivos do MR dos corpos de prova dosados com amostras de solo V e EAER e submetidos a cada procedimento de cura, bem como os respectivos coeficientes de ajuste dos dados ( $R^2$ ). Tais modelos, conforme exposto na metodologia do estudo, foram utilizados na estimativa dos valores de MR correspondentes ao estado de tensões representativo das camadas de base, sub-base e reforço do subleito, sendo as estimativas apresentadas graficamente na Figura 31.

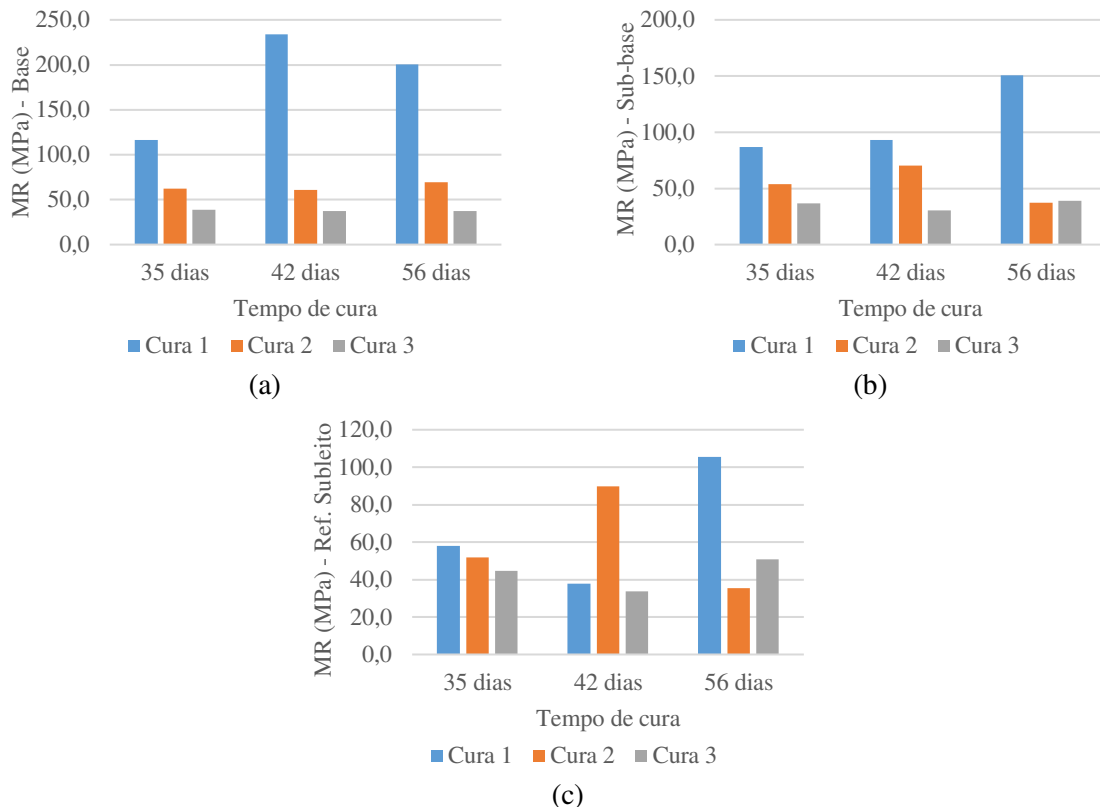
Tabela 27 – Coeficientes dos modelos de regressão descritivos dos valores de MR.

Descrição	Coeficientes do Modelo			R <sup>2</sup>	MR (MPa) Base <sup>1</sup>	MR (MPa) Sub-Base <sup>2</sup>	MR (MPa) Ref. Subleito <sup>3</sup>		
	k1	k2	k3						
Solo V	Cura 1 (C1)	35 dias	295,94	0,028	0,455	0,882	116,5	87,0	57,9
		42 dias	4438,23	0,328	0,978	0,883	234,1	93,0	37,7
		56 dias	498,68	0,052	0,397	0,960	200,8	150,9	105,4
	Cura 2 (C2)	35 dias	96,03	0,105	0,038	0,638	62,0	54,0	51,7
		42 dias	38,42	0,012	-0,275	0,743	61,0	70,5	89,9
		56 dias	499,71	0,564	-0,003	0,812	69,5	37,5	35,4
	Cura 3 (C3)	35 dias	48,59	0,194	-0,252	0,640	39,1	36,5	44,7
		42 dias	74,44	0,272	-0,148	0,785	37,6	30,4	33,7
		56 dias	32,69	0,126	-0,313	0,715	37,3	38,9	50,7

1 - MR determinado para o estado de tensões correspondente a  $\sigma_3 = 0,03$  MPa e  $\sigma_d = 0,16$  MPa; MR determinado para o estado de tensões correspondente a  $\sigma_3 = 0,01$  MPa e  $\sigma_d = 0,09$  MPa; e 3 - MR determinado para o estado de tensões correspondente a  $\sigma_3 = 0,009$  MPa e  $\sigma_d = 0,037$  MPa.

Fonte: O Autor (2022)

Figura 31 – Módulo de Resiliência (MR) das misturas dosadas com amostras de solo V estimado a partir dos pares de tensões atuantes em camadas de base (a), sub-base (b) e reforço de subleito (c).



Fonte: O Autor (2022)

A partir dos resultados apresentados na Figura 31, observou-se que o procedimento de cura C1 se sobressaiu em relação aos demais procedimentos quando se considera os períodos de cura de 35 e 56 dias, independentemente do estado de tensões utilizado no cálculo do MR. Da mesma figura, também se observou, para os corpos de prova submetidos ao procedimento de cura C1, tendência de aumento dos valores de MR com o aumento do tempo de exposição dos corpos de prova na câmara de carbonatação.

No que se refere aos valores de MR referentes aos corpos de prova submetidos ao processo de cura convencional (C2), estes se mostraram superiores aos valores de MR dos corpos de prova submetidos ao procedimento de cura 3 aos 35 dias e 42 dias de cura, independentemente do estado de tensões adotado na estimativa do MR. Aos 56 dias de cura, o procedimento de cura 2 foi superior ao procedimento 3 apenas para o estado de tensões atuante em camadas de base. Adicionalmente, devido às variabilidades de ensaios inerentes à determinação do MR não foi possível identificar a influência do tempo de cura no MR dos corpos de prova submetidos ao procedimento de cura C2.

Já para os corpos de submetidos ao procedimento de cura 3, os resultados apresentados indicam que esse procedimento é o mais ineficaz dentre os procedimentos considerados quando se avaliam os valores de MR calculados com base no estado de tensões representativo de camadas de base de pavimentos, independentemente do tempo de cura. Com base nos valores de MR estimados a partir dos pares de tensões representativos de camadas de sub-base e reforço de subleito, o procedimento de cura 3 foi inferior aos demais procedimentos em todos os períodos de cura analisados, com exceção do período de 56 dias, no qual o procedimento de cura 3 resultou em MR superiores aos constatados para os corpos de prova submetidos ao procedimento 2.

#### **3.4.2.2. Análises mineralógicas e microestruturais das misturas dosadas com amostras de solo V**

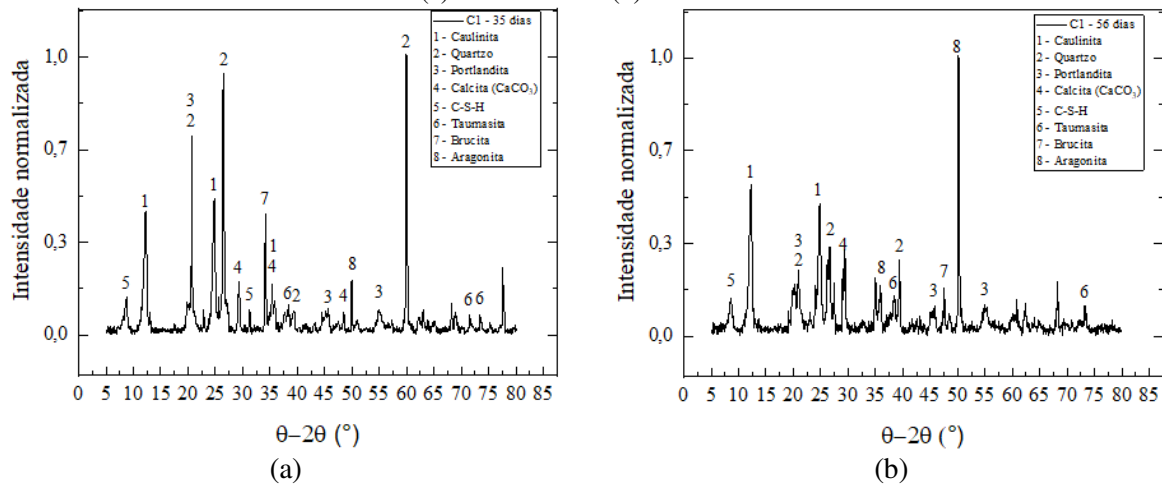
Na Figura 32 são apresentados os difratogramas resultantes das análises de DRX realizadas em amostras dos corpos de prova dosadas com solo V e submetidos ao procedimento de cura 1 por 35 dias (C1 – 35 dias) e por 56 dias (C1 – 56 dias).

Os difratogramas de ambas as amostras permitiram a identificação de picos relacionados à presença dos minerais caulinita, quartzo e brucita e de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Também foram verificados traços atribuídos à presença de minerais carbonatados, como a aragonita, a portlandita e a calcita. A presença de tais minerais na composição microestrutural das amostras pôde ser confirmada através das análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), cujos resultados são apresentados na Figura 33 (a) e (b).

A partir da análise comparativa entre os difratogramas das amostras C1 – 35 dias e C1 – 56 dias, verificou-se grande semelhança entre eles, sendo constatados poucos picos adicionais de compostos carbonatados e hidratados na amostra C1 – 56 dias em comparação com o difratograma da amostra C1 – 35 dias. Essa constatação é um indício de que grande parte da carbonatação e da hidratação dos compostos da amostra ocorre logo nos primeiros dias de

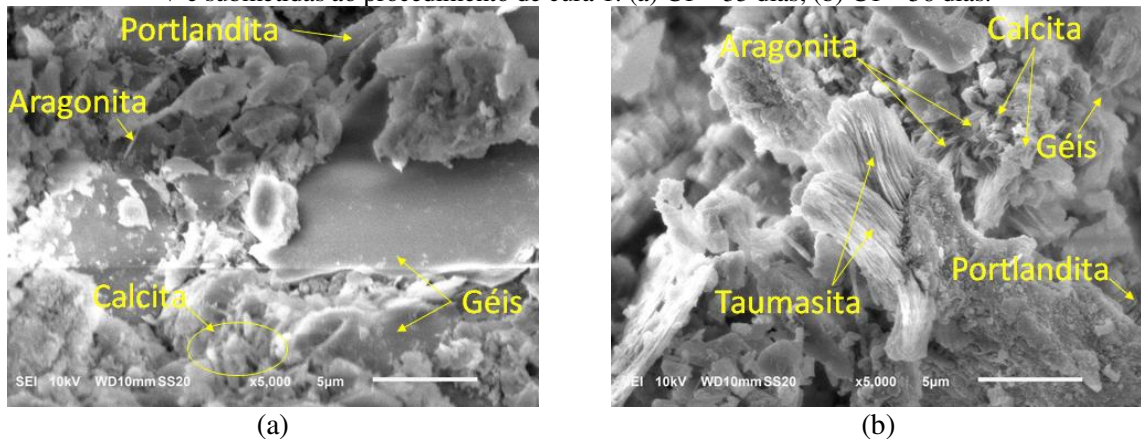
carbonatação (35 dias), de forma que o aumento do tempo de exposição à carbonatação não estimula significativamente a formação de novos compostos carbonatados e/ou hidratados. Essa hipótese é reforçada quando se verifica que o maior acréscimo nos valores das propriedades analisadas (RCS, M-CBR e MR) se dá logo aos 7 dias de carbonatação, havendo pouca evolução nos valores dessas propriedades quando se estende o período de carbonatação até 28 dias.

Figura 32 - Difratomogramas das misturas dosadas com amostras de solo V e submetidas ao procedimento de cura 1: (a) C1 - 35 dias e (b) C1 - 56 dias.



Fonte: O Autor (2022)

Figura 33 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das misturas dosadas com amostras de solo V e submetidas ao procedimento de cura 1: (a) C1 – 35 dias; (b) C1 – 56 dias.

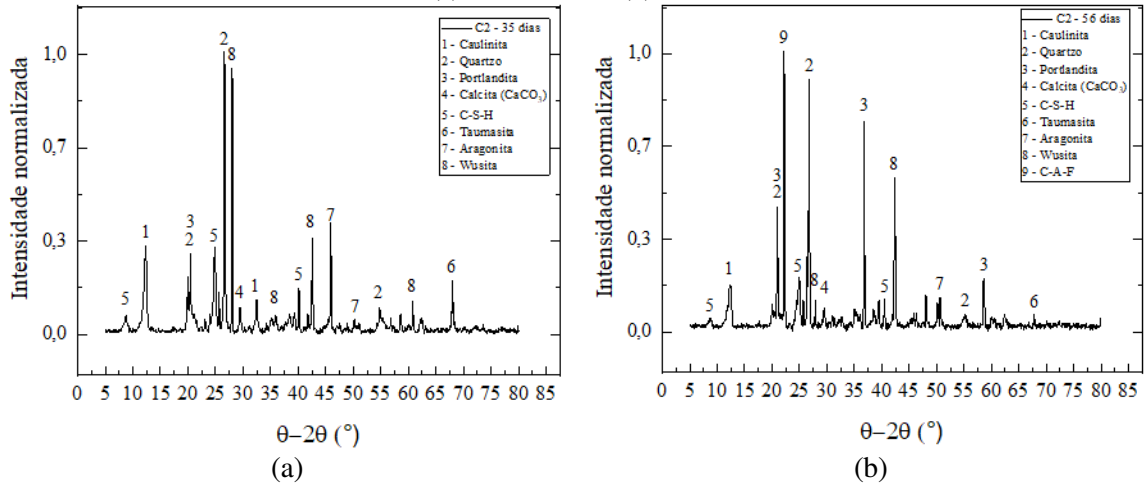


Fonte: O Autor (2022)

Os difratogramas referentes às amostras submetidas ao processo de cura C2 por 35 dias (C2 – 35 dias) e por 56 dias (C2 – 56 dias) são apresentados na Figura 34. De forma similar aos difratogramas das amostras submetidas ao procedimento de cura C1, identifica-se a presença de caullinita e quartzo, minerais estes característicos de solos arenosos, como é o caso da amostra de solo V. Os difratogramas permitiram também a identificação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H), wustite, portlandita, além de alguns traços

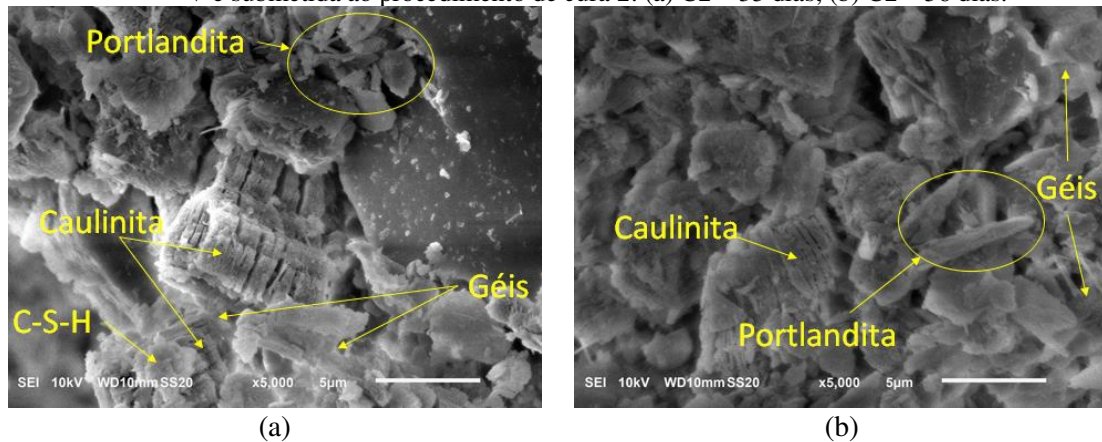
de compostos carbonatados, como aragonita e calcita. A presença de alguns dos compostos supracitados pôde ser confirmada através das análises de MEV realizadas em amostras do material, cujos resultados são apresentados na Figura 35 (a) e (b).

Figura 34 – Difratomogramas das misturas dosadas com amostras de solo V e submetidas ao procedimento de cura 2: (a) C2 - 35 dias e (b) C2 - 56 dias.



Fonte: O Autor (2022)

Figura 35 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das misturas dosadas com amostras de solo V e submetida ao procedimento de cura 2: (a) C2 - 35 dias; (b) C2 - 56 dias.



Fonte: O Autor (2022)

A análise comparativa entre os difratogramas das amostras C2 - 35 dias e C2 - 56 dias permitiu identificar o surgimento de poucos novos picos no difratograma da amostra C2 - 56 dias, os quais foram atribuídos a compostos hidratados (C-A-H), provavelmente relacionados com a subsequente hidratação de compostos da amostra natural com o aumento do tempo de cura. A similaridade entre os dois difratogramas é reforçada a partir das análises de MEV realizadas em amostras dos mesmos materiais, cujos resultados são apresentados na Figura 35 (a) e (b). Dessas micrografias, verifica-se certo grau de similaridade entre as amostras quando

se avalia os tamanhos dos grãos, os minerais presentes, a quantidade e o tamanho dos vazios, bem como a matriz sólida de uma maneira geral.

As constatações provenientes da análise comparativa entre os difratogramas das amostras C2 – 35 dias e C2 – 56 dias estão em consonância com os resultados dos ensaios mecânicos obtidos experimentalmente. Não foram verificadas grandes melhorias nas propriedades das amostras com o aumento do tempo de cura, uma vez que foram observadas magnitudes similares dos parâmetros de resistência aos 35 dias e aos 56 dias de cura. Assim, acredita-se que as maiores parcelas das reações de hidratação dos compostos responsáveis pelo aumento de resistência da mistura tenham ocorrido, quase em sua totalidade, nos primeiros dias de cura.

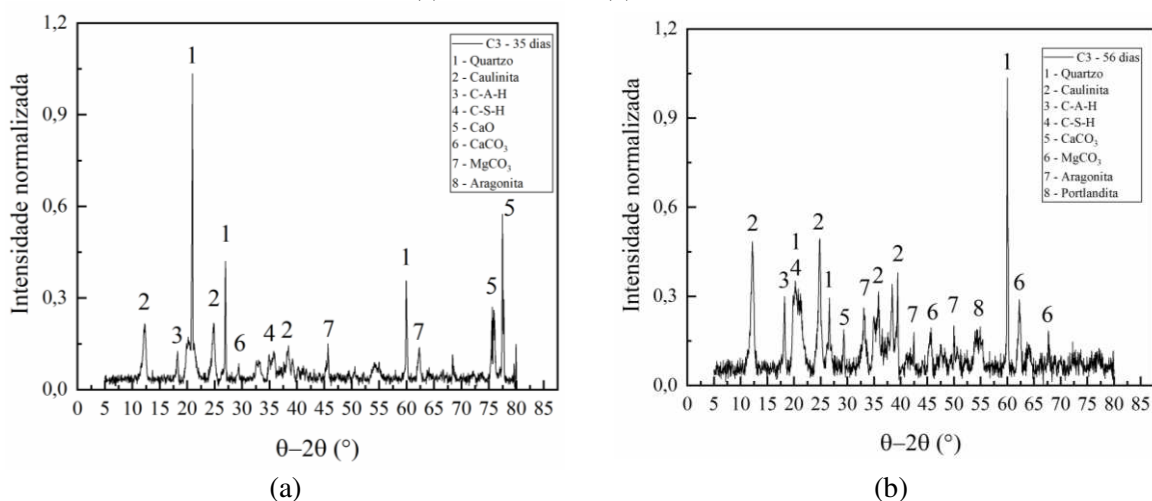
Comparando-se os difratogramas referentes às amostras submetidas aos procedimentos de cura 1 e 2 [Figura 34 (a)], verifica-se que o processo de carbonatação acelerada induz a formação de compostos carbonatados nos corpos de prova submetidos a esse procedimento de cura. Essa constatação é fundamentada no fato de que foram identificados picos de compostos carbonatados em menor quantidade e intensidade nos difratogramas correspondentes ao procedimento de cura C2 quando comparados aos correspondentes ao procedimento de cura C1.

A melhoria verificada nas propriedades mecânicas das misturas submetidas aos procedimentos de cura C1 e C2 pode ser atribuída à presença de minerais, como a wustite e brucita. Al-Amoudi *et al.* (2017) destacam que a presença conjunta, em um mesmo meio, de wustite e de hidróxidos de cálcio ou dolomita pode desencadear a formação de compostos com propriedades cimentícias e, conseqüentemente, contribuir positivamente para a resistência do material. Embora a brucita apresente baixa capacidade de cimentação, esse mineral proporciona o preenchimento dos poros dos materiais, o que aumenta a rigidez da matriz sólida do material, impactando positivamente nas propriedades mecânicas das misturas (LISKA, 2010; YI *et al.*, 2014).

De forma similar ao inferido para as amostras dosadas com solo C, acredita-se que a formação de compostos carbonatados durante a exposição do corpo de prova à carbonatação acelerada, como aragonita, portlandita e calcita, seja responsável pelo melhor desempenho das misturas submetidas ao procedimento de cura 1 em relação às submetidas à cura 2. Essa suposição se baseia no fato dos compostos carbonatados serem de maior dureza e preencherem os poros do material, resultando no acréscimo de resistência verificado em relação ao tratamento 2 (C2).

Quanto às análises mineralógicas realizadas sobre amostras coletadas dos corpos de prova submetidos ao procedimento de cura 3 durante 35 dias (C3 – 35 dias) e 56 dias (C3 – 56 dias), os difratogramas resultantes das análises de DRX são apresentados na Figura 36 (a) e (b), respectivamente.

Figura 36 - Difratogramas das misturas dosadas com amostras de solo V e submetidas ao procedimento de cura 3: (a) C3 - 35 dias e (b) C3 - 56 dias.



Fonte: O Autor (2022)

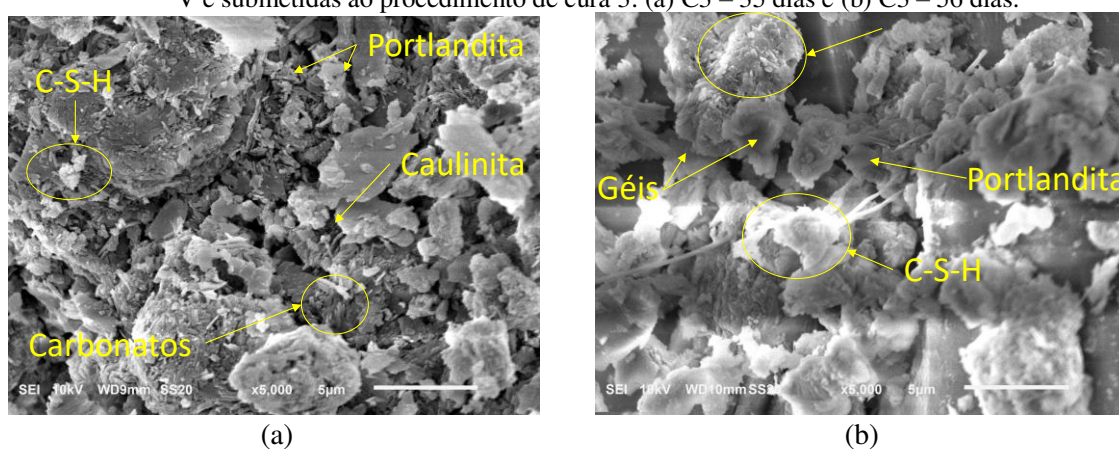
O difratograma correspondente à mistura C3 – 35 dias [Figura 36 (a)] permitiu a identificação de compostos hidratados de silício (C-S-H) e de alumínio (C-A-H), os quais acredita-se que tenham sido formados durante o tempo de exposição dos corpos de prova em câmara úmida após sua moldagem. O mesmo difratograma ainda permitiu a identificação de compostos carbonatados, como a calcita e a aragonita (CaCO<sub>3</sub>), além de magnesita (MgCO<sub>3</sub>), os quais acredita-se que tenham sido formados durante a exposição da EAER à carbonatação acelerada antes da moldagem dos corpos de prova.

Outra constatação relevante sobre o difratograma da amostra C3 – 35 dias foi a identificação de picos atribuídos à cal (CaO), o que pode ser um indício de que nem todo CaO presente na amostra reagiu com o CO<sub>2</sub> do meio para a formação de CaCO<sub>3</sub>. A presença de alguns dos compostos supracitados pôde ser confirmada através das imagens de microscopia eletrônica de varredura realizada obtidas da mesma amostra, apresentada na Figura 37 (a).

Quanto ao difratograma da amostra C3 – 56 dias apresentado na Figura 36 (b), embora tenha sido verificada uma maior quantidade de picos na amostra, foram identificados praticamente os mesmos minerais do difratograma da amostra C3 – 35 dias (C-S-H, C-A-H, calcita, aragonita e magnesita), com exceção da cal (CaO). Alguns dos minerais citados também foram identificados na análise de MEV realizada em amostras do mesmo corpo de prova, como

pode ser observado na Figura 37 (b). Entretanto, no difratograma da amostra C3 – 56 dias, não foram verificados picos de cal (CaO) (presentes na amostra C3 – 35 dias), consistindo em um indicativo de que tal composto (CaO) foi carbonatado ao longo dos dias adicionais em que a amostra de EAER foi submetida à carbonatação acelerada. Outra constatação do difratograma da amostra C3 – 56 dias foi a identificação de picos de portlandita [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], produto da hidratação de compostos cimentícios e que pode estar relacionado com o ligeiro aumento de resistência verificado nas amostras submetidas ao procedimento de cura 3 ao longo do tempo.

Figura 37 - Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das misturas dosadas com amostras de solo V e submetidas ao procedimento de cura 3: (a) C3 – 35 dias e (b) C3 – 56 dias.



Fonte: O Autor (2022)

### 3.5. Conclusões

A partir das constatações decorrentes desse estudo pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- Independentemente da amostra de solo utilizada no preparo dos corpos de prova, o procedimento de cura 1 se mostrou ser o mais eficiente em relação aos demais (2 e 3) quando se busca maximizar a RCS e o M-CBR dos corpos de prova. Foi verificado através de análises de DRX e MEV que submeter os corpos de prova à carbonatação acelerada estimula a formação de compostos carbonatados na mistura, de maior dureza, sendo um dos motivos pelo qual o procedimento de cura 1 se destacou em relação aos demais procedimentos de cura quando foram avaliadas as propriedades mecânicas supracitadas;
- Das análises de DRX e MEV realizadas com amostras dosadas com ambos os solos, verificou-se que durante o período de exposição dos corpos de prova na câmara úmida, em todos os tratamentos, foi verificada a presença de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e de aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H). Esses compostos hidratados também são responsáveis por melhorar as propriedades

mecânicas das misturas, visto que são produtos de reações de hidratação, de maior dureza e que promovem a aglutinação das partículas das misturas;

- Embora a formação desses compostos hidratados ocorra em todos os procedimentos de cura, excepcionalmente para o procedimento de cura 1 os compostos carbonatados, formados a partir da exposição dos corpos de prova ao CO<sub>2</sub>, conferem às misturas um ganho de resistência adicional em relação às misturas submetidas aos demais procedimentos de cura, uma vez que tais compostos foram os responsáveis pelo acréscimo das propriedades avaliadas como consequência do preenchimento dos poros e do aumento da rigidez da matriz sólida por eles promovidos;
- A avaliação dos resultados de expansibilidade dos corpos de prova através da EM-CBR permitiu constatar que o procedimento de cura 3 é o mais eficiente quando comparado aos demais procedimentos de cura, independente da amostra de solo utilizada no preparo dos corpos de prova, o que foi associado à formação de compostos carbonatados durante a exposição da EAER à carbonatação antes da moldagem do corpo de prova. Tais compostos carbonatados, identificados nas análises de MEV e DRX, são volumetricamente estáveis e contribuem para os baixos valores de expansão;
- Para as misturas dosadas com amostras de solo C, verificou-se que o processo de carbonatação acelerada (cura1) promove o desenvolvimento de etringita com o aumento do tempo de exposição a este tratamento. Assim, a redução nos valores de RCS, M-CBR e MR ao longo do tempo dos corpos de prova dosados com solo C e submetidos ao procedimento de cura 1 foi atribuída à formação de etringita com o aumento do tempo de exposição à carbonatação;
- Para as amostras dosadas com solo C e submetidas aos procedimentos de cura 2 e 3, foi constatado que o aumento do tempo de cura aumenta significativamente a RCS dos corpos de prova. Para o M-CBR das misturas dosadas com a mesma amostra de solo, o tempo de cura não influencia significativamente nessa propriedade, independente do procedimento de cura. No que se refere a EM-CBR, o tempo de cura promove redução significativa da EM-CBR dos corpos de prova submetidos aos procedimentos de cura 1 e 2, visto que os corpos de prova submetidos ao procedimento de cura 3 apresentaram valores muito baixos e similares em todos os períodos de cura considerados;

- Quanto ao MR dos corpos de prova dosados com amostras de solo C, os resultados não permitem determinar o melhor tratamento, visto que, dependendo do nível de tensões atuantes no pavimento, um determinado procedimento de cura pode ser mais vantajoso que o outro;
- Para as misturas dosadas com amostras de solo V, os resultados dos ensaios mecânicos indicaram que o aumento do tempo de exposição aos procedimentos de cura exerce influência positiva na RCS dos corpos de prova submetidos a todos os procedimentos de cura, no M-CBR dos corpos de prova submetidos ao procedimento de cura 3, e na redução da EM-CBR dos corpos de prova do procedimento de cura 1;
- As análises de DRX e de MEV realizadas com amostras dos corpos de prova dosados com solo V não indicaram a formação de novos compostos hidratados e carbonatados com o aumento do tempo de cura, independentemente do procedimento de cura adotado. Assim, conclui-se que, para essas amostras, pode-se obter melhorias significativas nas propriedades mecânicas avaliadas com menores tempos de cura;
- Quanto ao MR dos corpos de prova dosados com amostras de solo V, verificou-se que o procedimento de cura 1 resultou nos maiores MR, indicando que esse é o melhor procedimento de cura quando se tem por objetivo a maximização do MR das misturas quando comparado aos demais procedimentos de cura, para todos os estados de tensões considerados. Quanto ao MR dos corpos de prova submetidos aos demais procedimentos de cura, assim com verificado para as misturas dosadas com solo C, os resultados não permitem determinar o melhor tratamento, visto que, dependendo do nível de tensões atuantes no pavimento, um determinado procedimento de cura pode ser mais vantajoso que o outro;

### Referências Bibliográficas

AL-AMOUDI, O. S. B., AL-HOMIDY, A. A., MASLEHUDDIN, M. & SALEH, T. A. Method and Mechanisms of Soil Stabilization Using Electric Arc Furnace Dust. **Scientific Reports**, 7, 46676, 2017.

ALDEEKY, H. & HATTAMLEH, O. A. Experimental Study on the Utilization of Fine Steel Slag on Stabilizing High Plastic Subgrade Soil. **Hindawi Advances in Civil Engineering**, v.2017, 11p, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9230279>.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO M145-91. Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. AASHTO, Washington, DC, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2487-17e1. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. D-5102 . “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures.” ASTM D5102, West Conshohocken, PA, 2009.

AMINI, O. & GHASEMI, M. Laboratory study of the effects of using magnesium slag on the geotechnical properties of cement stabilized soil. **Construction and Building Materials**, 223, 409-420, 2019.

ANDREAS, L.; DIENER, S.; LAGERKVIST, A. Steel slags in a landfill top cover – Experiences from a full-scale experiment. **Waste Management**, V. 34, 692-701, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.003>.

ASHANGO, A. A.; PATRA, N. R. Behavior of Expansive Soil Treated with Steel Slag, Rice Husk Ash, and Lime. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 28-7, 06016008, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001547.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6457. Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a, 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, 2016c, 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6459. Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016c, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6508. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7180. Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016d, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181. Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 12p, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182. Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016e, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004, 21p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11579 – MB-3432. Cimento Portland – determinação da finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (n° 200). Rio de Janeiro, 2012a. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12025 – MB 3361. Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2012b, 2p.

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, 2017, 4p.

AUTELITANO, F.; GIULIANI, F. Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 280-289, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.054>.

BACIOCCHI, R., COSTA, G., DI BARTOLOMEO, E., POLETTINI, A., POMI, R. Carbonation of stainless steel slag as a process for CO<sub>2</sub> storage and slag valorization. **Waste and Biomass Valorization** 1, 467–477, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9047-1>.

BOBICKI, E.R.; LIU, Q.; XU, Z.; ZENG, H. Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.38, 302-320p., 2012. doi:10.1016/j.pecs.2011.11.002

BONENFANT, D.; KHAROUNE, L.; SAUVÉ, S.; HAUSLER, R.; NIQUETTE, P.; MIMÉAULT, M. CO<sub>2</sub> sequestration potential of steel slags at ambient pressure and temperature. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. 47:7610e6, 2008.

CASTELLOTE, M., ALONSO, C., ANDRADE, C., TURRILLAS, X. & CAMPO, J. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement concrete research**, 34, 1633-1644, 2004.

DENELEE, D., DONY, A., COLIN, J., HERRIER, G. & LESUEUR, D. The carbonation of a lime-treated soil: experimental approach. **Materials and Structures**, 54, 21, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER–ME 228/94. Solos – compactação em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1994. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER–ME 254/97. Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão. Rio de Janeiro, 1997, 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER–CLA259/96. Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996b. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER–ME 256/94. Solos compactados em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 1994c. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER–ME 258/94. Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro, 1994b. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – PRO 003/94. Coleta de Amostras Deformadas de Solos. Rio de Janeiro, 1994a. 12p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Pavimentação. 3.ed. Rio de Janeiro, 2006, 274p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 134/2018 – ME. Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018a, 11p.

DHOBLE, Y.N., AHMED, S. Review on the innovative uses of steel slag for waste minimization. **J Mater Cycles Waste Manag** 20, 1373–1382, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0711-z>.

FRANCO, F. A. C. P. AEMC – Método de cálculo de tensões e deformações. Versão 2.4.1, jan. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1.5> Acesso em: 18 dez.2021.

GHOULEH, Z., GUTHRIE, R.I.L., SHAO, Y., 2015. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Constr. Build. Mater.** 99, 175–183, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>.

GURTUBAY, L; GALLASTEGUI, G; ELIAS, A; ROJO, N.; BARONA, A. Accelerated ageing of an EAF black slag by carbonation and percolation for long-term behaviour assessment. **Journal of Environmental Management**, v.140, p.45-50, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.011>

HOSSEN, S. K. B., GALLANT, A. P. & ASHRAF, W. Elemental Testing of Carbonated Silty Sand Treated with Lime. Geo-Congress 2020, 2020.

HOU, G., YAN, Z., SUN, J., NAGUIB, H.M., LU, B., ZHANG, Z.. Microstructure and mechanical properties of CO<sub>2</sub>-cured steel slag brick in pilot-scale. **Constr. Build. Mater.** 271, 121581, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121581>.

HUIJGEN, W.J.J.; WITKAMP, G-J.; COMANS, R.N.J. Mineral CO<sub>2</sub> sequestration by steel slag carbonation. **Environmental Science and Technology**, 39:9676e82, 2005.

IACOBESCU, R. I.; PONTIKES, Y.; KOUMPOURI, D.; ANGELOPOULOS, G.N. Synthesis, characterization and properties of calcium ferroaluminate belite cements produced with electric arc furnace steel slag as raw material. **Cement & Concrete Composites**, v. 44, p. 1-8, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.08.002>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 13320. Particle size analysis — Laser diffraction methods. Comitê: ISO/TC 24 Sieves, sieving and other sizing methods, 59p., 2020.

ISMAIL, A. I. M.; AWAD, S. A.; MWAIFY, M. A. G. The utilization of Electric Arc Furnace Slag in Soil Improvement. **Geotech. Geol. Eng.**, v. 37, p.401-411, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0619-3>.

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

KO, M-S.; CHEN, Y-L.; JIANG, J-H. Accelerated carbonation of basic oxygen furnace slag and the effects on its mechanical properties. **Construction and Building Materials**, V. 98, 286-293, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.051>.

LEKAKH, S.N.; RAWLINS, C.H.; ROBERTSON, D.G.C.; RICHARDS, V.L.; PEASLEE, K.D. Kinetics of aqueous leaching and carbonization of steelmaking slag. **Metallurgical and Materials Transactions B**;39B:125e34, 2008

LI, M., WANG, Q., YANG, J., GUO, X. & ZHOU, W. Strength and Mechanism of Carbonated Solidified Clay with Steel Slag Curing Agent. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 25, 805-821, 2021.

LISKA, M. Properties and applications of reactive magnesia cements in porous blocks. University of Cambridge, 2010.

MAHOUTIAN, M; GHOLEH, Z.; SHAO, Y. Carbon dioxide activated ladle slag binder. **Construction and Building Materials**, V. 66, 214 – 221, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.063>.

MANSO, J. M.; ORTEGA-LOPEZ, V.; POLANCO, J. A.; SETIÉN, J. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 126–134, 2013.

MARTINS, R. O. G.; RITA DE CÁSSIA, S.; PEDROTI, L. G.; DE OLIVEIRA, A. F.; MENDES, B. C. & DE AZEVEDO, A. R. G. Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test. **Construction Building Materials**, 159, 261-268, 2018.

MAYES, W.M., RILEY, A.L., GOMES, H.I., BRABHAM, P., HAMLYN, J., PULLIN, H., RENFORTH, P., Atmospheric CO<sub>2</sub> sequestration in iron and steel slag: Consett, County Durham, United Kingdom. **Environ. Sci. Technol.** 52, 7892–7900, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01883>.

MONTENEGRO, J. M.; CELEMÍN-MATACHANA, M.; CAÑIZAL, J.; SETIÉN, J. Ladle furnace slag in the construction of embankments: Expansive behavior. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 8, p. 972–979, 2013.

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. **Cement and Concrete Research**, v. 56, 153-170, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.015>.

O'CONNOR, J.; NGUYEN, T. B. T.; HONEYAND, T.; MONAGHAN, B.; O'DEA, D.; RINKLEBE, J.; VINU, A.; HOANG, S.A.; SINGH, G.; KIRKHAM, M.B.; BOLAN, N. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review. **Journal of Hazardous Materials**, V. 419, 126478, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126478>.

OLIVEIRA, J. D. A., RIBEIRO, J. C. L., PEDROTI, L. G., FARIA, C. S. D., NALON, G. H. & OLIVEIRA, A. L. D. Durability of concrete after fire through accelerated carbonation tests. **Materials Research**, 22, 2019.

PAN, S.-Y.; CHUNG, T.-C.; HO, C.-C.; HOU, C.-J.; CHEN, Y.-H.; CHIANG, P.-C. CO<sub>2</sub> mineralization and utilization using steel slag for establishing a waste-to-resource supply chain. **Sci. Rep.** 7, 1–11, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17648-9>.

PAPAYIANNI, I.; ANASTASIOU, E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, p. 400-407, 2012. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.015

PASETTO, M.; BALDO, N. Experimental analysis of hydraulically bound mixtures made with waste foundry sand and steel slag. **Materials and Structures**, v. 48, p. 2489-2503, 2015. DOI 10.1617/s11527-014-0333-4.

PEZO, Z. R.; CLAROS, G.; HUDSON, W. R. & STOKE, K. H. Development of a reliable resilient modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design. **Center for Transportation Research**, 1992.

QUAGHEBEUR, M.; NIELSEN, P.; HORCKMANS, L.; VAN MECHELEN, D. Accelerated carbonation of steel slag compacts: development of high-strength construction materials. **Front. Energy Res.** 3, 2015. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00052>.

SANNA, A.; DRI, M.; HALL, M.R.; MAROTO-VALER, M. Waste materials for carbon capture and storage by mineralisation (CCSM) - a UK perspective. **Appl Energy** 99:545–554, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.049>

SANTOS, R. M.; BOUWEL, J. V.; VANDEVELVE, E.; MERTENS, G.; ELSEEN, J.; GERVEN, T. V. Accelerated mineral carbonation of stainless-steel slags for CO<sub>2</sub> storage and

waste valorization: Effect of process parameters on geochemical properties. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, V. 17, 32-45, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.04.004>.

SIRIWARDENA, D.P. e PEETHAMPARAN, S. Quantification of CO<sub>2</sub> sequestration capacity and carbonation rate of alkaline industrial byproducts. **Construction and Building Materials**, VOL. 91, 216-224, 2015.

SONG, Q.; GUO, M-Z; WANG, L.; LING, T-C. Use of steel slag as sustainable construction materials: A review of accelerated carbonation treatment. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 173, 105740, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105740>.

SUER, P.; LINDQVIST, J-E.; ARM, M. FROGNER-KOCKUM, P. Reproducing ten years of road ageing — Accelerated carbonation and leaching of EAF steel slag. **Science of the Total Environment**, v.407, p.5110–5118, 2009. doi:10.1016/j.scitotenv.2009.05.039

TASTAN, E. O.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H.; AYDILEK, A. H. Stabilization of Organic Soils with Fly Ash. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 137, n° 9, p. 819-833, 2011. Doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000502.

TOSUN, T. e Baradan, B. Effect of ettringite morphology on DEF-related expansion, **Cem. Concr. Compos.**, v.32(4), p. 271–280, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.002>

UIBU, M.; KUUSIK, R.; ANDREAS, L.; KIRSIMÄE, K. The CO<sub>2</sub>-binding by Ca-Mg-silicates in direct aqueous carbonation of oil shale ash and steel slag. **Energy Procedia** 4:925–932, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.01.138>

VAN ZOMEREN, A.; VAN DER LAAN, S.R.; KOBESSEN, H.B.A.; HUIJGEN, W.J.J.; COMANS, R.N.J. Changes in mineralogical and leaching properties of converter steel slag resulting from accelerated carbonation at low CO<sub>2</sub> pressure. **Waste Manag.** 31, 2236–2244, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.022>.

VITALE, E., DENELEE, D., RUSSO, G. J. B. O. E. G. & ENVIRONMENT, T. Effects of carbonation on chemo-mechanical behaviour of lime-treated soils. 80, 2687-2700, 2021.

WANG, D; CHANG, J.; ANSARI, W.S. The effects of carbonation and hydration on the mineralogy and microstructure of basic oxygen furnace slag products. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 34, 87-98, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.06.001>.

WANG, G. Determination of the expansion force of coarse steel slag aggregate. **Construction and Building Materials**, v.24, p. 1961–1966, 2010.

WU, J., LIU, Q., DENG, Y., YU, X., FENG, Q. & YAN, C. Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways. **Soils Foundations**, 59, 955-965, 2019.

WORLD STEEL ASSOCIATION, 2020b. PRESS RELEASE – September 2020 crude steel production. Belgium, Brussel, 2020.

XU, L., ZHA, F., LIU, C., KANG, B., LIU, J. & YU, C. J. A. I. C. E. Experimental investigation on carbonation behavior in lime-stabilized expansive soil, 2020.

YADAV, S., MEHRA, A. Experimental study of dissolution of minerals and co2 sequestration in steel slag. **Waste Manage.** 64, 348–357, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.032>.

YADAV, S., MEHRA, A. A review on ex situ mineral carbonation. **Environmental Science and Pollution Research**, 28:12202–12231, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12049-4>

YANG, Y., REIJONEN, I., YU, H., DHARMARAJAN, R., SESHADRI, B., BOLAN, N.S. Back to basic slags as a phosphorous source and liming material. In: Soil Amendments For Sustainability: Challenges and Perspectives. CRC Press, Taylor & Francis Group, USA, 2018.

YILDIRIM, I.Z., PREZZI, M., Program, J.T.R. Use of Steel Slag in Subgrade Applications Joint. Transportation Research Program: Final Report. FHWA/IN/JTRP-2009/32, SPR-3129. West Lafayette, USA, 2009.

YILDIRIM, I., PREZZI, M. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. **Adv. Civ. Eng.**, 1–13, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/463638>.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Experimental evaluation of EAF ladle steel slag as a geo-fill material: Mineralogical, physical & mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 23–33, 2017.

YI, Y-R.; LIN, Y.; DU, Y-C.; BAI, S-Q.; MA, Z-L.; CHEN, Y-G. Accelerated carbonation of ladle furnace slag and characterization of its mineral phase. **Construction and Building Materials**, V. 276, 122235, 2021.

YI, Y., LISKA, M. & AL-TABBAA, A. Properties of Two Model Soils Stabilized with Different Blends and Contents of GGBS, MgO, Lime, and PC. 26, 267-274, 2014

ZHANG, H., HONG, X. An overview for the utilization of wastes from stainless steel industries. **Resour. Conserv. Recycl.** 55, 745–754, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.005>

## CAPÍTULO 4: Conclusões e recomendações

### 4.1. Conclusões gerais

Com base nos estudos apresentados nos capítulos anteriores, apresentam-se as seguintes conclusões:

- A adição de escória de aciaria elétrica redutora em misturas com solos, seja de forma isolada ou de forma combinada com cinza volante, promoveu as melhorias nas propriedades mecânicas (RCS, MR e ISC) dos solos analisados. Essa constatação destaca o potencial técnico do material como agente estabilizante químico de solo voltado para área de pavimentação;
- Quanto ao método Simplex-Centroide, este se mostrou uma ferramenta eficaz para a otimização da dosagem de misturas entre solos-escória de aciaria elétrica redutora-cinza volante. Através do referido método pôde-se obter modelos matemáticos capazes de descrever, com relevância estatística, as propriedades mecânicas analisadas, e otimizar a dosagem da mistura com base em critérios pré-definidos. Assim, independentemente dos critérios considerados nas análises, o método é capaz de se adaptar e fornecer a dosagem da mistura que atenda às necessidades do projetista ou usuário;
- As misturas experimentais otimizadas não atenderam em sua totalidade aos critérios pré-definidos nessa pesquisa, uma vez que no primeiro estudo foi considerada a otimização simultânea de três propriedades mecânicas e uma de expansibilidade nas análises estatísticas. Entretanto, visto que as misturas otimizadas atendem de forma parcial aos critérios definidos nesta pesquisa, dependendo do parâmetro utilizado no projeto das camadas estruturais de um pavimento, tais misturas podem ser utilizadas na construção de camadas estruturais de pavimentos;
- Através da técnica de carbonatação acelerado pôde-se constatar que a carbonatação das misturas entre solo-EAER tende a melhorar a resposta mecânica (RCS, MR e M-CBR) dessas misturas em longo prazo. Além de proporcionar melhorias das propriedades mecânicas das misturas, a carbonatação das misturas entre solo-EAER promove a redução da expansão das misturas em longo prazo;

- A composição química, mineralógica e microestrutural das escórias deve ser analisada previamente à sua aplicação como agente estabilizante químico de solos, considerando ou não a submissão da mistura ao processo de carbonatação. Essa conclusão é proveniente das constatações relacionadas às amostras de solo C submetidas à carbonatação acelerada, nas quais verificou-se o desenvolvimento de estruturas como a etringita durante seu tempo de exposição aos procedimentos de cura. O desenvolvimento de etringita acredita-se que tenha sido o responsável pela redução das propriedades mecânicas do produto. Assim, visto que a redução das propriedades mecânicas do material pode ocasionar impactos deletérios em pavimentos, as propriedades químicas, mineralógicas e microestruturas, tanto das amostras de solos quanto das amostras de escória de aciaria elétrica, devem ser analisadas antes de sua aplicação em obras de pavimentação;

#### **4.2. Recomendações de estudos futuros**

Visando a complementação dos resultados obtidos nesta pesquisa e preencher algumas lacunas não abordadas nos estudos apresentados nos capítulos anteriores, seguem algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Realizar o mesmo procedimento adotado no capítulo 2 desse estudo abrangendo maiores teores de escória de aciaria elétrica redutora e de cinza volante na composição das misturas experimentais. Essa abordagem tem como propósito definir uma região fechada no diagrama da rede Simplex-Centroide na qual mais de uma mistura (diferentes dosagens) atenda aos pré-requisitos estabelecidos;
- Avaliar as propriedades mecânicas e de expansibilidade da escória de aciaria elétrica redutora de forma isolada e abrangendo diferentes composições granulométricas, com o propósito de se eliminar o processo de redução granulométrica utilizado nesse trabalho, visando reduzir custos relacionados ao tratamento prévio desse material e estimular a reutilização de um volume maior desse material;
- Avaliação de técnicas capazes de reproduzir, em campo, a técnica de carbonatação acelerada;

- Estudar a composição de custos inerentes à implementação da técnica de carbonatação acelerada em larga escala em campo e nos pátios de estocagem desses materiais;
- Estudos relacionados à quantificação da capacidade de sequestro de CO<sub>2</sub> através da carbonatação aceleradas de misturas solo-EAER e da EAER de forma isolada, como forma de estimular o desenvolvimento e otimização da técnica, tendo em vista os pontos positivos relacionados ao crescente mercado de sequestro de carbono.