

KLAUS HENRIQUE DE PAULA RODRIGUES

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS
TROPICAIS PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO**

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

Orientador: Taciano Oliveira da Silva

Coorientador: Heraldo Nunes Pitanga

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

T

R696u
2022

Rodrigues, Klaus Henrique de Paula, 1991-
Utilização de resíduos industriais na estabilização de solos
tropicais para aplicação em pavimentação / Klaus Henrique de
Paula Rodrigues. – Viçosa, MG, 2022.
1 tese eletrônica (230 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Taciano Oliveira da Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.209>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos – Estabilidade. 2. Estabilidade estrutural.
3. Resíduos industriais. 4. Escória (Metalurgia). 5. Cinza volante.
6. Análise estrutural (Engenharia). 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: Bruna Silva CRB6/2552

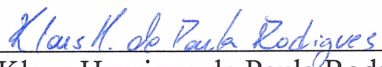
KLAUS HENRIQUE DE PAULA RODRIGUES

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS
TROPICAIS PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO**

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

APROVADA: 11 de março de 2022

Assentimento:



Klaus Henrique de Paula Rodrigues
Autor



Taciano Oliveira da Silva
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por me conceder a mais incrível de todas as experiências, a vida; por sempre me encantar com suas criações desde o imenso universo até a menor partícula visível.

Ao meu querido Jesus, por ter se entregado em meu lugar.

Ao Espírito Santo, que me transforma a cada dia em uma pessoa melhor.

À minha esposa Camila, por me impulsionar nos momentos mais difíceis.

Aos meus filhos Beatriz e Kaleb, por encantar os meus dias aqui na Terra.

A todos os meus familiares, por sempre estarem presentes, me incentivando e me auxiliando emocionalmente.

À UFV, por ter me proporcionado essa incrível experiência, e a todos os colegas, tanto de laboratório quanto de disciplinas, que a realizaram comigo, em especial àqueles que participaram do grupo Infratest.

Aos professores Taciano Oliveira da Silva, Heraldo Nunes Pitanga e Leonardo Gonçalves Pedroti, por todo apoio técnico, orientação, críticas, companheirismo e direcionamento fornecidos durante a pesquisa.

Aos professores Guilherme Jorge Brigolini Silva e José Maria Franco de Carvalho, pelas preciosas contribuições ao longo do trabalho.

Ao professor Mario Sergio de Souza Almeida, pela disponibilidade e contribuição na fase final da pesquisa.

Ao Giovani Levi Sant'Anna, pelo companheirismo e contribuição na fase final da pesquisa.

Ao Mateus Henrique Ribeiro Rodrigues, pelo companheirismo e amizade durante todo o tempo de pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV, por todo o conhecimento transmitido.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de continuar trilhando minha carreira acadêmica.

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

RESUMO

RODRIGUES, Klaus Henrique de Paula, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2022. **Utilização de Resíduos Industriais na Estabilização de Solos Tropicais para Aplicação em Pavimentação**. Orientador: Taciano Oliveira da Silva. Coorientador: Heraldo Nunes Pitanga.

O crescimento populacional mundial, aliado à urbanização e à industrialização, especialmente em regiões metropolitanas, tem fomentado um crescimento considerável nas atividades de construção, aumentando a disposição de resíduos no meio físico. Uma possível solução para a minimização do impacto causado pela disposição dos resíduos no meio ambiente é a sua incorporação em solos, a fim de promover melhorias nas propriedades destes e contribuir para o desenvolvimento sustentável. Apesar da existência de estudos abordando a eficácia do uso de resíduos industriais como agentes estabilizantes de solos para fins de engenharia de pavimentação, ainda não há um método fundamentado em planejamentos experimentais para a determinação de dosagens otimizadas desses materiais não convencionais em misturas com solos. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a viabilidade técnica da utilização dos resíduos “escória de aciaria elétrica primária (EAEP)” e “cinza volante” como agentes estabilizadores de solos, visando sua aplicação em camadas estruturais de pavimentos. Foram utilizadas duas amostras de solo, uma argilosa e uma arenosa, provenientes da microrregião de Viçosa-MG. Um estudo para se determinar a melhor mistura solo-EAEP-cinza volante foi realizado através da metodologia de planejamento experimental em rede simplex-centróide, utilizando como variáveis de resposta as propriedades mecânicas representadas pela resistência à compressão simples (RCS), o índice CBR e o módulo de resiliência (MR). Observou-se que a melhor dosagem (mistura ótima) foi a que possuía a maior quantidade de EAEP estabelecida no planejamento experimental, resultando na mistura com 80% de solo, 20% de EAEP e 0% de cinza volante, para ambas as amostras de solo e para as três camadas estruturais consideradas, a saber, reforço de subleito, sub-base e base. O aumento na magnitude de todas as propriedades mecânicas analisadas foi atribuído às trocas catiônicas e principalmente à formação de compostos cimentícios. Por possuir alta porcentagem de cálcio em sua constituição, a EAEP em contato com o solo promove não apenas a formação de compostos cimentícios, mas também a carbonatação. Diante do estudo sobre a influência da carbonatação em solos estabilizados, verificou-se a ausência de um estudo que avalie a influência da carbonatação em misturas solo-

EAEP, com a finalidade de utilizá-las em camadas estruturais de pavimentos asfálticos. O efeito da carbonatação nas misturas solo-EAEP foi avaliado considerando-se a durabilidade desse tipo de mistura. Observou-se que a formação de carbonato de cálcio melhorou o desempenho das misturas solo-EAEP, maximizando suas resistência e rigidez medidas através dos ensaios de RCS, índice mini-CBR e de MR. Adicionalmente, ainda não há na literatura técnica estudos que avaliaram os efeitos da carbonatação de misturas solo-EAEP no comportamento resiliente e de seu consequente impacto na avaliação estrutural de um pavimento asfáltico. Diante dessa lacuna, foi avaliado o impacto da carbonatação sobre as características resilientes da mistura solo-EAEP ótima através de análises estruturais realizadas por meio do *software* AEMC sobre um pavimento de anteprojeto cuja camada de subleito era constituída por essa mistura. Observou-se que o aumento nos valores de MR gerado pela formação de carbonato de cálcio promoveu uma diminuição das deflexões no topo do revestimento asfáltico, da deformação vertical no topo do subleito e da deformação horizontal de tração na fibra inferior dessa mesma camada, reduzindo, portanto, o efeito dos danos causados por afundamento plástico nas trilhas de roda e por trincamento por fadiga, aumentando a vida de serviço do pavimento. A aplicação da EAEP na estabilização de solos tropicais de baixa capacidade de suporte mostrou-se uma alternativa viável técnica e ambientalmente, pois proporcionou uma melhoria das propriedades mecânicas avaliadas, possibilitando seu emprego em obras de pavimentação, além de contribuir com o meio ambiente.

Palavras-chave: Estabilização de solos. Resíduos industriais. Escória de aciaria elétrica primária. Cinza volante. Carbonatação. Análise estrutural.

ABSTRACT

RODRIGUES, Klaus Henrique de Paula, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2022.
Use of Industrial Waste in the Stabilization of Tropical Soils for Application in Paving.
Advisor: Taciano Oliveira da Silva. Co-advisor: Heraldo Nunes Pitanga.

World population growth, combined with urbanization and industrialization, especially in metropolitan regions, has fostered considerable growth in construction activities, increasing the disposal of waste in the physical environment. A possible solution for minimizing the impact caused by the disposal of waste on the environment is its incorporation into soils, in order to promote improvements in their properties and contribute to sustainable development. Despite the existence of studies addressing the effectiveness of the use of industrial waste as soil stabilizing agents for paving engineering purposes, there is still no method based on experimental designs for the determination of optimized dosages of these unconventional materials in soil mixtures. In this context, the aim of this research was to evaluate the technical feasibility of using waste “electric arc furnace slag (EAFS)” and “fly ash” as soil stabilizing agents, aiming at their application in structural layers of pavements. Two soil samples were used, one clayey and one sandy, from the micro-region of Viçosa-MG. A study to determine the best soil-EAFS-fly ash mixture was carried out through the methodology of experimental design in a simplex-centroid network, using as response variables the mechanical properties represented by the unconfined compressive strength (UCS), the CBR index and the resilient modulus (RM). It was observed that the best dosage (optimal mixture) was the one that had the highest amount of EAFS established in the experimental design, resulting in a mixture with 80% soil, 20% EAFS and 0% fly ash, for both samples of soil and for the three structural layers considered, namely, subgrade reinforcement, subbase and base. The increase in the magnitude of all mechanical properties analyzed was attributed to cationic exchanges and mainly to the formation of cementitious compounds. As it has a high percentage of calcium in its constitution, EAFS in contact with the soil promotes not only the formation of cementitious compounds, but also carbonation. The effect of carbonation on soil-EAFS mixtures was evaluated considering the durability of this type of mixture. It was observed that the formation of calcium carbonate improved the performance of soil-EAFS mixtures, maximizing their strength and stiffness measured through UCS, mini-CBR index and RM tests. Additionally, there are no studies in the technical literature that evaluated the effects of carbonation of soil-EAFS mixtures on the

resilient behavior and its consequent impact on the structural evaluation of an asphalt pavement. In view of this gap, the impact of carbonation on the resilient stiffness of the optimal soil-EAFS mixture was evaluated through structural analyzes carried out using the AEMC software on a draft pavement whose subgrade layer was constituted by this mixture. It was observed that the increase in MR values generated by the formation of calcium carbonate promoted a decrease in the deflections at the top of the asphalt layer, in the vertical strain at the top of the subgrade and in the horizontal tensile strain in the lower fiber of the asphalt layer, reducing, therefore, the effect of damage caused by rutting and fatigue cracking increasing the service life of the pavement. The application of EAFS in the stabilization of tropical soils with low bearing capacity proved to be a technically and environmentally viable alternative, as it provided an improvement in the evaluated mechanical properties, enabling its use in paving works, in addition to contributing to the environment.

Keywords: Soil stabilization. Industrial waste. Electric arc furnace slag. Carbonation. Structural analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Curvas granulométricas das amostras de solo S1 e S2.	47
Figura 2.2: Difratomogramas das amostras de solo S1(a) e S2 (b) obtidos por DRX.....	48
Figura 2.3: Micrografias da amostra de solo S1 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.....	49
Figura 2.4: Micrografias da amostra de solo S2 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.....	49
Figura 2.5: Análise termogravimétrica das amostras de solos S1 (a) e S2 (b).....	50
Figura 2.6: Curva granulométrica da amostra de EAEP moída.	52
Figura 2.7: Difrátograma da amostra de EAEP obtida por DRX.	53
Figura 2.8: Micrografias da amostra de EAEP obtidas por MEV: (a)x160, (b)x300, (c)x650 e (d)x1.800.	54
Figura 2.9: Análise termogravimétrica da amostra de EAEP.....	55
Figura 2.10: Curva granulométrica da amostra de cinza volante.	56
Figura 2.11: Difrátograma da amostra de cinza volante obtida por DRX.....	57
Figura 2.12: Micrografias de amostra de cinza volante obtidas por MEV: (a)x100 e (b)x3.000.	57
Figura 2.13: Análise termogravimétrica da amostra de cinza volante.	58
Figura 2.14: Fluxograma do procedimento do método simplex-centróide para otimização de planejamento experimental de misturas.	59
Figura 2.15: Planejamento experimental das misturas.	60
Figura 2.16: Pavimento utilizado para determinação do estado de tensões em cada camada [adaptado de Nega e Nikraz (2017)]......	63

Figura 2.17: Resistência à compressão simples (RCS) das misturas e amostras de solo analisadas.....	70
Figura 2.18: Resultados de MR para as misturas solo-resíduos referentes à camada de reforço de subleito.....	72
Figura 2.19: Resultados de MR para as misturas solo-resíduos referentes à camada de sub-base.....	73
Figura 2.20: Resultados de MR para as misturas solo-resíduos referentes à camada de base.	73
Figura 2.21: Índice CBR das misturas e amostras de solo analisadas.	74
Figura 2.22: Expansão CBR das misturas e amostras de solo analisadas.	75
Figura 2.23: Superfícies de resposta para a RCS das misturas solo-resíduos: (a) amostra de solo S1; (b) amostra de solo S2.....	76
Figura 2.24: Superfícies de resposta de MR das misturas solo-resíduos referente à camada de reforço de subleito: (a) amostra de solo S1; (b) amostra de solo S2.	78
Figura 2.25: Superfícies de resposta de MR das misturas solo-resíduos referente à camada de sub-base: (a) amostra de solo S1; (b) amostra de solo S2.	79
Figura 2.26: Superfícies de resposta de MR das misturas solo-resíduos referente à camada de base: (a) amostra de solo S1; (b) amostra de solo S2.	80
Figura 2.27: Superfícies de resposta de índice CBR das misturas solo-resíduos: (a) amostra de solo S1; (b) amostra de solo S2.	81
Figura 2.28: Gráficos de desejabilidade composta para a amostra de solo S1: (a) reforço de subleito; (b) sub-base; (c) base.	82
Figura 2.29: Gráficos de desejabilidade composta para a amostra de solo S2: (a) reforço de subleito; (b) sub-base; (c) base.	83
Figura 2.30: Micrografias da mistura ótima para a amostra de solo S1 obtida por MEV: (a)x10.000; (b)x20.000.	87
Figura 2.31: Difratoograma da mistura ótima obtida por DRX para a amostra de solo S1.	88

Figura 2.32: Micrografias da mistura ótima para a amostra de solo S2 obtida por MEV: (a)x10.000; (b)x10.000.....	89
Figura 2.33: Difratoograma da mistura ótima obtida por DRX para a amostra de solo S2.	89
Figura 3.1: Curvas granulométricas das amostras de solo S1 e S2 e da amostra de EAEP moída.	123
Figura 3.2: Difratoogramas das amostras de solo S1(a), S2 (b) e da amostra de EAEP obtidos por DRX.....	125
Figura 3.3: Micrografias da amostra de solo S1 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.....	126
Figura 3.4: Micrografias da amostra de solo S2 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.....	127
Figura 3.5: Micrografias da amostra de EAEP obtidas por MEV: (a)x160 e (b)x1.800.	127
Figura 3.6: Análise termogravimétrica das amostras de solos S1 (a) e S2 (b) e da EAEP (c).	128
Figura 3.7: Croqui e imagem das câmaras de carbonatação acelerada. Fonte: MARTINS <i>et al.</i> (2018).	132
Figura 3.8: Pavimento utilizado para determinação do estado de tensões em cada camada [adaptado de Nega e Nikraz (2017)]......	134
Figura 3.9: Curvas de compactação das amostras de solos (S1 e S2) e de suas misturas com EAEP (S1E e S2E).	136
Figura 3.10: Resistência à compressão simples (RCS) das misturas em função do tipo e do tempo de cura.....	137
Figura 3.11: Índice mini-CBR das misturas em função do tipo e do tempo de cura.....	139
Figura 3.12: Expansão mini-CBR das misturas em função do tipo e do tempo de cura.	141
Figura 3.13: Gráficos do modelo composto para: (a) amostra de solo S1; (b) amostra de solo S2; (c) mistura solo S1-EAEP 1-7d; (d) mistura solo S2-EAEP 1-7d.	143

Figura 3.14: Resultados de MR para a camada de reforço de subleito.	144
Figura 3.15: Resultados de MR para a camada de sub-base.	144
Figura 3.16: Resultados de MR para a camada de base.	144
Figura 3.17: Frente de carbonatação para a mistura com solo S1 sob condição de cura 1: (a) momento da troca entre as câmaras; (b) aos 35 dias de cura.	146
Figura 3.18: Frente de carbonatação para a mistura com solo S2 sob condição de cura 1: (a) momento da troca entre as câmaras; (b) aos 35 dias de cura.	147
Figura 3.19: Frente de carbonatação para a mistura com solo S1 sob condição de cura 4: (a) aos 35 dias de cura; (b) aos 42 dias de cura; (c) aos 56 dias de cura.	147
Figura 3.20: Frente de carbonatação para a mistura com solo S2 sob condição de cura 4: (a) aos 35 dias de cura; (b) aos 42 dias de cura; (c) aos 56 dias de cura.	148
Figura 3.21: Valores de pH das misturas em função do tipo e do tempo de cura.	149
Figura 3.22: Micrografias da mistura solo S1-EAEP obtida por MEV no processo de cura 1: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.	151
Figura 3.23: Micrografias da mistura solo S2-EAEP obtida por MEV no processo de cura 1: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.	152
Figura 3.24: Difrátogramas da mistura solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 1, por DRX: 35 dias de cura, 42 dias de cura e 56 dias de cura.	153
Figura 3.25: Difrátogramas da mistura solo S2-EAEP, submetida ao processo de cura 1, por DRX: 35 dias de cura, 42 dias de cura e 56 dias de cura.	153
Figura 3.26: Micrografias da mistura solo S1-EAEP obtida por MEV no processo de cura 2: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.	154
Figura 3.27: Micrografias da mistura solo S2-EAEP obtida por MEV no processo de cura 2: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x5.000.	155

Figura 3.28: Difratoograma da mistura solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 2, por DRX.....	156
Figura 3.29: Difratoograma da mistura solo S2-EAEP, submetida ao processo de cura 2, por DRX.....	156
Figura 3.30: Micrografias da mistura solo S1-EAEP obtida por MEV no processo de cura 3: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 5.000; (d) 56 dias de cura, x10.000.	157
Figura 3.31: Micrografias da mistura solo S2-EAEP obtida por MEV no processo de cura 3: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 5.000; (d) 56 dias de cura, x10.000.	158
Figura 3.32: Difratoograma da mistura solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 3, por DRX.....	159
Figura 3.33: Difratoograma da mistura solo S2-EAEP, submetida ao processo de cura 3, por DRX.....	159
Figura 3.34: Micrografias da mistura solo S1-EAEP obtida por MEV no processo de cura 4: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.	160
Figura 3.35: Micrografias da mistura solo S2-EAEP obtida por MEV no processo de cura 4: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.	161
Figura 3.36: Difratoograma da mistura solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 4, por DRX.....	162
Figura 3.37: Difratoograma da mistura solo S2-EAEP, submetida ao processo de cura 4, por DRX.....	162
Figura 3.38: Porcentagem de cal livre nas amostras de solo S1 e S2 e suas misturas com EAEP.	163
Figura 4.1: Curvas granulométricas das amostras de solo S1 e S2 e da EAEP.....	189
Figura 4.2: Difratoogramas das amostras de solo S1(a), S2 (b) e da amostra de EAEP (c) obtidos por DRX.	191

Figura 4.3: Micrografias da amostra de solo S1 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.....	193
Figura 4.4: Micrografias da amostra de solo S2 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.....	193
Figura 4.5: Micrografias da amostra de EAEP obtidas por MEV: (a)x160 e (b)x1.800.....	193
Figura 4.6: Análise termogravimétrica das amostras de solos S1 (a) e S2 (b) e da EAEP (c).	195
Figura 4.7: Croqui e imagem das câmaras de carbonatação acelerada. Fonte: Martins <i>et al.</i> (2018).	198
Figura 4.8: Estrutura do pavimento de anteprojeto.	199
Figura 4.9: Sistema de coordenadas utilizado pelo <i>software</i> AEMC.....	201
Figura 4.10: Pontos para análise de tensão-deformação.....	202
Figura 4.11: Curvas de compactação das amostras de solos (S1 e S2) e de suas misturas com EAEP (S1E e S2E).	204
Figura 4.12: Micrografias da mistura solo S1-EAEP obtida por MEV no processo de cura 1: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.	211
Figura 4.13: Micrografias da mistura solo S2-EAEP obtida por MEV no processo de cura 1: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.	212
Figura 4.14: Difratomogramas da mistura solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 1, por DRX: 35 dias de cura, 42 dias de cura e 56 dias de cura.....	213
Figura 4.15: Difratomogramas da mistura solo S2-EAEP, submetida ao processo de cura 1, por DRX: 35 dias de cura, 42 dias de cura e 56 dias de cura.....	213
Figura 4.16: Micrografias da mistura solo S1-EAEP obtida por MEV no processo de cura 2: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 5.000; (d) 56 dias de cura, x10.000.	214

Figura 4.17: Micrografias da mistura solo S2-EAEP obtida por MEV no processo de cura 2: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 5.000; (d) 56 dias de cura, x10.000.215

Figura 4.18: Difratoograma da mistura solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 2, por DRX.....216

Figura 4.19: Difratoograma da mistura solo S2-EAEP, submetida ao processo de cura 2, por DRX.....216

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composições químicas de EAEPs oriundas de estudos prévios.....	39
Tabela 2.2: Composições químicas de cinzas volantes oriundas de estudos prévios.....	40
Tabela 2.3: Teores de EAEP e cinza volante em estabilização de solos.....	41
Tabela 2.4: Caracterização e classificação geotécnicas das amostras de solo analisadas.....	46
Tabela 2.5: Composição química obtida por FRX e perda ao fogo das amostras de solos S1 e S2.....	47
Tabela 2.6: Elementos químicos presentes nas amostras de solo S1 e S2.....	49
Tabela 2.7: Composição química e perda ao fogo de amostra de EAEP.....	52
Tabela 2.8: Elementos químicos presentes na amostra de EAEP.....	54
Tabela 2.9: Composição química e perda ao fogo da amostra de cinza volante.....	56
Tabela 2.10: Elementos químicos presentes na amostra de cinza volante.....	57
Tabela 2.11: Misturas solo-resíduos definidas no planejamento experimental.....	60
Tabela 2.12: Concentrações dos elementos nos extratos lixiviados.....	66
Tabela 2.13: Concentrações dos elementos nos extratos solubilizados.....	66
Tabela 2.14: Parâmetros de ótimo das misturas analisadas para as duas amostras de solo analisadas.....	67
Tabela 2.15: Propriedades mecânicas e Expansão CBR das misturas e amostras de solo analisadas.....	69
Tabela 2.16: Tensões atuantes devido ao eixo padrão nas camadas estruturais do pavimento de Nega e Nikraz (2017).....	71

Tabela 2.17: Coeficientes de regressão e coeficientes de determinação do modelo composto para as misturas solo-resíduos analisadas.....	72
Tabela 2.18: Equações referentes às superfícies de resposta de RCS.	77
Tabela 2.19: Equações referentes às superfícies de resposta de MR para a camada de reforço de subleito.	78
Tabela 2.20: Equações referentes às superfícies de resposta de MR para a camada de sub-base.	79
Tabela 2.21: Equações referentes às superfícies de resposta de MR para a camada de base...	80
Tabela 2.22: Equações referentes às superfícies de resposta de índice CBR.....	81
Tabela 2.23: Valores de desejabilidade referentes às misturas ótimas para as propriedades analisadas.....	84
Tabela 2.24: Caracterização geotécnica e classificação MCT dos solos S1 e S2 e das suas respectivas misturas ótimas.	86
Tabela 3.1: Composições químicas de EAEPs oriundas de estudos prévios.....	117
Tabela 3.2: Resumo dos resultados da caracterização e classificação das amostras de solo analisadas.....	122
Tabela 3.3: Composição química obtida por FRX e perda ao fogo das amostras de solos S1 e S2 e da amostra de EAEP moída.	124
Tabela 3.4: Elementos químicos presentes nas amostras de solo S1 e S2.....	127
Tabela 3.5: Tensões atuantes devido ao eixo padrão nas camadas estruturais do pavimento de Nega e Nikraz (2017).	134
Tabela 3.6: Coeficientes de regressão e coeficientes de determinação do modelo composto para as misturas solo-resíduos analisadas.	142
Tabela 4.1: Resumo dos resultados da caracterização e classificação geotécnicas das amostras de solo analisadas.	188

Tabela 4.2: Resultados da caracterização física da amostra de EAEP moída.	190
Tabela 4.3: Composição química obtida por FRX e perda ao fogo das amostras de solos S1 e S2 e da EAEP.	190
Tabela 4.4: Elementos químicos presentes nas amostras de solo S1 e S2 e de EAEP.	194
Tabela 4.5: Características dos materiais das camadas do pavimento de anteprojeto.	199
Tabela 4.6: Coordenadas cartesianas dos pontos para análise tensão-deformação.	202
Tabela 4.7: Equações e coeficientes utilizados para a realização da previsão do número N_{adm}	203
Tabela 4.8: Valores de MR médio para as amostras de solo e suas misturas com EAEP.	205
Tabela 4.9: Análise estrutural para do pavimento de anteprojeto considerando a amostra de solo S1.	206
Tabela 4.10: Análise estrutural para do pavimento de anteprojeto considerando a amostra de solo S2.	206
Tabela 4.11: Análise estrutural para do pavimento com 14 cm de revestimento e 20 cm de base e sub-base para a amostra de solo S1 como subleito.	208
Tabela 4.12: Análise estrutural para do pavimento com 15 cm de revestimento e 20 cm de base e sub-base para a amostra de solo S2 como subleito.	208
Tabela 4.13: Análise estrutural para do pavimento com 15 cm de revestimento e 20 cm de base (MR = 350 MPa) e sub-base para a amostra de solo S1 como subleito.	209
Tabela 4.14: Análise estrutural para do pavimento com 15 cm de revestimento e 20 cm de base (MR = 350 MPa) e sub-base para a amostra de solo S2 como subleito.	209

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BR	Borda da roda
C-A-H	Aluminato de Cálcio Hidratado
C-A-S-H	Alumino-Silicato de Cálcio Hidratado
CBR	California Bearing Ratio
CLA	Classificação
CNT	Confederação Nacional do Transporte
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de Raios-X
DTG	Termogravimetria Derivada
EAEP	Escória de Aciaria Elétrica Primária
ECR	Eixo central da roda
Ex	Deformação horizontal na fibra inferior do revestimento asfáltico
FRX	Fluorescência de Raios-X
IP	Índice de Plasticidade
ISO	International Organization for Standardization
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MCV	Moisture Condition Value
ME	Método de ensaio
MEPDG	Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MR	Módulo de resiliência
NBR	Norma técnica brasileira
NM	Níveis de Normalização
PF	Perda ao Fogo

pH	Potencial hidrogeniônico
PRO	Procedimento
R ²	Coefficiente de determinação
RCS	Resistência à Compressão Simples
RM	Resilient Modulus
S1, S2	Amostras de solo
TGA	Análise Termogravimétrica
TRB	Transportation Research Board
UCS	Unconfined Compressive Strength
USACE	United States Army Corps of Engineers
USC	Unified Soil Classification
Uz	Deflexão no topo do revestimento asfáltico
k ₁ , k ₂ , k ₃	Coefficientes de regressão do módulo de resiliência
W _{ot}	Teor de umidade ótimo
ε _v	Deformação vertical no topo do subleito
ε _t	Deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento
γ _d	Peso específico aparente seco
γ _{dmax}	Peso específico aparente seco máximo
ρ _s	Massa específica dos grãos
σ ₃	Tensão confinante
σ _d	Tensão desvio
#	Abertura de malha das peneiras

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	24
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO OBJETO DE PESQUISA	24
1.2. OBJETIVOS.....	28
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	29
REFERÊNCIAS	30
2. OTIMIZAÇÃO DE DOSAGENS DE MISTURAS SOLO-EAEP-CINZA VOLANTE ATRAVÉS DO MÉTODO SIMPLEX.....	35
2.1. INTRODUÇÃO.....	37
2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
2.3. MATERIAIS E MÉTODOS	45
2.3.1. Materiais	45
2.3.1.1. Solos	45
2.3.1.2. Escória de aciaria elétrica primária	50
2.3.1.3. Cinza volante	55
2.3.2. MÉTODOS	58
2.3.2.1. Caracterização ambiental das amostras de EAEP e cinza volante	58
2.3.2.2. Método simplex-centróide.....	58
2.3.2.2.1. Planejamento experimental.....	59
2.3.2.2.2. Ensaio de compactação.....	61
2.3.2.2.3. Moldagem de corpos de prova dos ensaios de desempenho	61
2.3.2.2.4. Resistência à compressão simples	61
2.3.2.2.5. Módulo de resiliência	61
2.3.2.2.6. Índice CBR	63
2.3.2.2.7. Otimização através da função desejabilidade.....	64
2.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
2.4.1. Caracterização ambiental.....	65
2.4.2. Método de planejamento experimental em rede simplex-centróide.....	67
2.4.2.1. Ensaio de compactação	67
2.4.2.2. Propriedades mecânicas analisadas	69

2.4.2.3. Otimização das propriedades mecânicas analisadas através da função desejabilidade	76
2.4.2.3.1. Superfícies de resposta para RCS.....	76
2.4.2.3.2. Superfícies de resposta para MR	77
2.4.2.3.2.1. Superfície de resposta de MR referente à camada de reforço de subleito	77
2.4.2.3.2.2. Superfície de resposta de MR referente à camada de sub-base.....	78
2.4.2.3.2.3. Superfície de resposta de MR referente à camada de base.....	79
2.4.2.3.3. Superfícies de resposta para índice CBR.....	80
2.4.2.3.4. Determinação da dosagem ótima através da função desejabilidade.....	81
2.4.2.3.5. Caracterização geotécnica das misturas ótimas.....	85
2.4.3. Influências físico-química, mineralógica e microestrutural no comportamento de resistência das misturas solo-resíduos	87
2.4.3.1.1. Estabilização da mistura ótima para a amostra de solo S1	87
2.4.3.1.2. Estabilização da mistura ótima para a amostra de solo S2	88
2.5. CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS	92
3. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS SOLO-ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA PRIMÁRIA SOB CARBONATAÇÃO	110
3.1. INTRODUÇÃO.....	113
3.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	116
3.3. MATERIAIS E MÉTODOS	121
3.3.1. Materiais	121
3.3.2. Caracterizações geotécnica e física	121
3.3.3. Caracterizações química, mineralógica e morfológica.....	123
3.3.4. Métodos	129
3.3.4.1. Preparação e moldagem dos corpos de prova.....	130
3.3.4.2. Ensaio de carbonatação acelerada	131
3.3.4.3. Determinação das propriedades mecânicas e de expansão.....	132
3.3.4.3.1. Resistência à compressão simples (RCS).....	132
3.3.4.3.2. Índice mini-CBR e expansão mini-CBR	132

3.3.4.3.3. Módulo de resiliência (MR)	133
3.3.4.4. Determinação da frente de carbonatação	135
3.3.4.5. Medida dos valores de pH	135
3.3.4.6. Análises químicas, mineralógicas e microestruturais.....	135
3.4. RESULTADOS	136
3.4.1. Ensaio de compactação	136
3.4.2. Ensaio de resistência à compressão simples	137
3.4.3. Ensaio de índice mini-CBR e expansão mini-CBR	139
3.4.4. Ensaio de módulo de resiliência.....	142
3.4.5. Determinação da frente de carbonatação.....	146
3.4.6. Determinação dos valores de pH	148
3.4.7. Análises químicas, mineralógicas e microestruturais.....	150
3.5. CONCLUSÕES	164
REFERÊNCIAS	166
4. ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO COMPOSTO POR UMA CAMADA DE SOLO ESTABILIZADO COM EAEP	180
4.1. INTRODUÇÃO.....	182
4.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	184
4.3. MATERIAIS E MÉTODOS	187
4.3.1. Materiais	187
4.3.1.1. Amostras de Solos	187
4.3.1.2. Amostra de escória de aciaria elétrica primária.....	188
4.3.2. Caracterizações geotécnica e física	188
4.3.3. Caracterizações química, mineralógica e morfológica.....	190
4.3.4. Métodos	196
4.3.4.1. Preparação e moldagem dos corpos de prova de MR.....	196
4.3.4.2. Ensaio de carbonatação acelerada	197
4.3.4.3. Determinação do módulo de resiliência	198
4.3.4.4. Pavimento de anteprojeto	198
4.3.4.5. Análise estrutural.....	199
4.3.4.6. Análises mineralógicas e microestruturais	203
4.4. RESULTADOS	203

4.4.1. Ensaio de compactação	203
4.4.2. Ensaio de módulo de resiliência.....	204
4.4.3. Análise estrutural.....	206
4.4.4. Análises mineralógicas e microestruturais	210
4.5. CONCLUSÕES	216
REFERÊNCIAS	217
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	229

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Contextualização do objeto de pesquisa

De acordo com a CNT (2021), o modal rodoviário é responsável pela movimentação de mais de 60% das mercadorias e de mais de 90% dos passageiros, o qual enfrenta graves problemas com a baixa qualidade da infraestrutura no Brasil. Possuindo uma malha viária total de 1,72 milhões de quilômetros, apenas 12,4% da malha rodoviária são pavimentadas, sendo que a maior parte dessas rodovias são de pistas simples (92,7%).

Ainda segundo a CNT (2021), a condição das rodovias pavimentadas deixa a desejar em relação ao conforto ao rolamento e à segurança, uma vez que 61,9% dessas apresentam algum tipo de problema, sendo classificadas como regular, ruim ou péssima. Dessas rodovias com algum tipo de problema, 52,2% dos trechos avaliados têm problemas no pavimento, 58,9% têm problemas na sinalização e 62,1% têm falhas na geometria. Aliado a esses problemas, a frota de veículos em circulação no Brasil vem aumentando ao longo dos anos, crescendo 57,1% no período de 2011 a 2021, chegando a mais de 110 milhões de veículos.

O resultado da combinação entre esses fatores é uma sobrecarga da malha rodoviária e o agravamento do risco de acidentes. Em 2020, nas rodovias federais, foram contabilizados 51.865 acidentes de trânsito com vítimas e 5.287 óbitos. O número de mortos por acidente subiu para 8,3 nesse mesmo ano, um aumento de 5,0% no índice em relação a 2019 quando este indicador era de 7,9 (CNT, 2021).

Esses dados realçam a enorme demanda nacional por obras de pavimentação destinadas ao revestimento superficial das vias não pavimentadas e de melhorias nas já pavimentadas com o objetivo de minimizar a ocorrência e a gravidade de acidentes, aliado a um maior conforto ao rolamento.

Considerando-se exclusivamente a rede rodoviária não-pavimentada, verifica-se que ela responde por cerca de 78,5% (1.349.938,0 km) de toda a malha rodoviária brasileira, sendo que 1.234.918,3 km de sua extensão estão concentrados nos municípios (CNT, 2021), o que demonstra a importância socioeconômica da malha viária no âmbito das municipalidades e, sobretudo, a necessidade de implementação da pavimentação de baixo custo visando, em bases técnico-econômicas aceitáveis, à garantia das boas condições de uso dessas rodovias por parte significativa da população que depende das mesmas para o exercício de suas atividades cotidianas. Assim, tornam-se necessários o desenvolvimento e a adoção de técnicas de baixo

custo que resultem em vias pavimentadas que sejam capazes de proporcionar escoamento às atividades humanas, sem gerar prejuízos aos usuários e sem exigir custos significativos de manutenção (RODRIGUES, 2018).

A estabilização de solos é um método de melhoria de suas propriedades realizando sua mistura com outros materiais (FIROOZI *et al.*, 2017), além de otimização do uso dos materiais locais, ajudando, assim, a construir estruturas confiáveis, minimizando a distância de transporte (GAJEWSKA; KRASZEWSKI; RAFALSKI, 2018). Inúmeros produtos têm sido tradicionalmente usados para estabilização química de solos, entre os quais o cimento Portland e a cal são os mais amplamente utilizados, respaldados por uma longa história e extensos estudos (HUANG *et al.*, 2021).

A fim de tornar os solos de baixa capacidade de suporte viáveis tecnicamente para aplicação em obras de pavimentação, diversos estudos têm sido realizados avaliando a adição, a esses solos, de cal (AL-MAHBASHI *et al.*, 2021; BHUVANESHWARI; ROBINSON; GANDHI, 2019; HAN; DONG; XU, 2021; IKEAGWUANI; NWONU, 2019; NWONU; IKEAGWUANI, 2021; VENKATESH *et al.*, 2021), de cimento (GAJEWSKA; KRASZEWSKI; RAFALSKI, 2018; GARCÍA; SALAMANCA, 2020; LU *et al.*, 2020; ZABIELSKA-ADAMSKA; WASIL; DOBRZYCKI, 2021) e de resíduos de diversos tipos, tais como fibra de vidro reciclado (YAGHOUBI *et al.*, 2021), fibras de plástico (HAFEZ *et al.*, 2019; HASSAN; RASUL; SAMIN, 2021), resíduos de construção e demolição (LUKARIANTCHUKI *et al.*, 2021), resíduo de pó de mármore (ALNUNU; NALBANTOGLU, 2021), resíduo de carbetto de cálcio (NOOLU; MUDAVATH; PILLAI, 2021), lama de cal (HALUK; CETIN, 2022) e pó de forno de cimento (SALAHUDEEN *et al.*, 2022).

Dentro desse cenário de utilização de resíduos como agentes estabilizadores de solos como uma alternativa de material para aplicação em pavimentação de baixo custo se encontram as escórias de aciaria, resíduos siderúrgicos provenientes do primeiro estágio (estágio de fusão) da produção de aço a partir de sucata (TERRONES-SAETA *et al.*, 2021), salientando-se que, para a produção de 1 tonelada deste último, cerca de 100 a 150 kg de escórias são geradas, as quais são descartadas em grande quantidade no meio físico (IAB, 2018).

Estudos têm sido realizados recentemente visando à aplicação da escória de aciaria elétrica primária (EAEP) como único agente estabilizador de solos (LOPES *et al.*, 2021; MAHMUDI; ALTUN; ESKISAR, 2021; ROCHA *et al.*, 2021) ou em conjunto com outro

material (PARSAEI *et al.*, 2021; SHAHSAVANI; VAKILI; MOKHBERI, 2021) como, por exemplo, a cinza volante (PITANGA *et al.*, 2016).

As cinzas volantes são um resíduo sólido produzido por usinas termelétricas a carvão durante a combustão de carvão pulverizado, coletado do gás de combustão (LUO *et al.*, 2021; ZHANG; WEN; LI, 2021), as quais têm atraído ampla atenção devido ao seu potencial de adsorção de metais pesados (WANG *et al.*, 2021). Estima-se que a produção global de cinza volante seja de aproximadamente 363 milhões de toneladas por ano (AMRAN; DEBBARMA; OZBAKKALOGLU, 2021), mas apenas um quarto da produção mundial é utilizado. A cinza volante não utilizada é geralmente disposta em aterros de contenção de resíduos, gerando riscos de contaminação do ar e dos aquíferos subterrâneos (GOLLAKOTA; VOLLI; SHU, 2019).

Estudos recentes têm estudado o potencial de emprego da cinza volante como agente estabilizador de solos isoladamente (KUMAR; HARIKA, 2021) ou em conjunto com outros materiais (DINESH; RAGHISHA, 2021; HOZATLIOĞLU; YILMAZ, 2021; KARAMI *et al.*, 2021; RENJITH *et al.*, 2021).

Misturas de EAEP com cinza volante também já foram estudadas anteriormente na construção civil (AMIN; KHAN, 2021; SANTAMARÍA *et al.*, 2016; SARHAN; KISHAR; HAMED, 2020), incluindo a sua aplicação em estabilização de solos. Tais misturas com solos constituem a base na qual se apoiam as proposições que identificam o caráter original dessa pesquisa de doutorado, as quais passam a ser apresentadas na sequência.

A primeira proposição parte do princípio que a ausência de critérios para guiar a utilização de determinados tipos de resíduos em uma aplicação específica é um dos principais fatores que limitam a sua utilização em larga escala (WANG; WANG; GAO, 2010). Apesar da existência de estudos abordando a eficácia do uso de resíduos industriais como agentes estabilizantes de solos para fins de engenharia de pavimentação, ainda não há um método fundamentado em planejamentos experimentais para a determinação de dosagens otimizadas desses materiais não convencionais em misturas com solos. É neste contexto e visando ao preenchimento dessa lacuna que se enquadra a proposta técnico-científica apresentada no Capítulo 2, a qual foi alicerçada no modelo estatístico de dosagem através de um planejamento experimental em rede simplex-centróide.

Para a segunda proposição, é importante destacar, em caráter preliminar, que a mudança climática é considerada uma grande ameaça não apenas para a humanidade, mas também para

os ecossistemas. Argumenta-se que a humanidade precisa tomar medidas firmes para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 45% antes de 2030 e chegar a zero em 2050 (KANYAMA; NÄSSÉN; BENDERS, 2021). A emissão de CO₂ liberada globalmente por diferentes setores industriais, como as indústrias de construção, tem aumentado rapidamente, adicionando mais gases de efeito estufa ao meio ambiente e impactando negativamente as mudanças climáticas. Diante disso, capturar e sequestrar CO₂ tornou-se uma necessidade vital para compensar a emissão desse gás e prevenir consequências adversas do aquecimento global (HAY; KASHWANI; CELIK, 2021).

A captura e armazenamento de CO₂, bem como os métodos de carbonatação mineral, possuem um importante papel na redução de CO₂ na atmosfera. A carbonatação mineral envolve o uso de minerais industriais, naturais e resíduos que possuem cálcio ou magnésio em sua composição para que possam capturar CO₂ através do processo de carbonatação (MOHAMMED *et al.*, 2021).

A durabilidade de solos estabilizados quimicamente corresponde à manutenção das suas propriedades de engenharia acima dos valores mínimos de projeto durante a vida útil da construção (VITALE *et al.*, 2021). Por exemplo, no caso de solos tratados quimicamente com materiais à base de cal, as diferentes causas de diminuição da durabilidade incluem variações sazonais de umidade (ciclos de umedecimento e secagem), chuva ácida, ciclos de congelamento e degelo, lixiviação de cálcio e carbonatação de hidróxido de cálcio e de compostos cimentícios (CHAKRABORTY; NAIR, 2020; PADMARAJ; ARNEPALLI, 2018; 2021; XU *et al.*, 2020). Segundo Xu *et al.* (2020), a carbonatação é uma das propriedades chave para a avaliação da durabilidade de materiais à base de cal e cimento, a qual é analisada através da mudança de valores de resistência e de expansibilidade. Diante do estudo sobre a influência da carbonatação em solos estabilizados, verificou-se a ausência de um estudo que avalie a influência da carbonatação em misturas solo-EAEP, com a finalidade de utilizá-las em camadas estruturais de pavimentos asfálticos.

Diante desse cenário, o estudo apresentado no capítulo 3 apresenta a avaliação das propriedades de engenharia (resistência à compressão simples, índice mini-CBR, expansão mini-CBR e módulo de resiliência) de misturas solo-EAEP submetidas a diferentes processos de carbonatação.

A terceira proposição se enquadra no contexto da suscetibilidade dos pavimentos asfálticos às patologias estruturais. Sabe-se que, devido aos aumentos significativos do volume de tráfego e da capacidade de carga dos veículos, tais pavimentos são facilmente submetidos a patologias antes do final de sua vida útil, com ênfase no afundamento plástico nas trilhas de roda e no trincamento por fadiga, os quais constituem os principais parâmetros envolvidos em análises estruturais de pavimentos asfálticos (YARAHMADI; SHAFABAKHSH; ASAKEREH, 2022; ZAREI *et al.*, 2022). Porém, a perspectiva de carbonatação ao longo do tempo de misturas solo-EAEP presentes em camadas estruturais de pavimentos aponta para um cenário de comportamento estrutural distinto do apresentado por materiais estruturais não carbonatados, tais como os solos compactados não estabilizados quimicamente, com impactos sobre a suscetibilidade dos pavimentos às referidas patologias. Diante do exposto, ainda não há na literatura técnica estudos que avaliaram os efeitos da carbonatação de misturas solo-EAEP no comportamento resiliente e de seu consequente impacto na avaliação estrutural de um pavimento asfáltico.

Diante disso, a proposta do estudo apresentado no Capítulo 4 desta pesquisa foi realizar uma avaliação estrutural de um pavimento asfáltico-tipo constituído por uma mistura de solo estabilizado com EAEP em sua camada de subleito, sob a ótica da durabilidade decorrente do processo de carbonatação ao longo da vida útil do pavimento.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho de pesquisa foi avaliar o potencial de aproveitamento tecnológico dos resíduos industriais “escória de aciaria elétrica primária (EAEP)” e “cinza volante” na estabilização de solos tropicais de baixa capacidade de suporte, visando sua aplicação em obras de pavimentação.

Os objetivos específicos, relacionados ao objetivo geral, foram os seguintes:

- Propor e testar um protocolo de dosagem de misturas solo-resíduos industriais baseado no modelo estatístico de planejamento experimental de misturas em rede simplex-centróide para determinar a dosagem ótima de misturas de solos tropicais, EAEP e cinza volante, baseada na otimização das propriedades mecânicas resistência à compressão simples (RCS), módulo de resiliência (MR) e índice CBR (*California Bearing Ratio*);
- Avaliar a consequência de três processos distintos de carbonatação em misturas compostas por solos tropicais e EAEP, visando um melhor entendimento do efeito da

carbonatação em longo prazo nas propriedades mecânicas e de expansibilidade desse tipo de mistura;

- Avaliar a influência da carbonatação de misturas solo-EAEP na resposta estrutural de pavimentos asfálticos por elas constituídos, considerando-se análises estruturais baseadas na quantificação da deflexão no topo do revestimento, da deformação vertical no topo da camada de subleito e da deformação horizontal máxima de tração da camada de revestimento asfáltico, sendo os dois primeiros correlacionados ao afundamento por trilhas de roda e o último ao trincamento por fadiga do pavimento;
- Analisar a interveniência das características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais das amostras de solo, EAEP e cinza volante e de suas misturas ótimas sobre os comportamentos de engenharia investigados no âmbito da pesquisa.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho de pesquisa está organizado em 5 capítulos, assim distribuídos:

- ✓ No capítulo 1, apresenta-se uma contextualização sobre os assuntos tratados em cada um dos artigos;
- ✓ No capítulo 2, é apresentado um estudo sobre a otimização das propriedades mecânicas resistência à compressão simples, índice CBR e módulo de resiliência de misturas solo-EAEP-cinza volante utilizando a metodologia de planejamento experimental em rede simplex-centróide. As análises de otimização das propriedades foram realizadas considerando as camadas estruturais de um pavimento asfáltico (reforço de subleito, sub-base e base);
- ✓ O capítulo 3 apresenta um estudo sobre a influência da carbonatação nas propriedades mecânicas (resistência à compressão simples, índice mini-CBR e módulo de resiliência) e de expansibilidade (expansão mini-CBR) de misturas solo-EAEP;
- ✓ O capítulo 4 apresenta um estudo sobre a influência da carbonatação de misturas solo-EAEP, compondo uma camada de subleito, na suscetibilidade ao afundamento por trilhas de roda e ao trincamento por fadiga de um pavimento asfáltico. Essa influência foi avaliada através do *software* AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), o qual é específico para o cálculo de tensões e deformações de pavimentos asfálticos;
- ✓ No capítulo 5, estão apresentadas as conclusões finais deste trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AL-MAHBASHI, A. M.; AL-SHAMRANI, M. A.; MOGHAL, A. A. B.; VYDEHI, K. V. Correlation-Based Studies on Resilient Modulus Values for Fiber-Reinforced Lime-Blended Clay. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, 7, n. 3, p. 59, 2021/08/09 2021.
- ALNUNU, M. Z.; NALBANTOGLU, Z. Performance of Using Waste Marble Dust for the Improvement of Loose Sand in Deep Soil Mixing. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 2021/10/08 2021.
- AMIN, M. N.; KHAN, K. Mechanical Performance of High-Strength Sustainable Concrete under Fire Incorporating Locally Available Volcanic Ash in Central Harrat Rahat, Saudi Arabia. **Materials**, 14, n. 1, p. 21, 2021.
- AMRAN, M.; DEBBARMA, S.; OZBAKKALOGLU, T. Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. **Construction and Building Materials**, 270, p. 121857, 2021/02/08/ 2021.
- BHUVANESHWARI, S.; ROBINSON, R.; GANDHI, S. Resilient modulus of lime treated expansive soil. **Geotechnical Geological Engineering**, 37, n. 1, p. 305-315, 2019.
- CHAKRABORTY, S.; NAIR, S. Impact of curing time on moisture-induced damage in lime-treated soils. **International Journal of Pavement Engineering**, 21, n. 2, p. 215-227, 2020/01/28 2020.
- CNT, Confederação nacional do transporte. **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas**. Brasília, 2021. Disponível em: <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2021/File/PrincipaisDados.pdf>>
- DINESH, M.; RAGHISHA, S. M. Improving Soil Stabilization by Using Fly Ash and E-Waste. **Annals of the Romanian Society for Cell Biology**, p. 2547-2553, 2021.
- FIROOZI, A. A.; GUNAY OLGUN, C.; FIROOZI, A. A.; BAGHINI, M. S. Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, 8, n. 1, p. 26, 2017/12/16 2017.
- GAJEWSKA, B.; KRASZEWSKI, C.; RAFALSKI, L. Significance of cement-stabilised soil grain size distribution in determining the relationship between strength and resilient modulus. **Road Materials and Pavement Design**, 19, n. 7, p. 1692-1701, 2018/10/03 2018.
- GARCÍA, L. C. H.; SALAMANCA, N. F. L. Resilient Module Soil-Cement Prediction based on Setting Temperature. **Ingeniería e Investigación**, 40, p. 7-13, 2020.
- GOLLAKOTA, A. R. K.; VOLLI, V.; SHU, C.-M. Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. **Science of The Total Environment**, 672, p. 951-989, 2019/07/01/ 2019.

HAFEZ, M.; MOUSA, R.; AWED, A.; EL-BADAWY, S., 2019, Cham. **Soil Reinforcement Using Recycled Plastic Waste for Sustainable Pavements**. Springer International Publishing. 7-20.

HALUK, S. C.; CETIN, B. Suitability Assessment of Using Lime Sludge for Subgrade Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 34, n. 3, p. 04021486, 2022/03/01 2022.

HAMZA, O. S. M., ZUMRAWI, M. M. E. & MOHAMED, A. E. M. Effect of Pozzolana and Lime on Expansive Soil Properties. **FES Journal of Engineering Sciences**, 9, 94-101, 2021.

HAN, C.; DONG, Q.; XU, X. Microstructural analysis on the variation of resilient modulus of lime modified soil under freezing–thawing action. **Road Materials and Pavement Design**, p. 1-15, 2021.

HASSAN, H. J. A.; RASUL, J.; SAMIN, M. Effects of Plastic Waste Materials on Geotechnical Properties of Clayey Soil. **Transportation Infrastructure Geotechnology**, 8, n. 3, p. 390-413, 2021/09/01 2021.

HAY, R.; KASHWANI, G.; CELIK, K. Carbonation, strength development, and characterization of calcined limestone as a potential construction material. **Cement and Concrete Research**, 139, p. 106263, 2021/01/01/ 2021.

HOZATLIÖĞLU, D. T.; YILMAZ, I. Shallow mixing and column performances of lime, fly ash and gypsum on the stabilization of swelling soils. **Engineering Geology**, 280, p. 105931, 2021/01/01/ 2021.

HUANG, J.; KOGBARA, R. B.; HARIHARAN, N.; MASAD, E. A. *et al.* A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, 305, p. 124685, 2021/10/25/ 2021.

IAB. Relatório de sustentabilidade. **Instituto Aço Brasil**, 2018.

IKEAGWUANI, C. C.; NWONU, D. C. Resilient Modulus of Lime-Bamboo Ash Stabilized Subgrade Soil with Different Compactive Energy. **Geotechnical and Geological Engineering**, 37, n. 4, p. 3557-3565, 2019/08/01 2019.

KANYAMA, A. C.; NÄSSÉN, J.; BENDERS, R. Shifting expenditure on food, holidays, and furnishings could lower greenhouse gas emissions by almost 40%. **Journal of Industrial Ecology**, n/a, n. n/a, 2021.

KARAMI, H.; POONI, J.; ROBERT, D.; COSTA, S. *et al.* Use of secondary additives in fly ash based soil stabilization for soft subgrades. **Transportation Geotechnics**, 29, p. 100585, 2021/07/01/ 2021.

KUMAR, P. G.; HARIKA, S. Stabilization of expansive subgrade soil by using fly ash. **Materials Today: Proceedings**, 45, p. 6558-6562, 2021/01/01/ 2021.

LOPES, E. C.; DA SILVA, T. O.; PITANGA, H. N.; PEDROTI, L. G. *et al.* Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. **International Journal of Pavement Engineering**, p. 1-12, 2021.

LU, Y.; LIU, S.; ZHANG, Y.; LI, Z. *et al.* Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil. **Cold Regions Science and Technology**, 170, p. 102926, 2020/02/01/ 2020.

LUKIANCHUKI, J. A.; DE OLIVEIRA, J. R. M. d. S.; DE ALMEIDA, M. d. S. S.; DOS REIS, J. H. C. *et al.* Geotechnical Behavior of Construction Waste (CW) as a Partial Replacement of a Lateritic Soil in Fiber-Reinforced Cement Mixtures. **Geotechnical and Geological Engineering**, 39, n. 2, p. 919-942, 2021/02/01 2021.

LUO, Y.; WU, Y.; MA, S.; ZHENG, S. *et al.* Utilization of coal fly ash in China: a mini-review on challenges and future directions. **Environmental Science and Pollution Research**, 28, n. 15, p. 18727-18740, 2021/04/01 2021.

MAHMUDI, M.; ALTUN, S.; ESKISAR, T. Experimental and Numerical Evaluation of Clay Soils Stabilized with Electric Arc Furnace (EAF) Slag. **Advances in Sustainable Construction Resource Management**, 144, p. 73, 2021.

NOOLU, V.; MUDAVATH, H.; PILLAI, R. J. Resilient modulus of clayey subgrade soils treated with calcium carbide residue. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 15, n. 3, p. 288-297, 2021/03/16 2021.

NWONU, D. C.; IKEAGWUANI, C. C. Evaluating the effect of agro-based admixture on lime-treated expansive soil for subgrade material. **International Journal of Pavement Engineering**, 22, n. 12, p. 1541-1555, 2021/10/15 2021.

PADMARAJ, D.; ARNEPALLI, D. N. The durability of cementitious phases in lime stabilisation: A critical review. *In*: Indian Geotechnical Conference, 2018, Bengaluru. Indian Institute of Science, December p. 5.

PADMARAJ, D.; ARNEPALLI, D. N., 2021, Singapore. **Durability of Cementitious Phases in Lime Stabilization: A Critical Review**. Springer Singapore. 483-491.

PARSAEI, M.; VAKILI, A. H.; SALIMI, M.; FARHADI, M. S. *et al.* Effect of electric arc and ladle furnace slags on the strength and swelling behavior of cement-stabilized expansive clay. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2021/06/10 2021.

PITANGA, H. N.; SILVA, T. O. d.; SANTOS, A. L. d.; SILVA, A. C. B. *et al.* MCT CLASSIFICATION FOR COMPACTED MIXTURES OF SOIL-STEEL SLAG-FLY ASH FOR APPLICATION IN FOREST ROADS. **Revista Árvore**, 40, p. 911-919, 2016.

RENJITH, R.; ROBERT, D.; SETUNGE, S.; COSTA, S. *et al.* Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction. **Journal of Cleaner Production**, 294, p. 126264, 2021/04/20/ 2021.

ROCHA, M. d. C.; DIAS, T. B.; CHAVES, J. S.; ALBUQUERQUE, A. R. *et al.* Preliminary analysis of steelworks residues and their application in a sandy soil. **Research, Society and Development**, 10, n. 5, p. e17910514520, 05/03 2021.

RODRIGUES, K. H. d. P. **Estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração**. 2018. 108 f. (Mestrado) - NUGEO, UFOP, Repositório Institucional da UFOP.

SALAHUDEEN, A. B.; JALILI, M.; EIDGAHEE, D. R.; ONYELOWE, K. C. *et al.*, 2022, Cham. **Prediction of Durability, Resilient Modulus and Resistance Value of Cement Kiln Dust-Stabilized Expansive Clay for Flexible Pavement Application Using Artificial Neural Networks**. Springer International Publishing. 675-687.

SANTAMARÍA, A.; ROJÍ, E.; SKAF, M.; MARCOS, I. *et al.* The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars. **Construction and Building Materials**, 106, p. 364-373, 2016/03/01/ 2016.

SARHAN, A.; KISHAR, E. A.; HAMED, S. A. Uses of EAFS in production of blended cements. **Journal of Scientific Research in Science**, 37, n. Part 1 (Basic Sciences), p. 111-124, 2020.

SHAHSAVANI, S.; VAKILI, A. H.; MOKHBERI, M. Effects of freeze-thaw cycles on the characteristics of the expansive soils treated by nanosilica and Electric Arc Furnace (EAF) slag. **Cold Regions Science and Technology**, 182, p. 103216, 2021/02/01/ 2021.

TERRONES-SAETA, J. M.; SUÁREZ-MACÍAS, J.; IGLESIAS-GODINO, F. J.; CORPAS-IGLESIAS, F. A. Development of High Resistance Hot Mix Asphalt with Electric Arc Furnace Slag, Ladle Furnace Slag, and Cellulose Fibers from the Papermaking Industry. **Applied Sciences**, 11, n. 1, 2021.

VENKATESH, N.; ALI, D.; PILLAI, R. J.; HEERA LAL, M., 2021, Singapore. **Strength and Durability Characteristic of Lime Stabilized Black Cotton Soil**. Springer Singapore. 739-750.

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, n. 3, p. 2687-2700, 2021.

WANG, G.; WANG, Y.; GAO, Z. Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. **Journal of Hazardous Materials**, 184, n. 1, p. 555-560, 2010/12/15/ 2010.

WANG, L.; HUANG, X.; ZHANG, J.; WU, F. *et al.* Stabilization of lead in waste water and farmland soil using modified coal fly ash. **Journal of Cleaner Production**, 314, p. 127957, 2021/09/10/ 2021.

XU, L.; ZHA, F.; LIU, C.; KANG, B. *et al.* Experimental investigation on carbonation behavior in lime-stabilized expansive soil. 2020, 2020.

YAGHOUBI, E.; YAGHOUBI, M.; GUERRIERI, M.; SUDARSANAN, N. Improving expansive clay subgrades using recycled glass: Resilient modulus characteristics and pavement performance. **Construction and Building Materials**, 302, p. 124384, 2021/10/04/ 2021.

YARAHMADI, A. M.; SHAFABAKHSH, G.; ASAKEREH, A. Laboratory investigation of the effect of nano Caco₃ on rutting and fatigue of stone mastic asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, 317, p. 126127, 2022/01/24/ 2022.

ZABIELSKA-ADAMSKA, K.; WASIL, M.; DOBRZYCKI, P. Resilient Response of Cement-Treated Coarse Post-Glacial Soil to Cyclic Load. **Materials**, 14, n. 21, 2021.

ZAREI, S.; ALAE, M.; OUYANG, J.; ZHAO, Y. Rutting and surface-initiated cracking mechanisms of semi-flexible pavements with cement asphalt emulsion pastes. **International Journal of Pavement Engineering**, p. 1-15, 2022.

ZHANG, J.; WEN, K.; LI, L. Bio-modification of coal fly ash using urease-producing bacteria. **Fuel**, 286, p. 119386, 2021/02/15/ 2021.

2. OTIMIZAÇÃO DE DOSAGENS DE MISTURAS SOLO-EAEP-CINZA VOLANTE ATRAVÉS DO MÉTODO SIMPLEX

Resumo: A grande quantidade de resíduos sólidos gerados nas indústrias é motivo de preocupação para a sociedade. Uma possível solução é a incorporação desses resíduos em solos, a fim de promover melhorias em suas propriedades e contribuir para o desenvolvimento sustentável. Esta pesquisa apresentou um estudo experimental de estabilização química de duas amostras de solos tropicais (S1 – amostra argilosa e S2 - amostra arenosa) utilizando dois resíduos industriais, escória de aciaria elétrica primária (EAEP) e cinza volante, através de um planejamento experimental através do método Simplex. As propriedades avaliadas foram a resistência à compressão simples (RCS), o índice *California Bearing Ratio* (CBR) e o módulo de resiliência (MR) dos solos e misturas, sendo que os corpos de prova foram compactados no teor de umidade ótimo referente à energia Proctor Normal e submetidos à cura selada em câmara úmida por 7 dias. Com a adição dos resíduos, constatou-se uma melhoria das propriedades mecânicas avaliadas, sobretudo com a adição de escória de aciaria elétrica primária. Utilizando o *software* estatístico Minitab 18, o planejamento experimental das misturas em rede simplex-centróide permitiu a obtenção das superfícies de resposta para cada propriedade mecânica investigada em função dos pseudocomponentes das misturas. Para a determinação da proporção dos constituintes que otimizam as misturas solo-resíduos, foi utilizada a função desejabilidade, resultando nas proporções de 80% de solo, 20% de escória de aciaria elétrica primária e 0% de cinza volante para ambas as amostras de solo. Verificou-se que, para a mistura otimizada das duas amostras de solo, houve diminuição do limite de liquidez (LL), do índice de plasticidade (IP) e da expansão CBR. Além disso, foi observado, através dos ensaios de MEV e DRX, que houve a formação de estruturas de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), sílico-aluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H) responsáveis pelo ganho de resistência mecânica. A fundamentação estatística do processo de dosagem mostrou-se capaz de definir composições das misturas solo-resíduos investigadas aptas ao atendimento de valores-alvo das propriedades mecânicas de interesse. A aplicação de resíduos industriais na estabilização de solos tropicais de baixa capacidade de suporte mostrou-se uma alternativa viável técnica e ambientalmente.

Palavras-chave: Otimização de misturas. Planejamento experimental de misturas. Escória de aciaria elétrica primária. Cinza volante. Estabilização de solos.

Abstract: The large amount of solid waste generated in industries is a reason of concern for society. A possible solution is the incorporation of these wastes into soils, in order to improve their properties and to contribute for sustainable development. This research presented an experimental study of chemical stabilization of two samples of tropical soils (S1 - clayey sample and S2 - sandy sample) using two industrial wastes, electric arc furnace slag (EAFS) and fly ash, through an experimental design through the simplex method. The properties evaluated were the Unconfined Compressive Strength (UCS), the California Bearing Ratio (CBR) and the resilient modulus (RM) of the soils and mixtures, and the specimens were compacted in the optimum moisture content (OMC) to Standard Proctor energy and subjected to a sealed cure in a humid chamber for 7 days. With the addition of the wastes, there was an improvement in the evaluated mechanical properties, especially with the addition of EAFS. Using the Minitab 18 statistical software, the design of experiments of the mixtures in a simplex-centroid network allowed obtaining the response surfaces for each mechanical property investigated as a function of the percentages of the components. To determine the proportion of constituents that optimize the soil-wastes mixtures, the desirability function was used, resulting in the proportions of 80% soil, 20% EAFS and 0% fly ash for both soil samples. It was found that for the optimized mixture of the two soil samples there was a decrease in liquid limit (LL), plasticity index (PI) and CBR expansion. Furthermore, it was observed through the SEM and XRD tests that there was the formation of structures of calcium silicate hydrate (C-S-H), calcium aluminum silicate hydrate (C-A-S-H) and calcium aluminate hydrate (C-A-H) responsible for the gain in mechanical strength. The statistical foundation of the dosage process proved to be able to define compositions of the investigated soil-wastes mixtures capable of meeting the target values of the mechanical properties of interest. The application of industrial wastes in the stabilization of tropical soils with low bearing capacity proved to be a technically and environmentally viable alternative.

Key-words: Optimization of mixtures. Design of experiments of mixtures. Electric arc furnace slag. Fly ash. Soil stabilization.

2.1. Introdução

As escórias são subprodutos parcialmente cristalinos dos processos siderúrgicos para a produção de aço, em que os constituintes metálicos e não metálicos são separados do minério bruto (TRAVEN; ČEŠNOVAR; DUCMAN, 2019). Vários tipos de escórias obtidas dos diferentes processos de fabricação do aço já são utilizados como agentes estabilizadores de solos, incluindo a escória de alto forno (AFRASIABIAN *et al.*, 2019; BUDDHDEV; TIMANI, 2021; PHUMMIPHAN *et al.*, 2018; RONDÓN-QUINTANA; RUGE-CÁRDENAS; FARIAS, 2019), a escória de aciaria de forno básico à oxigênio (CIKMIT *et al.*, 2018; KANG *et al.*, 2019), a escória de aciaria elétrica primária (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; ISMAIL; AWAD; MWAFY, 2019) e a escória de aciaria elétrica secundária (BRAND *et al.*, 2020; XU; YI, 2020).

No Brasil, os resíduos siderúrgicos diretos, excluindo os de refeitórios, administração, construção civil e outros, correspondiam à aproximadamente 20,1 milhões de toneladas em 2017, dos quais 27% correspondiam à escória de aciaria. O Brasil é um dos maiores produtores de aço bruto do mundo, produzindo, em 2018, aproximadamente 35,4 milhões de toneladas, correspondendo à 2% da produção mundial e à 53,8% da produção da América Latina. Da produção brasileira de aço em 2018, 29,92% foram gerados no estado de Minas Gerais, o que o torna o maior produtor de aço bruto do país (IAB, 2019). Este cenário de geração de resíduos siderúrgicos em quantidades tão significativas aponta para a necessidade de viabilização de seu aproveitamento (PALOD; DEO; RAMTEKKAR, 2017), sendo a engenharia civil um dos ramos das atividades econômicas em que é possível o aproveitamento desses resíduos em grande escala (PENTEADO *et al.*, 2019).

Considerando a necessidade de redução do consumo de recursos naturais empregados como matéria-prima na construção civil, alguns estudos têm sido realizados a fim de avaliar os aspectos técnicos relacionados ao uso da escória de aciaria elétrica primária (EAEP) como um material alternativo empregado em substituição parcial do cimento (NIKOLIĆ *et al.*, 2020), como agregado em argamassas (OZTURK *et al.*, 2018), na composição de tijolos (APITHANYASAI; SUPAKATA; PAPONG, 2020), concretos convencionais (BEAUCOUR *et al.*, 2020; LEE *et al.*, 2020; LI; QIAO; NI, 2020; TAMAYO *et al.*, 2020), concretos auto-adensáveis (SANTAMARÍA *et al.*, 2020; SOSA *et al.*, 2020), concretos compactados com rolo (LAM; JARITNGAM; LE, 2017), blocos intertravados (EVANGELISTA; ROSADO; PENTEADO, 2018; PENTEADO *et al.*, 2019), corpos de aterro (YILDIRIM; PREZZI, 2017)

e misturas asfálticas (FERREIRA *et al.*, 2016; SKAF *et al.*, 2019), assim como na estabilização de solos em substituição ao cimento e à cal, que são os materiais comumente utilizados para essa finalidade (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; AUTELITANO; GIULIANI, 2016; BRAND *et al.*, 2020; DINIZ *et al.*, 2017; ISMAIL; AWAD; MWAFY, 2019; SEBBAR *et al.*, 2020; SHAHSAVANI; VAKILI; MOKHBERI, 2021; ZUMRAWI; BABIKIR, 2017). Neste último caso, ressalta-se que os mecanismos de estabilização são similares aos dos agentes estabilizantes mais comuns e geram como produto final silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) (RANDHAWA; CHAUHAN, 2021).

As cinzas volantes são classificadas em três classes segundo a norma técnica C618 (ASTM, 2019), a saber, classes N, F e C. As cinzas volantes de classe N são as originadas de processos naturais, as de classe F são cinzas volantes com propriedades pozolânicas e as de classe C possuem tanto propriedades pozolânicas como cimentantes, possuindo maior teor de CaO que as de classe F. Estima-se que a produção global de cinza volante seja de aproximadamente 363 milhões de toneladas por ano (AMRAN; DEBBARMA; OZBAKKALOGLU, 2021), mas apenas um quarto da produção mundial é utilizado. A cinza volante não utilizada é geralmente disposta em aterros de contenção de resíduos, gerando riscos de contaminação do ar e dos aquíferos subterrâneos (GOLLAKOTA; VOLLI; SHU, 2019).

Considerando-se a necessidade técnica de viabilização do aproveitamento em grande escala de resíduos industriais como estabilizantes químicos de solos compactados segundo fundamentos científicos que minimizem as incertezas e limitações dos procedimentos empíricos existentes, o objetivo principal deste projeto de pesquisa é o de propor e testar um protocolo de dosagem de misturas solo-resíduos industriais baseado no modelo estatístico de planejamento experimental de misturas em rede simplex-centróide para determinar a dosagem ótima de misturas de solos tropicais, EAEP e cinza volante, baseada na otimização das propriedades mecânicas resistência à compressão simples (RCS), módulo de resiliência (MR) e *California Bearing Ratio* (CBR). Como objetivos secundários, associados ao objetivo principal, pretende-se: (i) analisar a influência das adições de EAEP e de cinza volante sobre as propriedades mecânicas investigadas; ii) interpretar os resultados pertinentes às referidas propriedades com base nas características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais de seus componentes.

2.2. Revisão Bibliográfica

A escória de aciaria elétrica primária (EAEP), em particular, é produzida por um forno elétrico à arco no refinamento primário da produção do aço bruto. Nesse processo, uma corrente elétrica é usada para aquecer a cal e/ou a dolomita até o estado líquido. Ao longo do processo de fusão, a cal e a dolomita são combinadas com sucata não metálica para formar uma escória líquida, que flutua no topo do material fundido e posteriormente é separada e resfriada, formando a EAEP. A composição química da EAEP varia conforme o tipo de tratamento metalúrgico, as condições e os aditivos usados durante o processo de fabricação (EUROSLAG, 2019). A Tabela 2.1 apresenta as composições químicas de várias EAEPs estudadas recentemente para utilização em obras de engenharia civil.

Tabela 2.1: Composições químicas de EAEPs oriundas de estudos prévios.

Referência	Composição química em massa (%)												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	PF* (%)
Manso <i>et al.</i> (2006)	15,3	7,4	42,5	23,9	-	-	5,1	4,5	-	-	-	-	-
Arribas <i>et al.</i> (2015)	17,9	11,6	27,5	25,7	-	0,1	3,8	4,2	-	0,7	0,5	-	-
Faleschini <i>et al.</i> (2016)	14,6	10,2	33,3	30,3	-	-	3,0	4,3	-	-	-	-	-
Monosi; Ruello e Sani (2016)	14,0	12,0	35,0	26,0	0,1	0,2	5,0	6,0	-	0,4	-	-	-
Zumrawi e Babikir (2017)	16,4	2,4	26,0	25,8	-	-	10,0	11,2	-	0,8	-	-	-
Lam; Jaritngam e Le (2017)	16,3	8,3	34,7	25,9	0,1	0,3	6,9	5,2	-	2,0	0,3	-	-
Santamaria <i>et al.</i> (2018)	16,3	10,5	35,4	26,8	-	-	2,8	5,6	-	-	-	2,6	-
Lee <i>et al.</i> (2019)	16,1	12,0	37,3	20,6	-	-	4,4	5,6	-	0,7	-	-	-
Zhang <i>et al.</i> (2019)	15,5	4,3	28,2	38,0	0,1	0,2	3,5	3,6	0,7	0,8	1,8	0,5	2,2
Pomaro <i>et al.</i> (2019)	14,6	10,2	33,3	30,3	-	-	3,0	4,3	-	-	-	2,7	-
Yeih e Chang (2019)	21,4	6,1	18,9	23,4	-	-	8,3	-	0,0	-	-	-	-
Ismail; Awad e Mwafy (2019)	14,2	8,1	29,8	38,3	0,0	0,0	4,2	2,8	0,1	0,4	0,3	-	-
Traven; Češnovar e Ducman (2019)	17,4	8,4	12,2	22,2	0,2	0,3	16,7	2,2	0,3	0,4	0,1	3,8	15,5
Češnovar <i>et al.</i> (2019)	21,1	8,5	11,4	20,9	0,2	0,1	14,9	2,2	-	-	-	3,8	14,2
Balaguera e Botero (2020)	12,2	1,6	38,5	25,1	0,4	0,3	7,7	5,9	0,6	0,4	0,6	0,8	-
Balaguera e Botero (2020)	13,4	2,7	37,9	30,9	0,3	0,3	2,8	4,1	0,7	0,5	1,4	0,8	-
Li <i>et al.</i> (2020)	11,2	7,4	25,9	37,8	-	-	6,2	3,4	-	-	-	-	-
Li <i>et al.</i> (2020)	11,9	6,4	28,6	28,8	-	-	3,7	4,9	-	-	-	-	-
Li <i>et al.</i> (2020)	10,7	4,5	28,4	35,6	-	-	6,9	4,5	-	-	-	-	-
Sosa <i>et al.</i> (2020)	12,0	7,4	37,9	30,3	-	-	4,9	4,5	-	0,5	-	1,2	-
Dias <i>et al.</i> (2020)	5,8	0,6	53,0	33,5	0,0	-	-	5,1	-	0,6	1,0	0,2	-
Shahsavani; Vakili e Mokhberi (2021)	23,0	4,5	16,5	34,0	-	-	12,4	-	-	-	-	-	9,6

*Perda ao fogo

A despeito da perspectiva de seu aproveitamento, a utilização das escórias de aciaria pode enfrentar obstáculos devido ao seu potencial expansivo. A instabilidade volumétrica pode limitar a aplicabilidade das escórias de aciaria elétricas devido à presença de óxidos livres em sua composição, como o óxido de cálcio (CaO) (SANTAMARIA *et al.*, 2018). A expansibilidade é um efeito da hidratação dos óxidos de cálcio e de magnésio se transformando em hidróxidos de cálcio e de magnésio, respectivamente, sendo que o volume dos hidróxidos é aproximadamente o dobro do volume dos óxidos. Essa expansão pode ser solucionada caso a reação já tenha acontecido anteriormente, em um processo de cura do material (BRAND *et al.*, 2020; LAM; LE; JARITNGAM, 2018; LI *et al.*, 2020). No entanto, nem todas as escórias de

ação sofrem expansão, e as composições químicas variadas excluem qualquer generalização de sua expansividade (NETINGER *et al.*, 2014; QASRAWI, 2020; SANTAMARÍA *et al.*, 2021).

O potencial de aproveitamento de resíduos industriais no âmbito da engenharia civil também se aplica às cinzas volantes, as quais constituem resíduos sólidos finos provenientes da combustão de diferentes tipos de carvão em usinas termelétricas (GOLLAKOTA; VOLLI; SHU, 2019; HEWLETT; LISKA, 2019). A queima instantânea do combustível gera uma alta temperatura, levando à transformação de seus componentes minerais em pequenas gotas fundidas. Depois disso, o rápido resfriamento transforma as gotas, parcial ou totalmente, em partículas de vidro (LIU, L. *et al.*, 2021). A Tabela 2.2 apresenta as composições químicas das cinzas volantes de vários estudos recentes que avaliaram seu potencial de utilização em obras de engenharia civil.

Tabela 2.2: Composições químicas de cinzas volantes oriundas de estudos prévios.

Referência	Composição química em massa (%)													PF* (%)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO	SO ₃	Cl	TiO ₂	P ₂ O ₅	F	
Quintero <i>et al.</i> (2017)	46,2	31,4	4,8	4,5	-	3,6	1,8	-	0,7	-	-	-	-	3,9
Guarin; Delgado e Molina (2017)	52,9	26,3	7,8	1,2	1,3	0,2	0,7	-	-	-	1,2	0,6	-	7,4
Guarin; Delgado e Molina (2017)	24,7	13,9	5,4	0,8	1,1	0,2	0,4	-	-	-	0,7	0,3	-	-
González <i>et al.</i> (2017)	3,3	0,9	1,1	9,8	9,4	12,3	0,4	-	10,2	17,3	0,8	0,5	0,1	29,2
González <i>et al.</i> (2017)	1,4	0,6	0,7	35,0	3,7	3,5	0,5	-	4,9	15,7	0,4	0,2	0,2	30,7
Roa-Bohórquez; Paredes-Roa e Lara-González (2018)	88,7	-	6,5	1,4	0,8	-	-	-	-	-	2,7	-	-	-
Correa-Yepes; Rojas-Reyes e Tobón (2018)	44,9	30,6	6,4	5,4	1,4	1,5	4,0	-	0,9	-	1,3	-	-	3,0
Brito <i>et al.</i> (2018)	42,5	16,4	7,1	19,1	-	0,9	0,3	-	-	-	0,9	0,0	-	12,9
De Matos; Foiato e Prudêncio Jr (2019)	69,3	18,9	6,2	1,1	1,5	-	1,0	-	0,2	-	-	-	-	0,2
De Matos; Foiato e Prudêncio Jr (2019)	56,0	29,4	6,2	2,1	1,8	-	< 0,1	-	2,6	-	-	-	-	0,5
De Matos; Foiato e Prudêncio Jr (2019)	56,0	29,4	6,2	2,1	1,8	-	< 0,1	-	2,6	-	-	-	-	1,9
Teixeira <i>et al.</i> (2019)	54,1	26,4	6,1	3,3	1,6	0,5	1,6	0,1	1,0	-	1,4	0,8	-	2,7
Teixeira <i>et al.</i> (2019)	36,0	8,3	4,1	27,4	4,9	0,9	3,6	0,2	3,2	0,6	0,9	3,2	-	6,3
De Rossi <i>et al.</i> (2019)	34,0	13,5	5,0	16,5	5,5	1,5	3,1	-	2,8	-	0,6	-	-	14,3
López <i>et al.</i> (2019)	58,9	24,8	4,9	1,1	1,0	1,2	3,2	0,9	-	-	0,1	0,5	-	-
Sosa <i>et al.</i> (2020)	55,0	20,4	7,0	6,1	2,0	1,2	2,6	-	4,0	-	0,9	-	-	-

*Perda ao fogo

Vários estudos estão sendo realizados visando à utilização da cinza volante na construção civil, com destaque para as aplicações em concretos geopoliméricos (AMRAN; DEBBARMA; OZBAKKALOGLU, 2021; HEMALATHA; RAMASWAMY, 2017; ZHUANG *et al.*, 2016), na produção de compósitos de cimento (ANAND; SARKAR, 2020), em material para corpo de aterro (RANDHAWA; CHAUHAN, 2021) e em misturas betuminosas (MISTRY; ROY, 2021). A cinza volante também tem sido aplicada para a estabilização de solos para fins de obras de pavimentação (KARTHIK *et al.*, 2014; LAM; JARITNGAM; LE, 2017; SHALABI; ASI; QASRAWI, 2017). Simatupang (2021) verificou que areias estabilizadas com cinza volante têm seu ângulo de atrito residual aumentado, enquanto Odion e Khattak (2021) observaram que

um geopolímero à base de cinza volante incrementou a resistência à compressão simples e a durabilidade de um solo silto-arenoso. Mypati e Saride (2020) estudaram a contração de um solo expansivo e verificaram uma redução dessa propriedade com a adição de cinza volante.

Misturas de EAEP com cinza volante também já foram estudadas anteriormente na construção civil (AMIN; KHAN, 2021; SANTAMARÍA *et al.*, 2016; SARHAN; KISHAR; HAMED, 2020), incluindo a estabilização de solos. A Tabela 2.3 mostra os diferentes teores de EAEP e cinza volante utilizados em estudos para fins de estabilização de solos.

Tabela 2.3: Teores de EAEP e cinza volante em estabilização de solos.

Autores	EAEP (%)	Cinza volante (%)
Tastan <i>et al.</i> (2011)	-	10,0 - 30,0
Mccarthy <i>et al.</i> (2012)	-	6,0 - 24,0
Akinwumi (2014)	5 - 10	-
Golakiya e Savani (2015)	0 - 30	-
Pitanga <i>et al.</i> (2016)	7,5 - 20	0 - 5
Ozdemir (2016)	-	0,0 - 10,0
Aldeeky e Al Hattamleh (2017)	0 - 25	-
Al-Amoudi <i>et al.</i> (2017)	5 - 30	-
Zumrawi e Babikir (2017)	0 - 30	-
Yildirim e Prezzi (2017)	-	5,0 - 10,0
Diniz <i>et al.</i> (2017)	-	0,0 - 20,0
Mahvash; López-Querol e Bahadori-Jahromi (2017)	-	5,0 - 15,0
Nath; Molla e Sarkar (2017)	-	0 - 20
Ismail; Awad e Mwafy (2019)	1 - 30	-
Mahedi; Cetin e Dayioglu (2019)	-	0,0 - 40,0
Hastuty; Roesyanto e Rahman (2019)	-	2 - 14
Sebbar <i>et al.</i> (2020)	10 - 20	-
Brand <i>et al.</i> (2020)	10 - 15	-
Shahsavani; Vakili e Mokhberi (2021)	5 - 20	-

As pesquisas envolvendo EAEP, cinza volante e outros resíduos na estabilização de solos têm sido realizadas, em geral, por meio de métodos de dosagens intuitivos e empíricos (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; BRAND *et al.*, 2020; DINIZ *et al.*, 2017; ISMAIL; AWAD; MWAFY, 2019; SEBBAR *et al.*, 2020; SHAHSAVANI; VAKILI; MOKHBERI, 2021; XU; YI, 2019; 2020; ZUMRAWI; BABIKIR, 2017). Neste contexto, salienta-se que as dosagens de misturas solo-cal, segundo as normas técnicas ME 419 (DNIT, 2019) e ASTM D6276 (2019), e de misturas solo-cimento, conforme as normas técnicas NBR 12253 (ABNT, 2012a) e ASTM D5982 (2015), também são baseadas em procedimentos empíricos.

Considerando-se os estabilizantes químicos de solos tradicionalmente empregados (cal e cimento), o procedimento do método de dosagem de mistura solo-cal por meio do pH foi proposto por Eades e Grim (1966) e consiste em adicionar cal suficiente ao solo até alcançar uma mistura com um pH de 12,4, pressupondo-se que a manutenção do pH nesse nível garantirá a ocorrência das reações pozolânicas entre o solo e a cal, o que implicará em ganho de

resistência do produto final compactado. Apesar dessa pressuposição, as reações entre o solo e a cal não garantem obrigatoriamente um aumento significativo de resistência (TRB, 1987).

Por sua vez, o método de dosagem de mistura solo-cimento para camadas de pavimentos, conforme a norma técnica NBR 12253 (ABNT, 2012a), também se fundamenta em um protocolo empírico baseado no teor mínimo de cimento capaz de conferir à mistura compactada uma resistência à compressão simples de 2,1 MPa aos sete dias de cura. Ressalta-se que esta norma técnica é destinada à melhoria e estabilização de solos dos grupos A-1, A-2, A-3 e A-4 referentes à classificação TRB (*Transportation Research Board*) de solos, visando à aplicação em obras rodoviárias.

Apesar da existência de estudos abordando a eficácia do uso de resíduos industriais como agentes estabilizantes de solos para fins de engenharia de pavimentação, ainda não há um método fundamentado em planejamentos experimentais para a determinação de dosagens otimizadas desses materiais não convencionais em misturas com solos. A ausência de critérios para guiar a utilização de determinados tipos de resíduos em uma aplicação específica é um dos principais fatores que limitam a sua utilização em larga escala (WANG; WANG; GAO, 2010).

Até o presente momento, não se tem conhecimento da existência na literatura técnica de um método de dosagem de misturas solo-resíduos baseado em critérios capazes de otimizar as contribuições de cada um de seus materiais componentes e, por conseguinte, otimizar as propriedades de engenharia do produto final a fim de atender às exigências de projetos que demandam o emprego de solos compactados. É neste contexto e visando ao preenchimento dessa lacuna que se enquadra a presente proposta técnico-científica, a qual foi alicerçada no modelo estatístico de dosagem através de um planejamento experimental em rede simplex-centróide.

A abordagem pertinente ao referido método é realizada através de um planejamento experimental de misturas, o qual considera que as propriedades de interesse são dependentes das proporções dos componentes das mesmas, permitindo a otimização (maximização ou minimização) de uma ou mais propriedades desejadas (ONYELOWE *et al.*, 2019), conferindo maior confiança estatística aos resultados, além de reduzir o número de experimentos (JIAO *et al.*, 2018; MEDEIROS *et al.*, 2019).

No contexto da dosagem estatística, uma mistura é definida como sendo uma composição de dois ou mais componentes, sendo a quantidade de cada componente definida em porcentagem. Em uma mistura, as proporções de cada componente são dependentes entre si, de modo que a soma de todos os componentes da mistura deve ser igual a 100% (CORNELL, 2011). Esta interdependência entre os componentes é representada pela Equação (2.1).

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_q = 1 \quad (2.1)$$

(Em que: q é igual ao número de componentes e x_i é a proporção do componente i).

Para prever qual ou quais misturas provocam uma otimização na variável resposta (propriedade de interesse), é necessário que uma equação de regressão, relacionada a um modelo polinomial, seja estimada. Por meio da superfície de resposta gerada pela equação, é possível encontrar a região que fornece a maximização (ou a minimização) de cada propriedade, dentro dos limites experimentais (ALEISA; HEIJUNGS, 2020).

Segundo Yıldırım; Karacasu e Okur (2020), um planejamento experimental é a seleção dos pontos que representam as misturas a serem analisadas dentro do espaço experimental. As misturas selecionadas são então testadas em função das propriedades de interesse para a obtenção de funções polinomiais que descreverão as respostas das misturas quanto a essas propriedades. Uma superposição das respectivas superfícies de resposta gera regiões em que as propriedades de interesse são otimizadas e finalmente a função desejabilidade pode ser aplicada para determinar a melhor dosagem dos componentes a fim de otimizar as propriedades de interesse, sendo necessário para isso que a faixa de valores adequados para cada propriedade seja fornecida.

As análises das superfícies de resposta representadas por meio dos modelos matemáticos podem ser realizadas através das proporções entre os componentes, ou seja, utilizando o espaço do delineamento experimental gerado com as proporções dos componentes variando entre 0 e 100% e através dos pseudocomponentes, que são os componentes limitados às proporções estabelecidas de acordo com o objetivo da mistura, gerando uma região de delineamento experimental contida dentro da região gerada com os componentes variando de 0 a 100% (CORNELL, 2011; MONTGOMERY, 2017; NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010). Essas

análises fornecerão modelos matemáticos diferentes, motivo pelo qual devem ser identificados em cada pesquisa.

Para se realizar a análise dos modelos matemáticos para cada variável resposta (propriedades analisadas), deve-se avaliar as constantes dos termos lineares, que multiplicam as porcentagens dos componentes puros, separadamente dos termos que representam a interação entre dois ou mais componentes. As constantes dos termos lineares representam o valor previsto pelo modelo matemático quando os teores máximos de cada componente são utilizados, enquanto as constantes dos termos de interações mostram se a mistura entre dois ou mais componentes gera aumento ou diminuição da propriedade analisada, através de seu valor ser positivo (sinergismo) ou negativo (antagonismo), respectivamente (MONTGOMERY, 2017).

Para realizar a análise dos coeficientes que multiplicam as variáveis sem interação, realiza-se o cálculo da média aritmética entre esses coeficientes e verifica-se quais coeficientes estão acima e quais estão abaixo da média. Os coeficientes que estiverem acima da média mostram que o elemento que o multiplica promove um aumento na propriedade analisada, enquanto que o coeficiente que se encontra com valor abaixo da média representa uma redução na propriedade analisada com o aumento do componente que o multiplica (CORNELL, 2011).

Considerando a Equação (2.2), que representa o modelo cúbico especial adotado no método simplex-Centróide para uma mistura entre três componentes, a constante b_1 é o valor estimado pelo modelo matemático quando a proporção do componente x_1 é máxima na mistura. A constante b_{12} , por sua vez, representa a interação entre os componentes x_1 e x_2 : se seu valor for positivo, tem-se um sinergismo, que indica um aumento no valor da propriedade; se seu valor for negativo, tem-se um antagonismo, indicando um decréscimo no valor da propriedade (MONTGOMERY, 2017).

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (2.2)$$

(Em que: b_i são as constantes do modelo matemático e x_i é a proporção do componente i).

A abordagem baseada na função desejabilidade consiste em converter os modelos de resposta estimados, que geralmente são modelos de segunda ordem, em funções de desejabilidade individuais que são então agregadas em uma função composta. Esta função é

geralmente uma média geométrica ou aritmética, que será maximizada ou minimizada, respectivamente, cujos valores variam de 0 a 1 (COSTA; LOURENÇO; PEREIRA, 2011). Aproximando-se de zero, os limites inferiores e superiores estipulados para cada propriedade são menos atendidos. Se a desejabilidade é igual a 1, significa que todos os limites definidos são satisfeitos (KHOORBAKHT *et al.*, 2020).

O protocolo de otimização de propriedades de interesse por meio de planejamento experimental de misturas vem sendo largamente estudado no setor de construção civil, como na produção de blocos e artefatos cerâmicos (AZEVEDO *et al.*, 2018; HUSSIEN; MURAD; NAJIM, 2018; MEDEIROS *et al.*, 2019), em blocos de solo-cimento (AZEVEDO *et al.*, 2019), em tintas (LOPES *et al.*, 2019), em materiais cimentícios (SHI *et al.*, 2016), em argamassas (MARVILA *et al.*, 2019; SOLOUKI *et al.*, 2021) e em concretos (JIAO *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2020).

No âmbito da engenharia de solos, a utilização do método de planejamento experimental de misturas tem ocorrido em menor escala. Okonkwo e Agunwamba (2016) utilizaram essa metodologia para otimizar o custo do uso de cinza de bagaço de cana de açúcar e cimento na estabilização de um solo laterítico para fins de uso em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários. Onyelowe (2017) estudou a otimização do índice CBR em misturas de cinzas de resíduos de papel e cimento. Yıldırım; Karacasu e Okur (2020) estudaram a aplicação desse método para a otimização da dosagem Marshall em misturas asfálticas. Onyelowe *et al.* (2019) avaliaram, por meio desse método, uma mistura de solo, cimento e pó de pedra. Emmanuel *et al.* (2020) realizaram a otimização da resistência à compressão simples (RCS) de misturas compostas por micro-sílica, fibras de coco e um solo residual tropical.

2.3. MATERIAIS E MÉTODOS

2.3.1. Materiais

2.3.1.1. Solos

Nesta pesquisa, foram utilizadas duas amostras de solos tropicais, denominadas S1 e S2, de jazidas de empréstimo localizadas no Município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil. A amostra S1 foi oriunda de um horizonte de solo residual maduro de coloração avermelhada e a amostra S2 foi oriunda de um horizonte de solo saprolítico de coloração amarelo-acinzentada. Essas amostras de solos foram coletadas conforme o procedimento PRO 003

(DNER, 1994a) e preparadas para os ensaios geotécnicos de laboratório, conforme a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a).

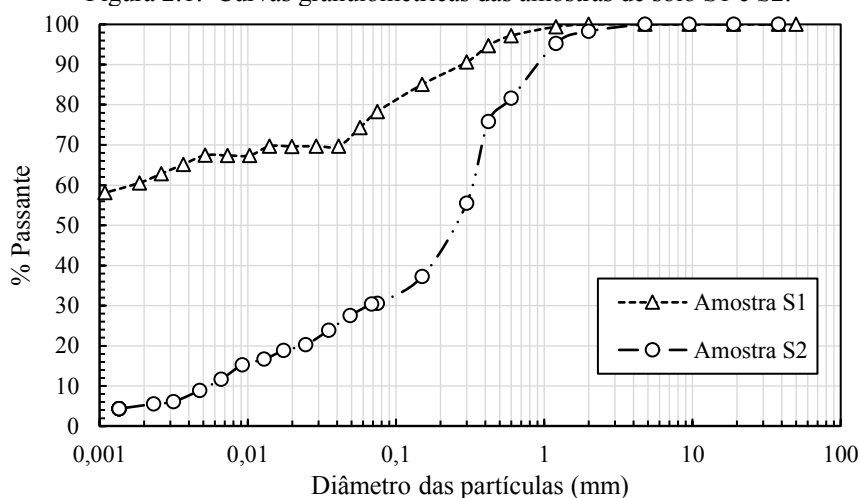
Os ensaios realizados para fins de caracterização geotécnica das amostras de solos foram: i) Análise granulométrica conjunta, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016b); ii) Limite de liquidez (LL), segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016c); iii) Limite de plasticidade (LP), segundo a NBR 7180 (ABNT, 2016d); iv) Massa específica dos grãos do solo (ρ_s), segundo a NBR 6458 (ABNT, 2016e); e v) Compactação na energia do Proctor normal, segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016f), para fins de determinação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d,máx}$) e da umidade ótima (w_{ot}) dos solos compactados. Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Caracterização e classificação geotécnicas das amostras de solo analisadas.

Parâmetro	S1	S2
% argila ($\varphi < 0,002$ mm)	61	5
% silte ($0,002$ mm $< \varphi < 0,06$ mm)	14	24
% areia ($0,06$ mm $< \varphi < 2$ mm)	25	68
% pedregulho (2 mm $< \varphi < 60$ mm)	0	3
LL (%)	78	36
LP (%)	43	18
IP (%)	35	18
ρ_s (g/cm ³)	2,869	2,657
$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	13,95	15,57
w_{ot} (%)	31,03	15,00
TRB	A-7-5 (20)	A-2-6 (1)
USC	MH	SC
MCT	LA'	NA'

A Figura 2.1 apresenta as curvas granulométricas das amostras de solos S1 e S2, as quais foram classificadas (Tabela 2.4) segundo a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), de acordo com a CLA 259 (DNER, 1996a), e segundo os sistemas de classificação de solos TRB (*Transportation Research Board*), conforme a M 145-91 (AASHTO, 2017), e USC (*Unified Soil Classification*), conforme a D2487 (ASTM, 2017). As curvas de distribuição granulométrica permitiram concluir que a amostra de solo S1 possui um alto teor de partículas de tamanho argila (argila areno-siltosa), enquanto na amostra de solo S2 predominam as partículas de tamanho areia (areia silto-argilosa).

Figura 2.1: Curvas granulométricas das amostras de solo S1 e S2.



As análises químicas das amostras de solos foram realizadas pela técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), sendo os resultados apresentados na Tabela 2.5, na qual também se encontram os respectivos valores de perda ao fogo.

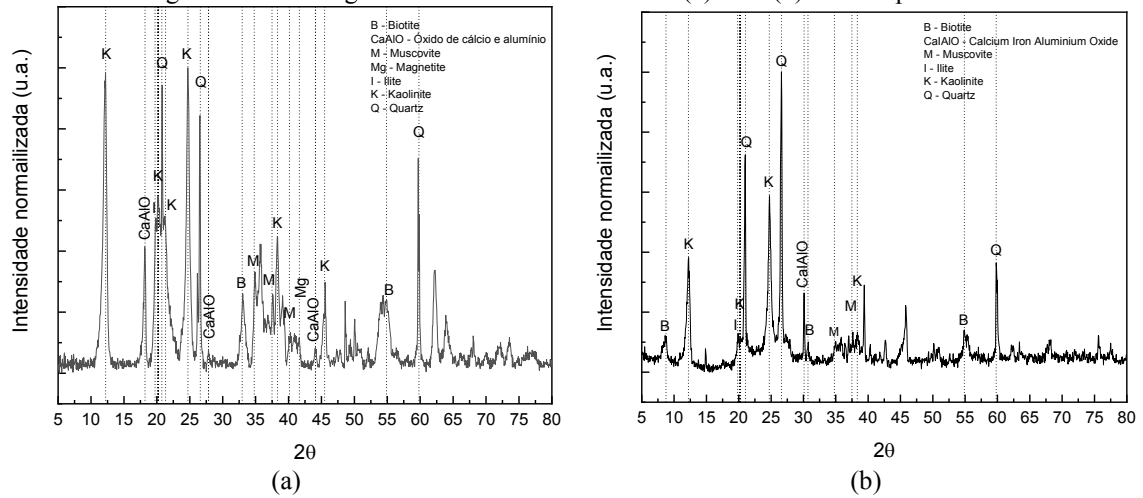
Tabela 2.5: Composição química obtida por FRX e perda ao fogo das amostras de solos S1 e S2.

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

*Perda ao fogo

As constituições mineralógicas das amostras de solos foram obtidas por Difração de Raios-X (DRX), sendo realizadas medidas teta-2teta na faixa de 5 a 80 graus, utilizando passo de 0,05 graus, com 1 segundo por passo. Os resultados da análise de DRX são apresentados nas Figuras 2.2a e 2.2b para as amostras de solo S1 e S2, respectivamente.

Figura 2.2: Difratogramas das amostras de solo S1(a) e S2 (b) obtidos por DRX.



Observou-se a predominância dos compostos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 para a amostra de solo S1, os quais também foram encontrados na amostra de solo S2. As amostras de solos são caulínicas, como a maioria dos solos brasileiros, portanto seus principais constituintes são a caulinita e o quartzo (LOPES *et al.*, 2019). Conseqüentemente, altos níveis de SiO_2 e Al_2O_3 foram observados. A presença de magnetita na amostra de solo S1 é o principal fator para sua coloração avermelhada (CASTAGNOTTO *et al.*, 2021; LIU, C. *et al.*, 2021; MATHIAN *et al.*, 2020). A caulinita, presente na amostra de solo S2, é um silicato de alumínio hidratado que pode se apresentar sob as cores branco, branco-acinzentado ou levemente colorido (VARGA, 2007). A coloração da amostra de solo S2 é branco-acinzentado com baixa pigmentação amarela, a qual também foi observada em solos argilosos com predominância do argilomineral caulinita estudados por outros autores (AMIRI; NAZIR; DEGHANBANADAKI, 2018; MORSI *et al.*, 2019).

As caracterizações microestruturais das amostras de solos foram realizadas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons secundários. As imagens microestruturais da amostra de solo S1 mostraram que o solo apresentou granulação fina (Figura 2.3) com predominância de grãos de diâmetros menores que $2\mu\text{m}$ e com forma lamelar. A amostra de solo S2 apresentou grãos de tamanhos maiores do que $0,1\text{ mm}$, sendo esses de forma cúbica (Figura 2.4), e seus finos apresentaram formas lamelares e prismáticas. A amostra de solo S1 apresenta uma estrutura mais compacta, quando comparada à amostra de solo S2, resultado de sua granulometria mais fina e do efeito da agregação de suas partículas através dos óxidos de ferro e de alumínio (WU *et al.*, 2019).

Figura 2.3: Micrografias da amostra de solo S1 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.

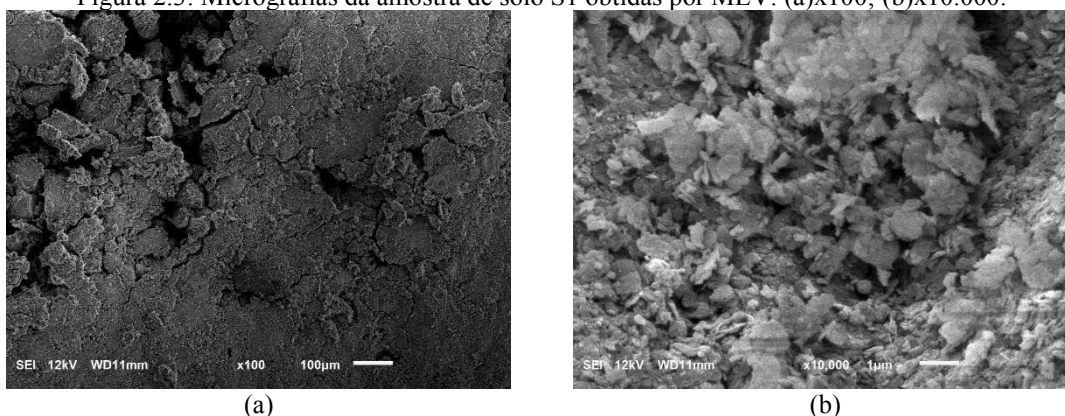
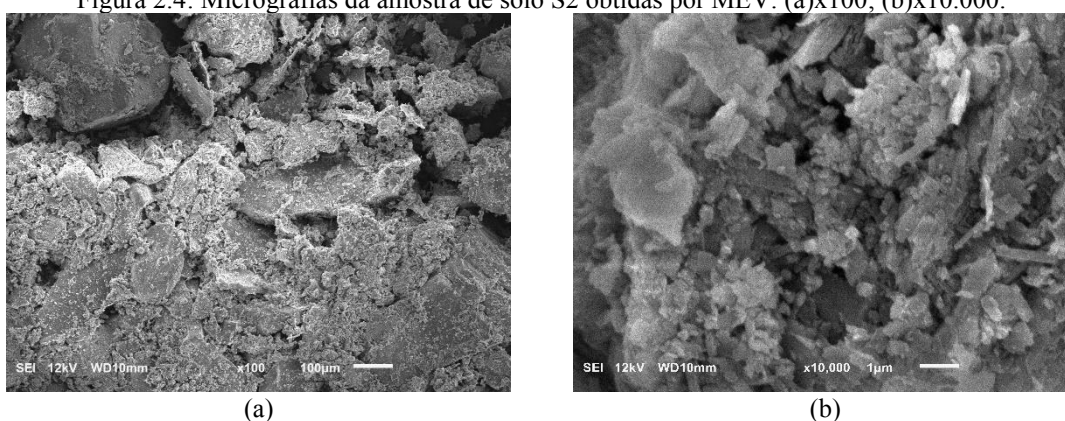


Figura 2.4: Micrografias da amostra de solo S2 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.



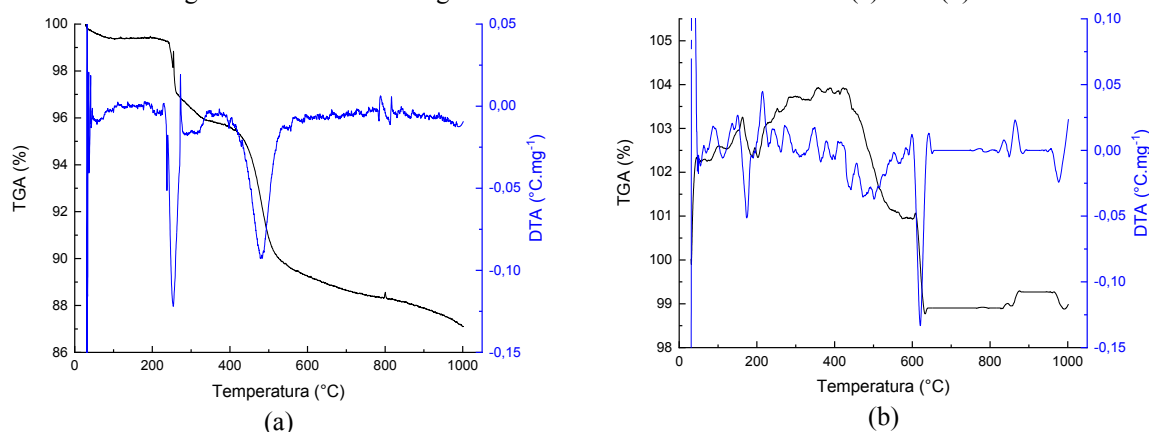
O ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi realizado para se obter os elementos químicos presentes nas amostras de solos S1 e S2 (Tabela 2.6). Os dados obtidos por EDS corroboraram os dados obtidos por FRX, mostrando que a amostra de solo S1 possui quantidade significativa de Ferro e que a amostra de solo S2 possui uma maior quantidade de Silício.

Tabela 2.6: Elementos químicos presentes nas amostras de solo S1 e S2.

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

A análise termogravimétrica foi executada segundo a NBR 5753 (ABNT, 2016g), conforme apresentada nas Figuras 2.5a e 2.5b, para as amostras de solos S1 e S2, respectivamente.

Figura 2.5: Análise termogravimétrica das amostras de solos S1 (a) e S2 (b).



Os registros da análise termogravimétrica são tradicionalmente divididos em quatro faixas de temperatura. As perdas de massa até 200 °C foram atribuídas à perda de água livre e de água adsorvida pelas partículas dos materiais (KUČERÍK *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2011). A faixa de temperatura entre 200 a 450 °C descreve a decomposição de matéria orgânica (PLANTE; FERNÁNDEZ; LEIFELD, 2009; TOKARSKI *et al.*, 2020). Na faixa de temperatura de 390 a 650 °C, a perda de massa pode ser atribuída à desidroxilação de argilominerais como a Caulinita, embora a decomposição residual da matéria orgânica possa estar presente (ADENIYI *et al.*, 2020; AVET; SCRIVENER, 2020; ELHADJ; PERRIN, 2021; MAKÓ *et al.*, 2009; SERRA *et al.*, 2013; SIEWERT; KUČERÍK, 2015; TOKARSKI *et al.*, 2020).

Diante do exposto, a amostra de solo S1 apresentou dois picos de perda de massa, sendo o primeiro, na temperatura de 250 °C, correspondente à fase de decomposição de matéria orgânica, e o segundo, na temperatura de 480 °C, correspondente à perda de massa decorrente da decomposição e desidroxilação dos argilominerais, o que está em consonância com a elevada porcentagem de fração argila desse material. Para a amostra de solo S2, houve um pico na temperatura de 190 °C, devido à evaporação de água adsorvida, e um pico de alta intensidade na temperatura de 600 °C, devido à decomposição e desidroxilação dos argilominerais.

2.3.1.2. Escória de aciaria elétrica primária

A amostra de escória de aciaria elétrica primária (EAEP) foi fornecida por uma empresa que atua no setor de fabricação de tubos metálicos, localizada na Região do Alto Paraopeba, Estado de Minas Gerais, Brasil. A coleta das amostras de EAEP em seu estado original (escória bruta) foi realizada de acordo com a norma técnica NBR 10007 (ABNT, 2004). A amostra de

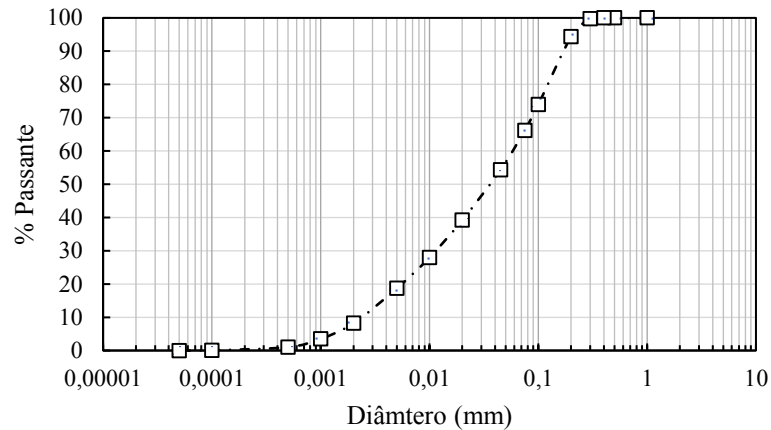
EAEP utilizada foi proveniente de locais de estocagem recente, no qual o tempo máximo entre sua geração e sua disposição foi de 72 horas, não sendo empregado qualquer processo de cura do material antes da realização dos ensaios.

Para a preparação das amostras para os ensaios de caracterização, esse material foi moído para redução da sua granulometria em partículas de diâmetros menores que 0,6 mm (peneira #30), tamanho semelhante ao que foi utilizado em estudos prévios (AKINWUMI, 2014; MAHMUDI; ALTUN; ESKISAR, 2021; MANSO *et al.*, 2013), a fim de aumentar a sua superfície específica e alcançar valor próximo de 1800 cm²/g, o qual foi utilizado para a escória de aciaria no estudo desenvolvido por Sheen; Le e Lam (2021). A redução das amostras de EAEP foi realizada de acordo com as recomendações do procedimento PRO 199 (DNER, 1996b), e a preparação para a realização de ensaios de laboratório conforme a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Os ensaios de caracterização física das amostras de EAEP realizados foram: finura por peneiramento, de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2012b), superfície específica pelo método de Blaine, conforme a NBR 16372 (ABNT, 2015), massa específica da escória moída, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017), e distribuição granulométrica do material depois de passado na peneira de 0,6 mm, determinada por difração a laser conforme a norma ISO 13320 (ISO, 2020).

A amostra de EAEP moída apresentou índice de finura por peneiramento de 24,88%, o qual é um alto valor para materiais cimentícios no Brasil (LOPES *et al.*, 2021). A superfície específica pelo método de Blaine foi de 0,20 m²/g, valor próximo ao valor requerido para cimento Portland, o qual deve ser superior a 0,24 m²/g (DINIZ *et al.*, 2017). O resultado do ensaio de massa específica dos sólidos foi de 3,7 g/cm³. A curva granulométrica da amostra de EAEP moída é apresentada na

Figura 2.6: Curva granulométrica da amostra de EAEP moída.



Os ensaios de caracterização química da EAEP foram realizados seguindo as metodologias preconizadas pelos métodos de ensaios utilizados para a caracterização química de cimento Portland. Foram realizados os seguintes ensaios: i) Óxidos por Fluorescência de Raios-X (FRX); ii) Perda ao fogo, conforme a NBR NM 18 (ABNT, 2012c); iii) Cal livre, segundo a NBR NM 13 (ABNT, 2012d); e iv) Resíduo insolúvel, de acordo com a NBR NM 15 (ABNT, 2012e). O ensaio de pozolanicidade foi executado por método termogravimétrico, segundo a NBR 5753 (ABNT, 2016g), e os ensaios mineralógicos e microestruturais seguiram os mesmos procedimentos utilizados para as amostras de solos analisadas. Os resultados da análise por FRX e perda ao fogo são apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Composição química e perda ao fogo de amostra de EAEP.

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	PF* (%)
EAEP	21,35	5,17	24,50	33,15	1,01	0,30	0,00	0,64	0,18	0,32	0,19

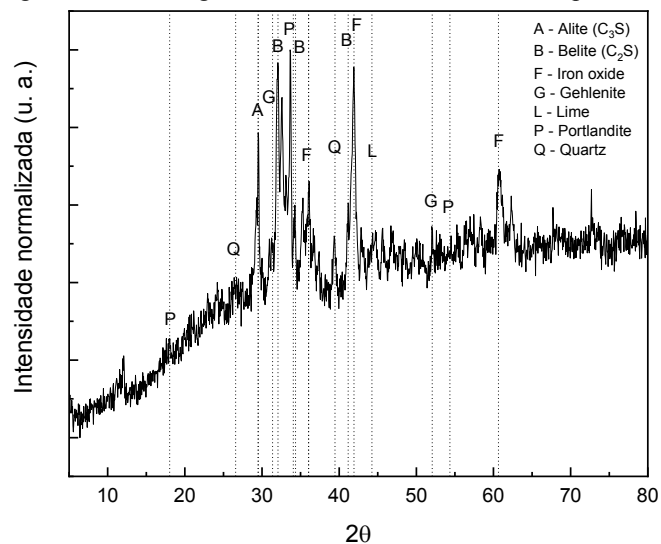
*Perda ao fogo

Os compostos químicos e suas respectivas porcentagens presentes na amostra de EAEP estão em concordância com os encontrados na literatura técnica (BRAND *et al.*, 2020; ISMAIL; AWAD; MWAFY, 2019; LI *et al.*, 2020; ZIAEE; BEHNIA, 2020). O valor do índice de hidráulidade $[(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO})]$ foi de 1,49, classificando a EAEP como fortemente hidráulica (BORGES MARINHO *et al.*, 2017).

A Figura 2.7 apresenta o resultado da mineralogia da amostra de EAEP obtida por DRX. Através do difratograma, observou-se uma ampla gama de minerais constituintes do material. Os picos de alta intensidade de óxido de cálcio (*lime*) e óxido de ferro confirmam os resultados da análise por FRX. A presença de óxido de cálcio e óxido de magnésio pode induzir problemas

de expansão volumétrica devido à reação de óxido de cálcio e óxido de magnésio com a água (BRAND *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2020). A presença de óxidos de ferro garante elevadas dureza e massa específica para a EAEP (ARRIBAS *et al.*, 2015).

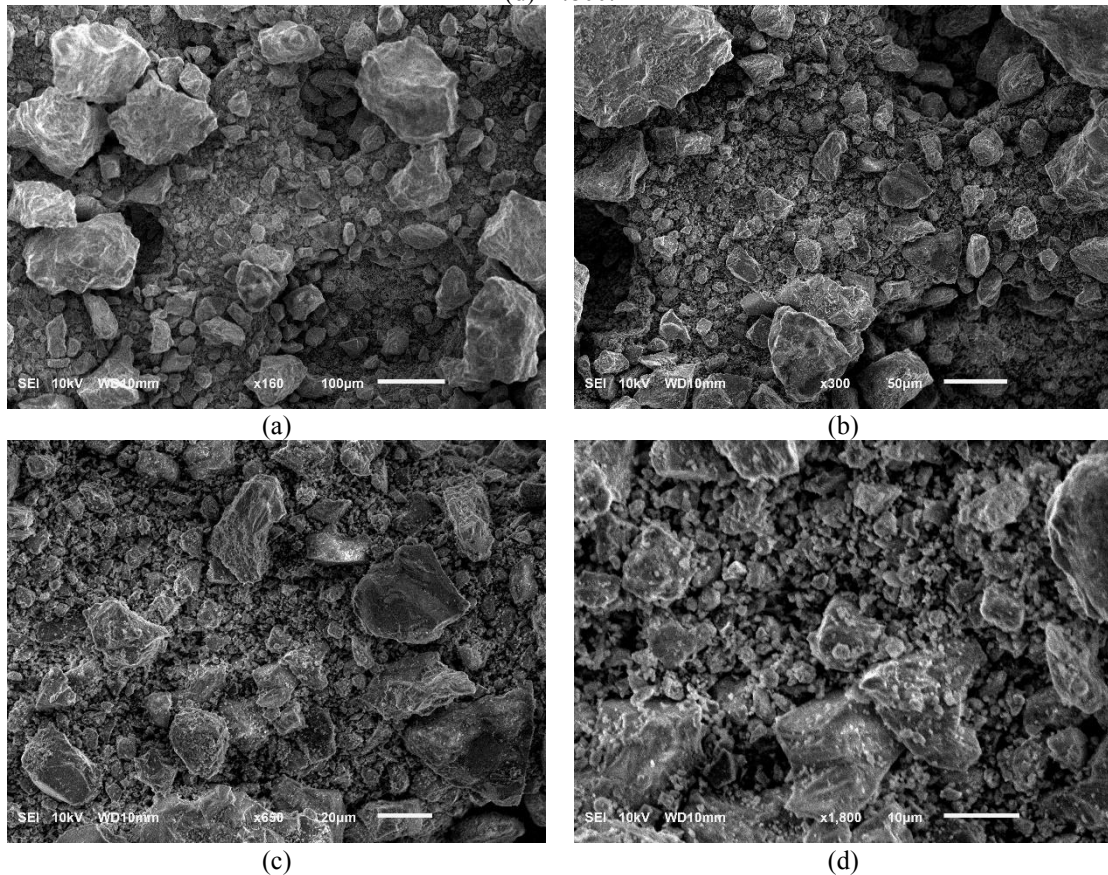
Figura 2.7: Difratoograma da amostra de EAEP obtida por DRX.



A amostra de EAEP apresentou 7,94% de resíduo insolúvel e 0,74% de cal livre, de acordo com os ensaios realizados segundo as normas técnicas NBR NM 15 (ABNT, 2012e) e NBR NM 13 (ABNT, 2012d), respectivamente. O resultado da cal livre obtido, que se encontra abaixo de 1%, habilita o material para utilização em obras rodoviárias (GRAFFITTI, 2002).

A Figura 2.8 apresenta as imagens microestruturais da amostra de EAEP obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Através das micrografias, observou-se que as partículas apresentaram morfologia irregular de alongada a cúbica, além de apresentarem superfície rugosa. Essas características são um dos fatores que afetam a trabalhabilidade de concretos (COPPOLA *et al.*, 2016; LIM; CHEAH; RAMLI, 2019), fornecendo também uma melhor qualidade de interação e ligação com outros materiais, proporcionando um aumento de resistência do conjunto (LIM; CHEAH; RAMLI, 2019). O ângulo de atrito interno dos materiais depende principalmente da morfologia e da rugosidade da superfície das partículas, sendo que quanto mais rugosas e mais irregulares forem as partículas, maior será o ângulo de atrito e, conseqüentemente, maior a resistência ao cisalhamento (CHO; DODDS; SANTAMARINA, 2006; MARZULLI *et al.*, 2021; MOLLON *et al.*, 2020; NARDELLI; COOP, 2019; SANDEEP; HE; SENETAKIS, 2018; SANDEEP; SENETAKIS, 2018).

Figura 2.8: Micrografias da amostra de EAEP obtidas por MEV: (a)x160, (b)x300, (c)x650 e (d)x1.800.



O ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi realizado para se obter os elementos químicos presentes na amostra de EAEP (Tabela 2.8).

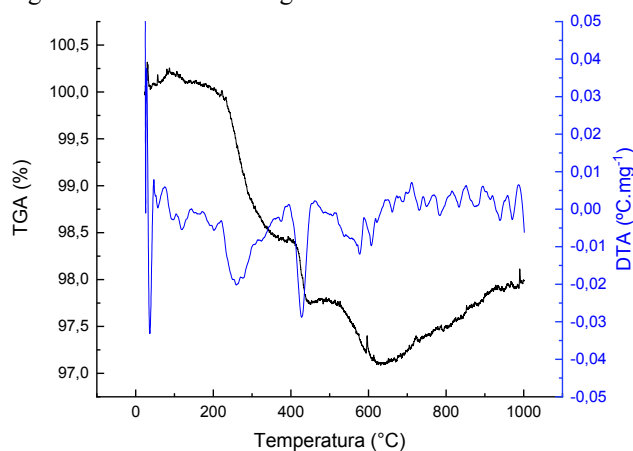
Tabela 2.8: Elementos químicos presentes na amostra de EAEP.

Fórmula química	% em massa
C	3,51
O	35,17
Na	0,04
Mg	2,65
Al	2,79
Si	5,80
P	0,34
S	0,15
K	0,03
Ca	29,57
Mn	2,92

A Figura 2.9 apresenta a análise termogravimétrica da amostra de EAEP realizada segundo a NBR 5753 (ABNT, 2016g). Alguns autores dividiram a região do gráfico representativo da análise termogravimétrica de escórias de aciaria elétrica em três regiões: de 100°C a 400°C, 400°C a 500°C e 500°C a 1000°C. A perda de massa na faixa de temperatura

de 100°C a 400°C representa a desidratação de C-S-H, C-A-H e Mg(OH)₂, a desidratação de Ca(OH)₂ representa a faixa de temperatura de 400°C a 500°C e a faixa de temperatura de 500°C a 1000°C representa a perda de CO₂ pela descarbonatação do CaCO₃ (BRAND *et al.*, 2020; MAHOUTIAN; GHOULEH; SHAO, 2014). A amostra deste estudo apresentou alterações mais significativas de massa nas duas primeiras regiões, sendo que a decomposição de Ca(OH)₂, na faixa entre 400°C a 500°C, corrobora os resultados dos ensaios de FRX e DRX, indicando a presença de compostos à base de cálcio.

Figura 2.9: Análise termogravimétrica da amostra de EAEP.



2.3.1.3. Cinza volante

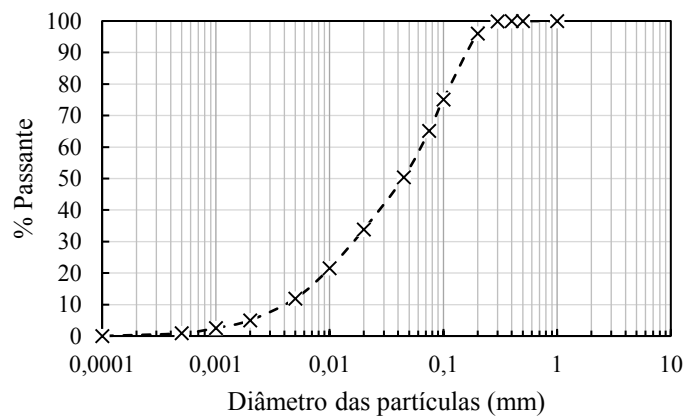
A amostra de cinza volante foi fornecida por uma empresa que atua no beneficiamento e comercialização de cinzas pozzolânicas, material proveniente da queima do carvão mineral, situada no Município de Capivari de Baixo, Estado de Santa Catarina, Brasil. A cinza volante utilizada foi classificada como de classe C, conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), e como de classe F, de acordo com a norma técnica C618 (ASTM, 2019). Ambas as classificações se referem a cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termelétricas com propriedades pozzolânicas. Sua produção atendeu aos requisitos da norma técnica NBR 12653 (ABNT, 2014). A preparação das amostras para os ensaios de caracterização seguiu os procedimentos estabelecidos pela norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Para a caracterização física da amostra de cinza volante, foram realizados os seguintes ensaios: i) índice de finura por peneiramento na peneira de 75 µm, conforme a norma técnica NBR 11579 (ABNT, 2012b); ii) superfície específica pelo método de Blaine, conforme a NBR 16372 (ABNT, 2015); iii) massa específica dos sólidos, segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017);

e iv) distribuição granulométrica determinada por difração à laser, conforme a norma ISO 13320 (ISO, 2020).

A amostra de cinza volante apresentou índice de finura por peneiramento de 23,71%, superfície específica de 1788,24 cm²/g e massa específica dos sólidos de 2,08 g/cm³. A Figura 2.10 apresenta a distribuição granulométrica da amostra de cinza volante.

Figura 2.10: Curva granulométrica da amostra de cinza volante.



Os ensaios de laboratório para as caracterizações química, mineralógica, microestrutural e de pozolanicidade da amostra de cinza volante seguiram os mesmos procedimentos utilizados para as amostras de EAEP. A Tabela 2.9 apresenta os resultados da análise química por FRX e de perda ao fogo, os quais são compatíveis com os resultados encontrados na literatura técnica.

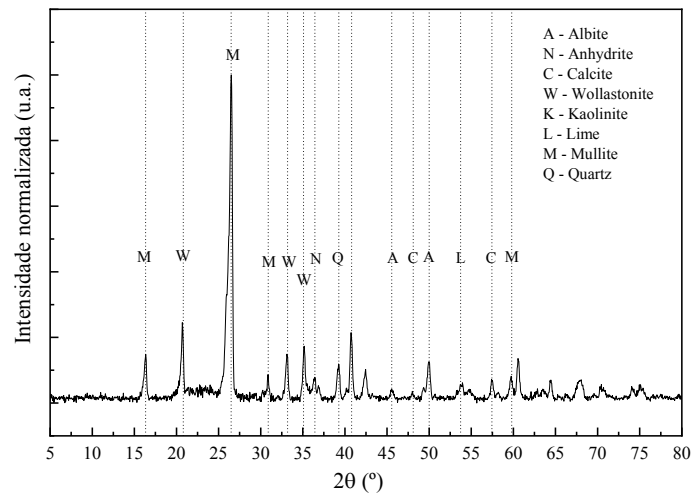
Tabela 2.9: Composição química e perda ao fogo da amostra de cinza volante.

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	PF* (%)
Cinza volante	57,50	22,69	4,00	1,66	1,03	2,67	1,33	1,06	0,35	0,20	1,50

*Perda ao fogo

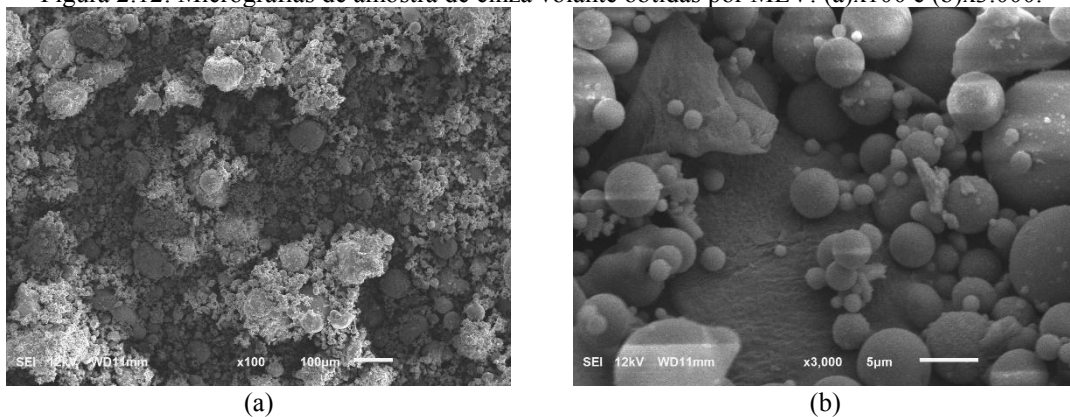
A mineralogia, obtida por DRX, é apresentada na Figura 2.11. Observou-se que a alta intensidade do composto químico *mullite* (Al₂O₃.SiO₂) está de acordo com o resultado encontrado na análise química por FRX. Os óxidos de silício e de alumínio são responsáveis pela formação dos compostos cimentícios C-S-H, C-A-H e C-A-S-H quando se combinam com hidróxido de cálcio, o que acarreta alterações nas propriedades de engenharia de solos estabilizados com cal, cimento ou outro componente que possui grande quantidade de óxido ou hidróxido de cal em sua constituição (YOOBANPOT *et al.*, 2020).

Figura 2.11: Difratograma da amostra de cinza volante obtida por DRX.



As imagens microestruturais da amostra de cinza volante (Figura 2.12) mostraram que o material apresenta partículas de diversos diâmetros com forma predominantemente esférica.

Figura 2.12: Micrografias de amostra de cinza volante obtidas por MEV: (a)x100 e (b)x3.000.



Através do ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (Tabela 2.10), verificou-se que a amostra de cinza volante é constituída, principalmente, pelos elementos químicos Carbono, Oxigênio, Silício e Alumínio, estando de acordo com os resultados obtidos por FRX.

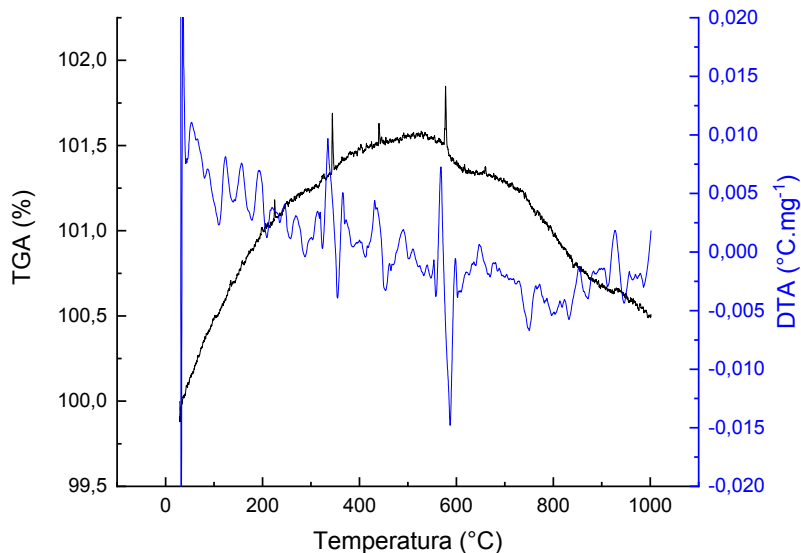
Tabela 2.10: Elementos químicos presentes na amostra de cinza volante.

Fórmula química	% em massa
C	64,86
O	20,20
Al	5,91
Si	9,03

O resultado da análise termogravimétrica realizada sobre a amostra de cinza volante é apresentado na Figura 2.13. Na faixa de temperatura entre 340°C e 460°C há a decomposição de hidróxido de cálcio, entre 530 °C e 700°C ocorre a decomposição de carbonato de cálcio e

acima de 820°C ocorre a decomposição de minerais sulfato (CONSOLI *et al.*, 2018; COUDERT *et al.*, 2019).

Figura 2.13: Análise termogravimétrica da amostra de cinza volante.



2.3.2. Métodos

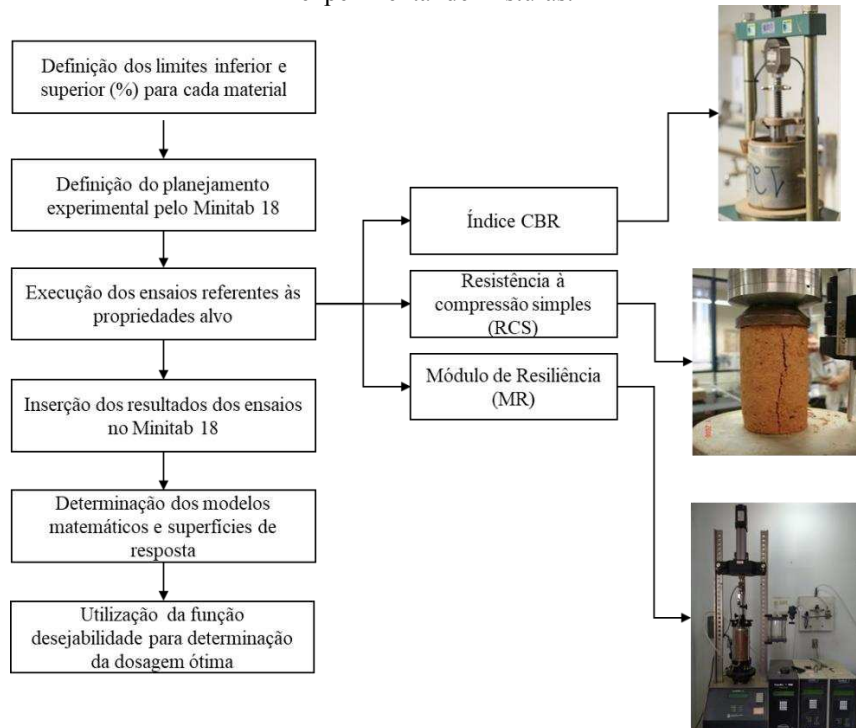
2.3.2.1. Caracterização ambiental das amostras de EAEP e cinza volante

A caracterização ambiental das amostras de EAEP moída e cinza volante foram realizadas conforme a norma técnica NBR 10004 (ABNT, 2004a). Para que a classificação de cada resíduo industrial pudesse ser determinada, os ensaios de lixiviação e de solubilização foram realizados, conforme as normas técnicas NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2004c), respectivamente.

2.3.2.2. Método simplex-centróide

Para avaliar a influência das amostras de EAEP e cinza volante para fins de estabilização química das amostras de solos analisadas, utilizou-se o método estatístico de planejamento experimental em rede simplex-centróide, o qual foi aplicado em um sistema multicomponente composto por esses materiais. Para a realização desse procedimento, foi utilizado o *software* estatístico Minitab 18. Um fluxograma com o procedimento para a determinação da dosagem ótima é apresentado na Figura 2.14.

Figura 2.14: Fluxograma do procedimento do método simplex-centróide para otimização de planejamento experimental de misturas.

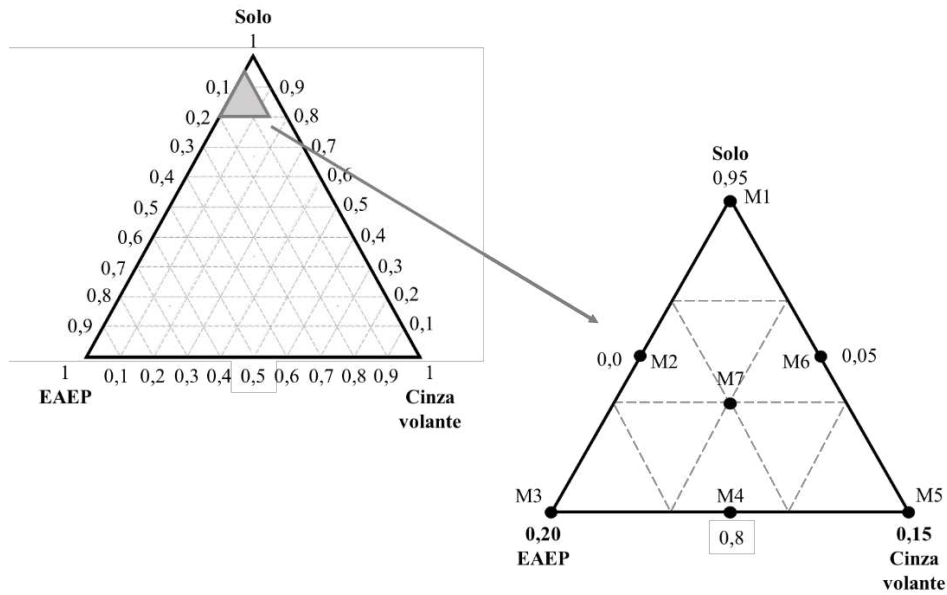


2.3.2.2.1. Planejamento experimental

O conjunto de resíduos (EAEP e cinza volante) foi utilizado na proporção máxima de 20% em relação à massa seca das misturas solo-resíduos (solo-EAEP-cinza volante), sendo que o teor de EAEP foi fixado entre 5 e 20% e o teor de cinza volante foi fixado entre 0 e 15%. Estes limites foram fixados em função de estudos prévios que utilizaram misturas de solo, EAEP e cinza volante (ISMAIL; AWAD; MWAFY, 2019; MONTENEGRO-COOPER *et al.*, 2019; XU; YI, 2020). Para as amostras de solos, o limite superior foi de 95% e o limite inferior de 80%, sendo este último valor definido com base na soma de todos os componentes, que deve ser igual a 100% (FICAGNA *et al.*, 2020). De posse das restrições inferior e superior das porcentagens de cada componente, foram definidos os pseudocomponentes.

Utilizando o método de planejamento experimental em rede simplex-centróide para três componentes, foram gerados 7 pontos no interior de um triângulo equilátero, o qual constitui um espaço denominado de rede simplex. Portanto, foram gerados três pontos nos vértices, três nas arestas e um no baricentro. O triângulo equilátero gerado com os componentes no estado puro e o triângulo gerado com os pseudocomponentes são apresentados na Figura 2.15.

Figura 2.15: Planejamento experimental das misturas.



As proporções de cada mistura gerada pelo *software* Minitab 18, para as duas amostras de solos analisadas (S1 e S2), respeitando os limites inferiores e superiores de cada componente, são apresentadas na Tabela 2.11. As porcentagens dos materiais foram determinadas considerando suas respectivas massas secas em relação à massa seca total da mistura.

Tabela 2.11: Misturas solo-resíduos definidas no planejamento experimental.

Mistura	Solo (%)	EAEP (%)	Cinza volante (%)
M1	95	5	0
M2	87,5	12,5	0
M3	80	20	0
M4	80	12,5	7,5
M5	80	5	15
M6	87,5	5	7,5
M7	85	10	5

As propriedades mecânicas utilizadas para avaliação do planejamento experimental desta pesquisa foram a resistência à compressão simples (RCS), o módulo de resiliência (MR) e o índice CBR de corpos de prova compactados das misturas analisadas, conforme as respectivas normas técnicas NBR 12025 (ABNT, 2012f), ME 134 (DNIT, 2018) e NBR 9895 (ABNT, 2016h). Essas propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas com os critérios de seleção de materiais para composição de camadas estruturais de pavimentos rodoviários, conforme recomendações da norma técnica NBR 12253 (ABNT, 2012a) e do DNIT (2006).

As análises dos resultados foram realizadas em termos de pseudocomponentes, e o método de ajuste dos modelos matemáticos utilizado foi o *stepwise*, o qual retira

automaticamente os termos que não são significativos. O nível de significância adotado nas análises foi de 10%, ou seja, os termos que tiveram p-valor maior que 0,10 foram removidos, pois foram considerados não significativos.

2.3.2.2.2. Ensaio de compactação

Para a realização dos ensaios de laboratório utilizados na otimização do planejamento experimental, foram obtidas as curvas de compactação na energia do Proctor Normal para cada mistura, visando às determinações dos pesos específicos aparentes secos máximos (γ_{dmax}) e dos teores de umidade ótimo (w_{ot}), conforme recomendações da NBR 7182 (ABNT, 2016f).

2.3.2.2.3. Moldagem de corpos de prova dos ensaios de desempenho

Para a determinação das propriedades mecânicas de cada mistura analisada, foram moldados, no teor de umidade ótimo, três corpos de prova, os quais foram submetidos a um processo de cura selada (em filme de PVC) em câmara úmida por sete dias, para que as propriedades cimentantes pudessem ser avaliadas (MAGHOOL *et al.*, 2016). Os corpos de prova produzidos para a avaliação da RCS foram confeccionados em moldes cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 127 mm, conforme a norma técnica NBR 12024 (ABNT, 2012g). Para o ensaio de MR, os corpos de prova foram moldados em um molde cilíndrico de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, conforme a norma técnica ME 134 (DNIT, 2018). As dimensões dos corpos de prova moldados para o ensaio de índice CBR foram de 150,8 mm de diâmetro e 177,8 mm de altura, de acordo com a norma técnica NBR 9895 (2016h).

2.3.2.2.4. Resistência à compressão simples

O ensaio de RCS foi realizado em corpos de prova das amostras de solos em sua condição natural e das misturas solo-resíduos analisadas, de acordo com a norma técnica NBR 12025 (ABNT, 2012f).

2.3.2.2.5. Módulo de resiliência

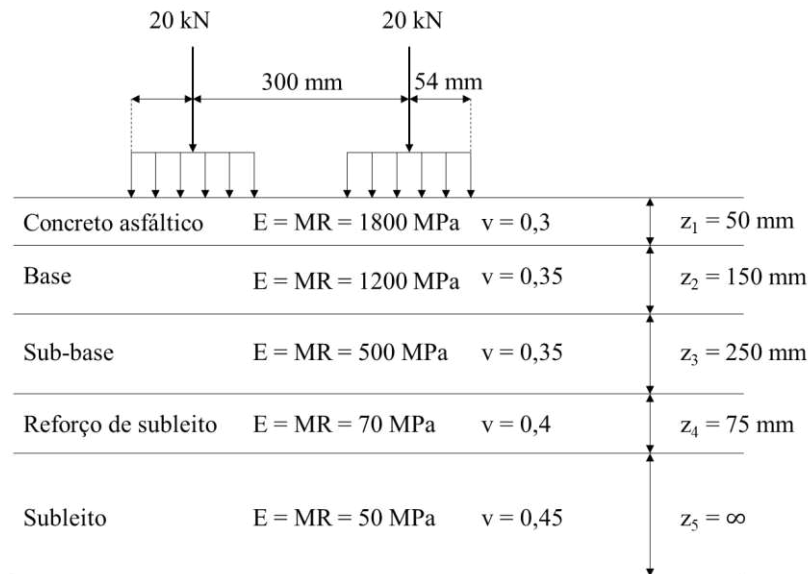
O ensaio de MR foi realizado conforme a norma técnica ME 134 (DNIT, 2018), utilizando os pares de tensões sugeridos para amostras de solos a serem utilizadas na composição de camada de subleito, sendo que o pulso do carregamento teve duração de 0,1 segundo e o período de repouso teve duração de 0,9 segundo, totalizando um ciclo de 1 segundo.

O modelo composto [Equação (2.3)], proposto por Pezo *et al.* (1992), foi utilizado para realizar a regressão dos dados de MR, para as amostras de solo S1 e S2 e para as sete misturas solo-resíduos para cada amostra de solo. O modelo composto relaciona o MR com a tensão confinante (σ_3) e com a tensão desvio (σ_d), sendo os coeficientes k_1 , k_2 e k_3 constantes experimentais que variam conforme a unidade de medida utilizada. Neste trabalho, foi adotada a unidade de MPa, a qual também é utilizada pelos órgãos nacionais do setor de pavimentação. O modelo composto não depende do conhecimento prévio quanto ao comportamento predominante do material, se granular ou argiloso, sendo capaz de avaliar o valor do MR com maior precisão do que os modelos que dependem apenas de σ_3 ou de σ_d (MEDINA; MOTTA, 2015).

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (2.3)$$

A fim de se realizar a comparação entre os valores de MR de cada mistura solo-resíduos em um determinado estado de tensões, foi adotado o pavimento asfáltico utilizado no estudo de Nega e Nikraz (2017), o qual é representado na Figura 2.16. Os estados de tensões escolhidos foram representativos das camadas de base, sub-base e reforço do subleito, os quais foram determinados no ponto médio de cada camada analisada através do *software* AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) considerando o pavimento de Nega e Nikraz (2017). A consideração para a escolha do ponto médio de cada camada para obtenção dos estados de tensões está de acordo com o critério de ruptura por afundamento por trilhas de rodas (AASHTO, 2020; HUANG, 2004; ISLAM; TAREFDER, 2020).

Figura 2.16: Pavimento utilizado para determinação do estado de tensões em cada camada [adaptado de Nega e Nikraz (2017)].



O carregamento utilizado para o cálculo das tensões foi o eixo padrão rodoviário de 80 kN (8,2 tf) utilizado para projeto de pavimentos asfálticos no Brasil, conforme DNIT (2006), o qual é representado na Figura 2.16 pelo seu semi-eixo. A pressão de inflação dos pneus foi considerada como 560 kPa, e o raio da área de contato pneu-pavimento considerado foi de 10,79 cm. A aderência entre as camadas não foi considerada, a qual resultaria em transferência de tensões cisalhantes entre as camadas adjacentes. O módulo de elasticidade das camadas foi adotado como sendo o MR linear das camadas. As espessuras, as massas específicas aparentes, o MR e o coeficiente de Poisson de cada camada foram inseridos no *software* AEMC para determinação dos estados de tensões no ponto médio de cada uma dessas camadas.

Utilizando o estado de tensões determinado através do *software* AEMC para cada camada, o valor de MR para cada mistura solo-resíduos, em relação a uma camada específica, foi calculado conforme a Equação (2.3).

2.3.2.2.6. Índice CBR

Os ensaios para a determinação dos valores de CBR e da Expansão CBR das amostras de solos na condição natural e das misturas solo-resíduos analisadas foram realizados segundo a norma técnica NBR 9895 (ABNT, 2016h). Após a compactação dos corpos de prova, os mesmos foram envoltos em saco plástico e inseridos em câmara úmida por sete dias para a realização do procedimento de cura selada. Após esse período, os corpos de prova foram

imersos em água por 96 horas para avaliação da expansão. Terminado o período de expansão, os corpos de prova foram retirados da imersão, deixados em repouso por 15 minutos para retirar o excesso de água e submetidos ao carregamento na prensa para a determinação do seu índice CBR.

2.3.2.2.7. Otimização através da função desejabilidade

Os valores médios dos resultados dos ensaios mecânicos utilizados para otimização do planejamento experimental fomentaram as superfícies de resposta, as quais foram determinadas para as camadas de base, sub-base e reforço de subleito, permitindo a identificação da região de maximização para cada propriedade mecânica analisada. Para determinar a mistura ótima dentro dessa região, foi realizada a otimização através da função desejabilidade no *software* Minitab 18.

Segundo Pandey *et al.* (2020), na otimização de múltiplas respostas, a função de desejabilidade transforma cada resposta em um valor de desejabilidade entre 0 e 1. Cada propriedade analisada é associada a uma função de desejabilidade individual. Todas as funções de desejabilidade individuais são combinadas para formar uma função de desejabilidade composta que converte uma resposta múltipla em uma única resposta. Ambas as funções de desejabilidades individuais e composta possuem valores que variam entre 0 e 1, representando a proximidade de uma resposta ao seu valor ideal. Se a resposta cair dentro dos intervalos ideais ou se a resposta atingir seu valor ideal, a desejabilidade é 1. Além disso, quando a resposta está dentro do intervalo de tolerância, mas não no intervalo ideal, a desejabilidade fica entre 0 e 1.

A fim de realizar a otimização das propriedades analisadas através da função de desejabilidade, foram definidos limites mínimos a serem alcançados para cada propriedade, objetivando-se a aplicação das misturas nas camadas estruturais (base, sub-base e reforço de subleito) de um pavimento asfáltico.

Para verificar a adequabilidade das misturas solo-resíduos a fim de serem utilizadas em camada de base, foi adotado o valor mínimo de 690 kPa para a RCS, conforme Gautreau; Zhang e Wu (2010) e T 220 (AASHTO, 2018). Para o MR, os valores mínimos foram extraídos de AASHTO (2020), sendo 82,74 MPa para solos finos (amostra de solo S1) e 165,47 MPa para solos granulares (amostra de solo S2). Para o índice CBR, o valor mínimo adotado foi 60%,

conforme o DNIT (2006), o qual é indicado para camadas de base de pavimentos asfálticos destinados a suportar um número de solicitações do eixo padrão menor que 5×10^6 .

A fim de que as misturas de solo-resíduos possam ser utilizadas em camada de sub-base, foi adotado o valor mínimo aceitável de RCS de 690 kPa, segundo Gautreau; Zhang e Wu (2010). Conforme o AASHTO (2020), os valores mínimos adotados para aceitação de solos argilosos e arenosos para a camada de sub-base são 82,74 MPa e 165,47 MPa, respectivamente. Para o índice CBR, o valor mínimo adotado foi de 20%, conforme DNIT (2006).

Para a camada de reforço de subleito, os valores mínimos de RCS, MR e índice CBR adotados foram 345 kPa, 68,95 kPa e 2%, conforme Gautreau; Zhang e Wu (2010), AASHTO (2020) e DNIT (2006), respectivamente.

Foram realizados, para a mistura ótima de cada amostra de solo analisada, os ensaios de limite de liquidez, conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016c), limite de plasticidade, segundo a NBR 7180 (ABNT, 2016d), Mini-MCV, de acordo com a ME 258 (DNIT, 1994b), e Perda de massa por imersão, segundo a ME 256 (DNIT, 1994c), visando as classificações geotécnicas tradicionais e pela metodologia MCT.

2.4. Resultados e discussões

2.4.1. Caracterização ambiental

Nas Tabelas 2.12 e 2.13, são apresentados os resultados obtidos nas análises dos extratos lixiviados e solubilizados das amostras de EAEP e cinza volante. São também apresentados os limites máximos de concentração dos elementos para a classificação dos resíduos industriais, conforme a norma técnica NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Tabela 2.12: Concentrações dos elementos nos extratos lixiviados.

Elemento	Limite máximo do elemento (mg/L)	EAEP	Cinza volante
K	-	-	11,93
Ca	-	1928,61	254,09
Mg	-	2,33	2,97
S	-	6,10	51,26
Cu	-	-	0,04
Fe	-	-	-
Zn	-	-	0,14
Mn	-	-	1,04
B	-	0,67	2,27
Cd	0,5	-	-
Cr	5	-	0,11
Pb	1	-	-
Al	-	6,58	8,44
Na	-	23,03	1446,64
As	1	-	0,26
Ba	70	1,46	0,16

Tabela 2.13: Concentrações dos elementos nos extratos solubilizados.

Elemento	Limite máximo do elemento (mg/L)	EAEP	Cinza volante
K	-	8,47	13,33
Ca	-	138,36	212,82
Mg	-	-	-
S	-	3,09	138,69
Cu	2	-	-
Fe	0,3	0,58	0,15
Zn	5	-	-
Mn	0,1	-	-
B	-	0,40	3,03
Cd	0,005	-	-
Cr	0,05	-	0,21
Pb	0,01	-	-
Al	0,2	26,55	-
Na	200	7,53	13,21

As concentrações dos elementos químicos nos extratos lixiviados das amostras de EAEP moída e cinza volante ficaram abaixo dos limites máximos estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004) para que um resíduo sólido pudesse ser considerado perigoso ao meio ambiente. Portanto, tanto a amostra de EAEP moída quanto a amostra de cinza volante poderiam ser utilizadas para a aplicação em misturas com amostras de solo visando sua aplicação em camadas estruturais de pavimentos.

No extrato solubilizado da amostra de EAEP moída, os elementos Ferro e Alumínio apresentaram concentrações acima dos limites máximos para que um resíduo sólido fosse considerado como inerte. Os limites máximos de concentração de Ferro e Alumínio de 0,3 mg/L e de 0,2 mg/L, respectivamente, também são recomendados como os limites máximos para não

comprometer a potabilidade de água segundo a Portaria GM/MS nº 888/2021. Isto indica que a amostra de EAEP moída não deve estar em contato direto com as reservas de água. No extrato solubilizado da amostra de cinza volante, foram encontrados acima do limite máximo a concentração do elemento químico Cromo, sendo um impeditivo para o contato direto com reservas de água devido à concentração superior ao limite de 0,05 mg/L também adotado pela Portaria GM/MS nº 888/2021 para garantia da potabilidade da água.

Diante dos resultados apresentados, os resíduos industriais EAEP moída e cinza volante foram classificados como resíduos sólidos da Classe II A – não perigosos não inertes. Inferiu-se que esses resíduos industriais são de baixo impacto ambiental, não sendo considerados agressivos ao meio ambiente e à saúde humana quando aplicados em camadas estruturais de pavimentos como agentes estabilizadores de solos, exceto nos casos em que há o contato direto com reservas de água.

2.4.2. Método de planejamento experimental em rede simplex-centróide

2.4.2.1. Ensaio de compactação

A Tabela 2.14 apresenta os parâmetros de ótimo [peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) e teor de umidade ótimo (w_{ot})] obtidos através das curvas de compactação das misturas analisadas e compactadas na energia do Proctor Normal. Os valores referentes às amostras de solo em seus estados naturais, denominadas como M0 – 100/0/0, também são apresentados.

Tabela 2.14: Parâmetros de ótimo das misturas analisadas para as duas amostras de solo analisadas

Misturas	S1		S2	
	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
M0 - 100/0/0	31,0	13,9	15,0	15,6
M1 - 95/5/0	30,7	14,1	14,8	17,6
M2 - 87,5/12,5/0	29,8	14,5	14,6	17,8
M3 - 80/20/0	28,6	14,9	13,9	18,5
M4 - 80/12,5/7,5	27,8	14,6	14,3	17,6
M5 - 80/5/15	28,3	14,4	14,6	16,8
M6 - 87,5/5/7,5	29,9	14,2	14,4	17,4
M7 - 85/10/5	28,4	14,5	13,9	17,6

M: Mistura – solo (%) / EAEP (%) / Cinza volante (%).

Observou-se que houve redução do teor de umidade ótimo em todas as misturas para as duas amostras de solo analisadas em relação às referidas amostras no estado natural. As maiores reduções ocorreram na mistura M4, para a amostra de solo S1, e nas misturas M3 e M7, para a amostra de solo S2. Observou-se que, com o aumento do teor de resíduos, sobretudo com o teor de EAEP, o teor de umidade ótimo diminuiu, tendência também observada por outros autores

(ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; GUNARTI; RAHARJA, 2020; SEBBAR *et al.*, 2020; ZUMRAWI; BABIKIR, 2017).

Segundo Zumrawi e Babikir (2017), a diminuição do teor de umidade com a adição de EAEP é devida às trocas catiônicas que ocorrem entre os íons de cálcio provenientes da EAEP e os íons presentes na dupla camada difusa das partículas dos solos. De acordo com Aldeeky e Al Hattamleh (2017), essa redução é devida a uma hidratação prévia dos óxidos de cálcio presentes na EAEP, gerando o composto hidróxido de cálcio, o que implica em menor demanda de água na mistura para alcançar seu peso específico aparente seco máximo.

Para as duas amostras de solos, um aumento nos teores de resíduos nas misturas gerou acréscimos nos valores de peso específico aparente seco máximo, sobretudo com a adição de EAEP. Esse aumento se deve ao fato de que a massa específica real da EAEP é maior do que a das duas amostras de solo analisadas. Observou-se que o peso específico aparente seco máximo da mistura M3, para as amostras de solos analisadas, foi o maior dentre todas as misturas, o que resultou em uma estrutura mais densa, que pode contribuir para melhorias nas propriedades mecânicas das amostras de solo.

Resultados de aumento do peso específico aparente seco máximo com adição de EAEP também foram encontrados na literatura técnica, os quais foram relatados como sendo responsáveis por melhorias de propriedades mecânicas devidas à maior massa específica real da EAEP que substitui as partículas de solo (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; BRAND *et al.*, 2020; OLUWASOLA *et al.*, 2020; SEBBAR *et al.*, 2020). Em amostras de solos arenosos, Al-Homidy *et al.* (2017) atribuem o aumento de peso específico aparente seco máximo à melhor graduação proporcionada pela presença de grãos finos presentes da EAEP que preenchem os vazios deixados pelos grãos maiores do material granular.

Verificou-se que a mistura M5, dotada do maior teor de cinza volante, apresentou baixos valores de peso específico aparente seco máximo (e conseqüentemente maior porosidade) para as amostras de solo analisadas. A diminuição de peso específico aparente seco máximo com o incremento do teor de cinza volante também foi relatada por outros autores e explicada pela substituição de partículas das amostras dos solos por partículas de cinza volante, as quais

possuem menor massa específica real (ALHASSAN, 2008; ANDAVAN; PAGADALA, 2020; BASHA *et al.*, 2005; YADU; TRIPATHI; SINGH, 2011).

O óxido de cálcio, presente em grande quantidade na amostra de EAEP, se dissolve na água dos poros dos solos tratados, resultando em um aumento na concentração de eletrólitos. Esse aumento de concentração de um determinado cátion, neste caso o Ca^{+2} , é o principal fator para a ocorrência de trocas catiônicas. O aumento na concentração de eletrólitos na mistura causa uma redução na espessura da dupla camada difusa (JHA; SIVAPULLAIAH, 2020), alterando a estrutura dos solos de forma a permitir que mais partículas possam preencher o volume do molde de compactação e, portanto, alcançar maiores massas específicas aparentes secas máximas e menores teores de umidade ótimo (ZUMRAWI; BABIKIR, 2017).

2.4.2.2. Propriedades mecânicas analisadas

Utilizando os parâmetros de ótimo dos ensaios de compactação (γ_{dmax} e w_{ot}), foram confeccionados os corpos de prova para os ensaios mecânicos de RCS, MR e CBR. Os resultados dessas propriedades mecânicas e da Expansão CBR são apresentados na Tabela 2.15.

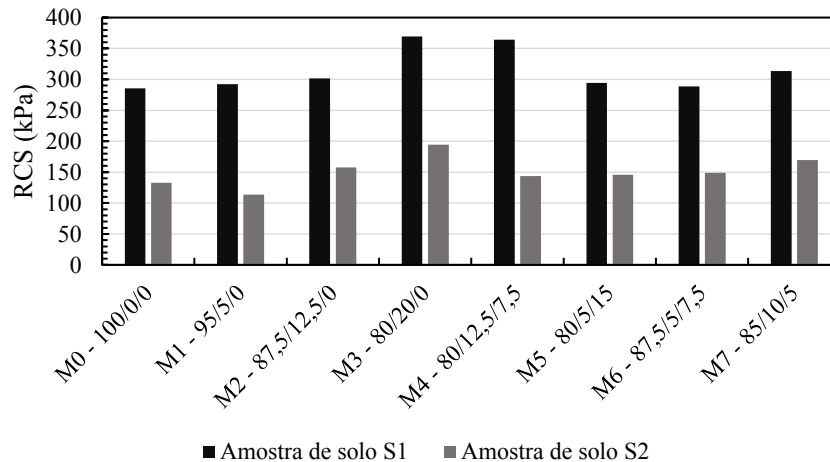
Tabela 2.15: Propriedades mecânicas e Expansão CBR das misturas e amostras de solo analisadas.

Misturas	S1						S2					
	RCS (kPa)	MR Ref. subleito (MPa)	MR sub-base (MPa)	MR base (MPa)	CBR (%)	Exp. CBR (%)	RCS (kPa)	MR Ref. subleito (MPa)	MR sub-base (MPa)	MR base (MPa)	CBR (%)	Exp. CBR (%)
M0	285,70	35,75	29,59	28,29	11,20	0,93	132,70	11,99	11,93	20,47	8,20	0,26
M1	292,03	67,50	54,51	63,18	16,50	0,47	113,89	15,56	16,87	26,56	7,00	0,34
M2	301,62	74,64	65,38	65,99	21,50	0,39	157,70	17,68	21,10	29,87	10,50	0,17
M3	369,21	71,64	55,42	60,98	24,50	0,31	194,40	24,13	23,42	32,83	14,00	0,13
M4	364,20	38,09	41,40	54,14	26,00	0,35	143,93	17,66	22,17	34,05	12,50	0,57
M5	294,11	31,42	32,64	42,29	21,50	0,48	145,81	23,20	22,82	28,86	9,00	0,26
M6	288,69	53,10	35,45	33,65	24,00	0,17	148,93	17,89	20,12	28,88	9,00	0,66
M7	313,51	61,77	64,02	69,91	23,67	0,48	169,59	15,09	17,17	28,17	10,00	0,43

Na Figura 2.17, são apresentados os resultados do ensaio de RCS para as amostras de solo na condição natural e suas misturas com resíduos. Foi verificado que os maiores acréscimos nos valores de RCS em relação aos valores obtidos para as amostras de solo no estado natural ocorreram nas misturas M3 e M4, para a amostra de solo S1, e M3, para a amostra de solo S2. Observou-se que as misturas M3 e M4 referentes à amostra de solo S1 atingiram o valor alvo de RCS a 7 dias de cura selada, de 345 kPa, que é considerado como valor mínimo para que um material possa ser utilizado em camada de reforço de subleito, conforme Gautreau; Zhang e Wu

(2010). Considerando as misturas solo-resíduos para as duas amostras de solo, nenhuma mistura foi capaz de alcançar o valor de 690 kPa para a RCS, valor mínimo adotado para que um material possa ser utilizado como camada de sub-base e de base.

Figura 2.17: Resistência à compressão simples (RCS) das misturas e amostras de solo analisadas.



Houve uma tendência de aumento de RCS com o incremento do teor de escória de aciaria elétrica primária, observada através das misturas M1, M2 e M3 para as amostras de solo S1 e S2. Segundo Brand *et al.* (2020), esse aumento de RCS sugere que os compostos CaO e Ca(OH)₂ na EAEP reagiram com as partículas de argila presentes no solo e/ou que as partículas de EAEP estão estabilizando o solo fisicamente. Ismail; Awad e Mwafy (2019) observaram, através dos ensaios de DRX, que houve formação de compostos cimentícios, como o C-S-H, o que confere à misturas solo-EAEP maior resistência mecânica, além de observarem que o grau de floculação na estrutura da mistura aumentou, devido ao processo de troca catiônica entre os cátions presentes na EAEP e na amostra de solo.

Oluwasola *et al.* (2020) atribuíram o aumento de RCS com o aumento do teor de escória de aciaria elétrica ao aumento de peso específico aparente seco máximo e à diminuição do teor de umidade ótimo. Al-Amoudi *et al.* (2017) também observaram um aumento nas propriedades mecânicas RCS e CBR com o aumento no teor de escória de aciaria elétrica em solos argilosos, o qual foi atribuído à cimentação promovida pelo mineral *wustite* (FeO), o qual gerou uma estrutura mais densa nos corpos de prova. Al-Homidy *et al.* (2017) estudaram misturas contendo uma amostra de solo arenoso, 2% de cimento e teores de EAEP entre 5% e 30%, e atribuíram a formação de C-S-H à presença do cimento, mas destacando que, com o acréscimo no teor de escória de aciaria elétrica, a formação de compostos cimentícios foi realçada.

Os valores de RCS em misturas contendo cinza volante foram maiores que o valor da amostra de solo em sua condição natural. Sridharan; Prashanth e Sivapullaiah (1997) e Bose (2012) observaram que o aumento de RCS com a presença de cinza volante ocorre devido às reações pozolânicas que geram compostos cimentícios. Segundo Consoli; Rosa e Saldanha (2011), a cinza volante, em contato com hidróxido de cálcio, gera compostos cimentícios através de reações pozolânicas que diminuem a porosidade de misturas solo-cinza-cal, gerando um aumento no valor de RCS.

No caso da análise das superfícies de resposta para o ensaio de MR, foi necessário realizar a determinação do estado de tensões referente a cada camada estrutural do pavimento asfáltico analisado, a fim de se obter um valor de MR representativo de cada camada. Diferentemente das outras propriedades analisadas, o MR deve ser analisado pelo estado de tensões a que o material estará submetido, o qual está relacionado com o tipo de carregamento, com as propriedades dos materiais constituintes de cada camada e com a espessura de cada uma dessas camadas. Nesta pesquisa, foi adotado o carregamento do eixo padrão, correspondente a um eixo simples de rodas duplas de 80 kN (8,2 tf). As espessuras e as propriedades de cada camada estrutural foram extraídas do estudo de Nega e Nikraz (2017). Esses dados foram inseridos no *software* AEMC para a determinação do estado de tensões no ponto médio de cada camada estrutural, os quais são apresentados na Tabela 2.16.

Tabela 2.16: Tensões atuantes devido ao eixo padrão nas camadas estruturais do pavimento de Nega e Nikraz (2017).

Camada estrutural	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)
Base	0,030	0,160
Sub-base	0,010	0,090
Reforço de subleito	0,009	0,037

Os ensaios de MR não apresentaram um único valor dessa propriedade, sendo necessário a adoção de um modelo matemático para a representação de sua variação em função das tensões confinante e desvio. Nesta pesquisa, foi utilizado o modelo composto ($MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$). Os coeficientes da regressão não-linear múltipla que caracterizam o modelo composto e o coeficiente de determinação (R^2) para as misturas solo-resíduos das amostras de solos S1 e S2, bem como das amostras de solo na condição natural, são apresentados na Tabela 2.17.

Tabela 2.17: Coeficientes de regressão e coeficientes de determinação do modelo composto para as misturas solo-resíduos analisadas.

Mistura	Amostra de solo S1				Amostra de solo S2			
	k1	k2	k3	R ²	k1	k2	k3	R ²
M0	24,526	0,075	-0,222	0,926	114,710	0,527	-0,068	0,958
M1	101,341	0,278	-0,273	0,693	112,972	0,389	0,045	0,946
M2	68,019	0,092	-0,160	0,484	90,549	0,227	0,172	0,955
M3	82,845	0,254	-0,319	0,695	96,523	0,346	-0,075	0,875
M4	127,400	0,208	0,069	0,907	133,959	0,274	0,223	0,948
M5	96,581	0,227	0,016	0,721	61,052	0,238	-0,046	0,839
M6	28,568	0,203	-0,479	0,445	91,530	0,277	0,099	0,952
M7	92,530	0,063	0,033	0,199	136,672	0,399	0,098	0,979

De posse das tensões calculadas para as camadas estruturais referentes ao pavimento flexível extraído do estudo de Nega e Nikraz (2017), apresentadas na Tabela 2.16, e dos modelos matemáticos obtidos pelos ensaios de MR para as misturas solo-resíduos analisadas, apresentados na Tabela 2.17, foram determinados os valores de MR de cada mistura considerando as tensões atuantes no ponto médio das camadas de reforço de subleito, sub-base e base.

As Figuras 2.18, 2.19 e 2.20 apresentam os resultados do ensaio de módulo de resiliência (MR) para as misturas solo-resíduos das duas amostras de solo com relação às camadas de reforço de subleito, sub-base e base, respectivamente.

Figura 2.18: Resultados de MR para as misturas solo-resíduos referentes à camada de reforço de subleito.

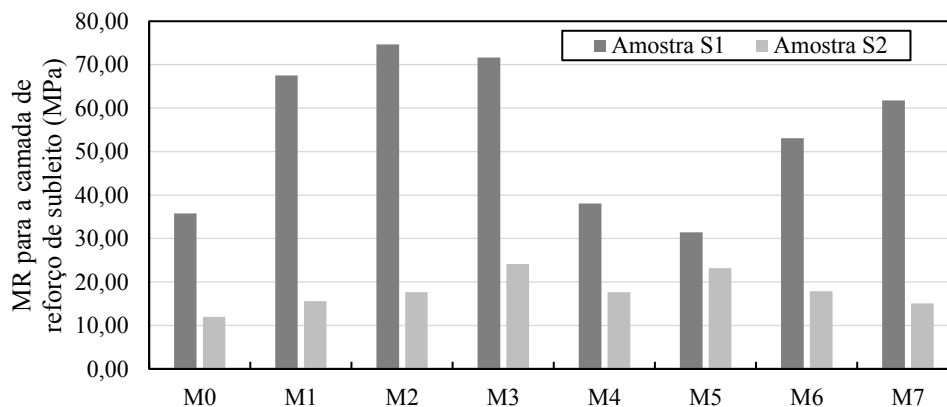


Figura 2.19: Resultados de MR para as misturas solo-resíduos referentes à camada de sub-base.

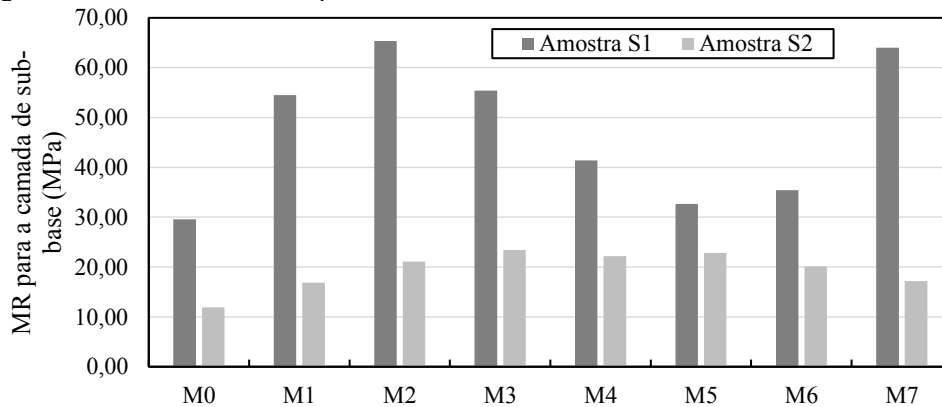
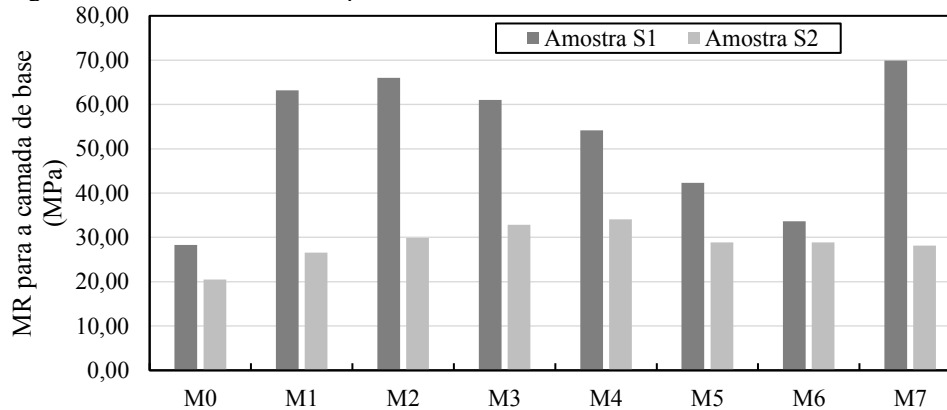


Figura 2.20: Resultados de MR para as misturas solo-resíduos referentes à camada de base.



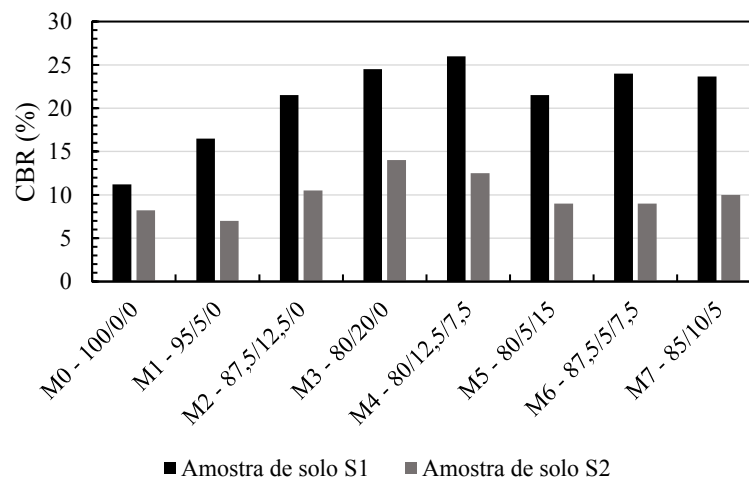
Todas as misturas, para as duas amostras de solos, apresentaram melhor performance quando comparadas às amostras de solo no estado natural (mistura M0). Observou-se, através das misturas M1, M2 e M3, que a adição de EAEP promove uma melhora na resposta da mistura sob carregamento cíclico para as amostras de solo S1 e S2. A mistura M3, para ambas as amostras de solo, foi analisada por meio de microscopia eletrônica de varredura, que mostrou a formação de compostos cimentícios, o que explica o aumento do desempenho das misturas com EAEP em relação às amostras de solo na condição natural. Bhuvaneshwari; Robinson e Gandhi (2019) estudaram o efeito de cal na estabilização de uma amostra de solo no módulo de resiliência e atribuíram um aumento no valor dessa propriedade à troca catiônica entre os íons Ca^{2+} e às partículas de argila presentes no solo para idades de até 3 dias de cura selada. O aumento de MR com maiores tempos de cura foi atribuído à formação de compostos pozolânicos.

A Figura 2.21 apresenta os resultados do ensaio de CBR, sendo possível constatar que as misturas M4 e M3 foram as que apresentaram os maiores valores de CBR para as amostras de

solo S1 e S2, respectivamente. Os acréscimos nos valores de CBR das misturas em relação às amostras de solos no estado natural foram de 132,14%, para a amostra de solo S1, e 70,73%, para a amostra de solo S2. Apenas a mistura M1, referente à amostra de solo S2, apresentou diminuição de desempenho quando comparada ao solo no estado natural. Todas as outras misturas, para as amostras de solo analisadas, apresentaram aumento de CBR em relação às amostras de solo no estado natural.

As misturas referentes à amostra de solo S1, exceto a M1, alcançaram o valor mínimo de CBR de 20%, recomendado para camadas de sub-base de pavimentos asfálticos, de acordo com DNIT (2006). Segundo o mesmo documento técnico, para que um material possa ser considerado satisfatório para utilização em reforço de subleito de rodovias, o mesmo deve possuir CBR maior que o subleito e acima de 2%. Todas as misturas referentes à amostra de solo S2 atenderam ao mínimo de 2% nos valores de CBR.

Figura 2.21: Índice CBR das misturas e amostras de solo analisadas.

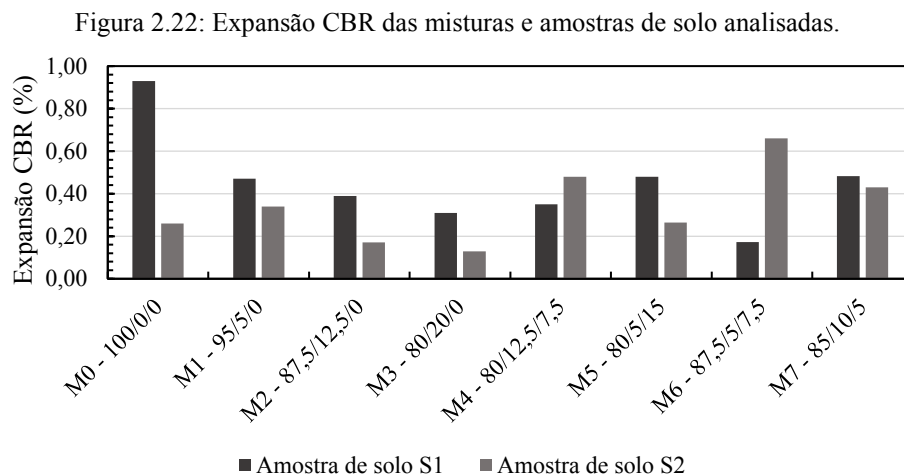


Observou-se a tendência de aumento do valor de CBR com o aumento do teor de EAEP, o que também foi observado por outros autores (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; GUNARTI; RAHARJA, 2020; SEBBAR *et al.*, 2020). Gunarti e Raharja (2020) afirmam que esse aumento é devido aos novos grãos que se formam resultantes de reações químicas entre a amostra de solo e a EAEP, sendo que o processo de troca de cátions gera uma alteração na estrutura do material, tornando-a mais floculada e com maiores tamanhos. Alguns autores atribuem o aumento do valor de CBR com a adição de escória de aciaria elétrica ao aumento de peso específico aparente seco máximo e à redução do teor de umidade ótimo (ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; OLUWASOLA *et al.*, 2020). Sudla *et*

al. (2018) verificaram que, em amostras de solo de matriz arenosa, há quebra de grãos durante o processo de compactação, aumentando o teor de partículas finas, o que gera redução no CBR. Porém, com o acréscimo de EAEP, há um aumento de resistência à abrasão e, portanto, menor quebra de partículas e maiores valores de CBR.

As misturas contendo cinza volante apresentaram valores de CBR maiores quando comparadas à amostra de solo em seu estado natural. Esse aumento pode estar associado à formação de compostos cimentícios através de reações pozolânicas (BOSE, 2012; CONSOLI; ROSA; SALDANHA, 2011).

A Figura 2.22 apresenta os dados de expansão CBR para as amostras de solos S1 e S2 e suas misturas com EAEP e cinza volante.



Observou-se, através das misturas M1, M2 e M3, para as amostras de solo S1 e S2, que o aumento no teor de EAEP gerou uma diminuição nos valores de expansão CBR. Alguns estudos realizados sobre misturas entre amostras de solos argilosos e EAEP relataram que a diminuição da expansão com a adição da EAEP é devida à ocorrência da troca catiônica entre os íons presentes nos dois materiais, que gera floculação das partículas, alterando sua estrutura (PARSAEI *et al.*, 2021). Aldeeky e Al Hattamleh (2017) atribuíram a redução da expansão com o aumento do teor de EAEP devido à diminuição da plasticidade da mistura. Outros autores também observaram redução da expansão de amostras de solo com o aumento no teor de EAEP (ISMAIL; AWAD; MWAIFY, 2019; ZUMRAWI; BABIKIR, 2017).

2.4.2.3. Otimização das propriedades mecânicas analisadas através da função desejabilidade

Considerando todas as propriedades mecânicas analisadas, as misturas com maiores teores de EAEP foram as que apresentaram os melhores resultados. Para realizar a otimização das propriedades mecânicas analisadas, baseada nas proporções de cada material constituinte, foi utilizado o *software* Minitab 18.

2.4.2.3.1. Superfícies de resposta para RCS

Os resultados do ensaio de RCS foram inseridos no *software* Minitab 18, após a média de três corpos de prova, para a determinação das superfícies de resposta para cada amostra de solo. Para esse ensaio, não houve variações da superfície de resposta em função da camada estrutural do pavimento em que o material foi inserido como forma de fomentar as análises propostas, uma vez que há apenas um estado de tensões possível para se realizar o ensaio e a análise dos resultados.

As superfícies de resposta do ensaio de RCS, encontradas através dos modelos estatísticos para as misturas solo-resíduos referentes às amostras de solo S1 e S2, são apresentadas na Figura 2.23, e as equações que representam essas superfícies são apresentadas na Tabela 2.18. As variáveis independentes foram as porcentagens em massa de solo (S), EAEP (E) e cinza volante (C).

Figura 2.23: Superfícies de resposta para a RCS das misturas solo-resíduos: (a) amostra de solo S1; (b) amostra de solo S2.

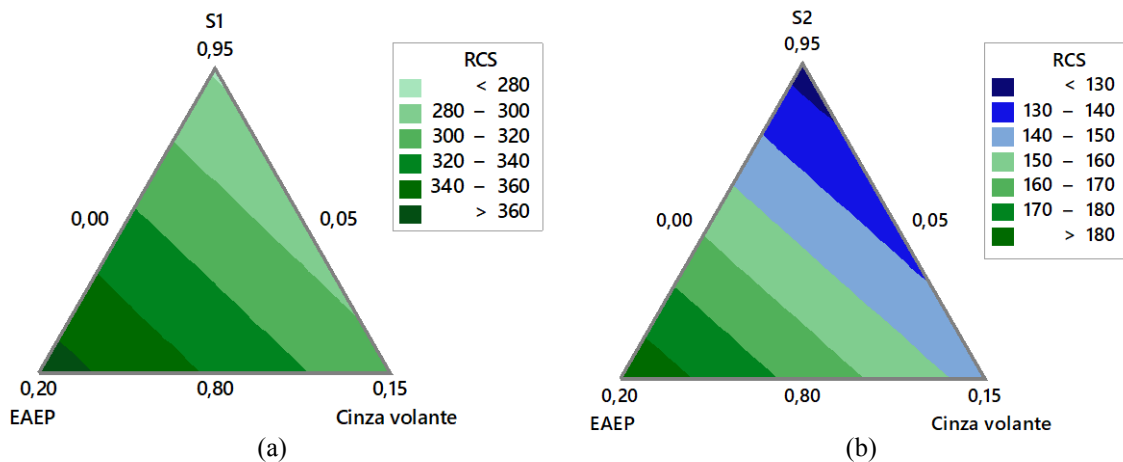


Tabela 2.18: Equações referentes às superfícies de resposta de RCS.

Amostra de solo	Equação de regressão	R ²
S1	278,1.S+370,0.E+304,8.C	78,25
S2	126,0.S+188,4.E+146,0.C	68,79

Observou-se que os modelos matemáticos ajustados através do método *stepwise* para as superfícies de resposta foram modelos lineares, portanto, os termos que representam as interações entre os componentes foram identificados como não significativos. As equações apresentadas mostraram que a EAEP é o único componente das misturas que contribui para o aumento dos valores da RCS, pois foi o único elemento da mistura cujo coeficiente ficou acima da média dos 3 componentes para as misturas solo-resíduos para as amostras de solos S1 e S2. Essa contribuição significativa da EAEP é devida à formação de compostos cimentícios, como C-S-H, C-A-S-H e C-A-H, formados durante a fase de cura selada em câmara úmida, e em menor grau devido às alterações estruturais decorrentes da troca catiônica, maiores valores de peso específico aparente seco máximo e menores valores de teor de umidade ótimo, convergindo com as explicações constantes na literatura técnico-científica.

2.4.2.3.2. Superfícies de resposta para MR

Os resultados de MR foram inseridos no *software* Minitab 18 a fim de que as superfícies de resposta, referentes à cada estado de tensões representativo de cada camada estrutural do pavimento asfáltico adotado, fossem determinadas.

2.4.2.3.2.1. Superfície de resposta de MR referente à camada de reforço de subleito

Para a camada de reforço de subleito, as tensões confinante e desvio encontradas no pavimento adotado foram de 0,009 MPa e 0,037 MPa, respectivamente. Essas tensões foram inseridas nos modelos matemáticos de cada mistura para a determinação do MR representativo da camada em análise. Os valores de MR assim obtidos foram inseridos no *software* Minitab 18 para a determinação das superfícies de resposta para as misturas solo-resíduos referentes às amostras de solo S1 e S2, as quais são apresentadas na Figura 2.24. A Tabela 2.19 apresenta as equações representativas dessas superfícies de resposta.

Figura 2.24: Superfícies de resposta de MR das misturas solo-resíduos referente à camada de reforço de subleito: (a) amostra de solo S1; (b) amostra de solo S2.

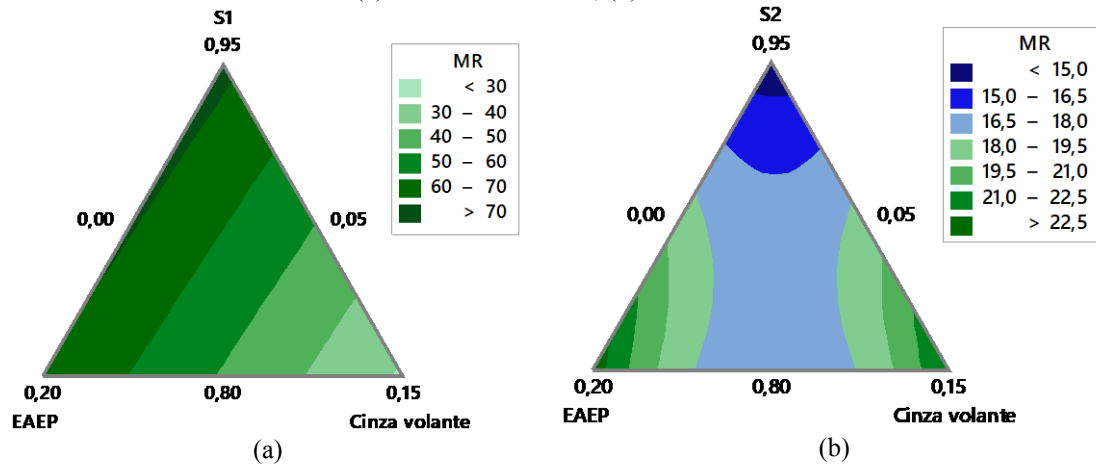


Tabela 2.19: Equações referentes às superfícies de resposta de MR para a camada de reforço de subleito.

Amostra de solo	Equação de regressão	R ²
S1	$72,27.S+69,58.E+28,79.C$	88,06
S2	$14,08.S+23,37.E+22,71.C-25,34.E.C$	86,93

Em relação à superfície de resposta referente às misturas solo-resíduos para a amostra de solo S1, verificou-se que um aumento nos teores de solo e de EAEP favoreceu o aumento do MR das misturas, com destaque para o solo que possui a maior variação positiva em relação à média dos coeficientes. Para a amostra de solo S2, verificou-se que a cinza volante e a EAEP geram um aumento de MR com suas adições nas misturas, com destaque para a última, que possui a maior variação positiva em relação à média dos coeficientes sem interação.

Ainda sobre a superfície de resposta obtida para a amostra de solo S2, verificou-se que há um termo de interação entre a EAEP e a cinza volante, o qual possui valor negativo (antagonismo), mostrando que a interação entre esses componentes provoca uma diminuição nos valores de MR, o que também é representado pela porção azul claro na região central do gráfico de sua superfície de resposta. Com o incremento de termos que interagem entre si, a superfície de resposta deixa de ser linear, apresentando áreas curvas para descrever a variação da propriedade analisada.

2.4.2.3.2.2. Superfície de resposta de MR referente à camada de sub-base

Os cálculos dos valores de MR para a camada de sub-base foram realizados utilizando a tensão confinante de 0,010 MPa e a tensão desvio de 0,090 MPa, determinadas através do

software AEMC. As superfícies de resposta para as misturas solo-resíduos das amostras de solo S1 e S2 são apresentadas na Figura 2.25, e as equações correspondentes na Tabela 2.20.

Figura 2.25: Superfícies de resposta de MR das misturas solo-resíduos referente à camada de sub-base: (a) amostra de solo S1; (b) amostra de solo S2.

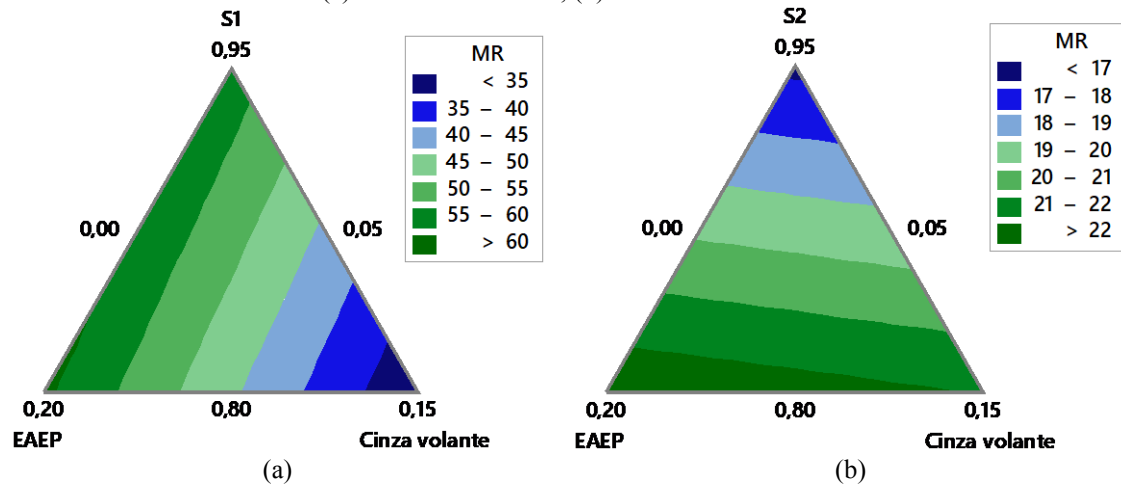


Tabela 2.20: Equações referentes às superfícies de resposta de MR para a camada de sub-base.

Amostra de solo	Equação de regressão	R ²
S1	57,82.S+60,93.E+30,74.C	64,47
S2	16,77.S+22,83.E+21,96.C	64,72

Observou-se que a cinza volante, para as misturas solo-resíduos da amostra de solo S1, provocou uma diminuição nos valores de MR, evidenciado tanto pelo gráfico da superfície de resposta quanto pelo baixo valor do coeficiente na equação do modelo matemático. Ainda para as misturas desta amostra de solo, observou-se que a EAEP apresenta a maior contribuição para o aumento de MR. Com relação às misturas solo-resíduos para a amostra de solo S2, observou-se que quanto menor a proporção de solo, maior é o valor de MR, também evidenciado pelo baixo valor de seu coeficiente. Os resíduos, EAEP e cinza volante, apresentaram contribuição positiva para o aumento do MR, com destaque para o primeiro.

2.4.2.3.2.3. Superfície de resposta de MR referente à camada de base

Para a camada de base, os valores da tensão confinante e da tensão desvio, calculadas através do *software* AEMC, foram de 0,030 MPa e de 0,160 MPa, respectivamente. Com o estado de tensões definido, os valores de MR para cada mistura solo-resíduos foram determinados, e as superfícies de resposta referentes à essas misturas, considerando as amostras de solo S1 e S2, foram obtidas através do *software* Minitab 18, as quais são apresentadas na Figura 2.26, e seus respectivos modelos matemáticos na Tabela 2.21.

Figura 2.26: Superfícies de resposta de MR das misturas solo-resíduos referente à camada de base: (a) amostra de solo S1; (b) amostra de solo S2.

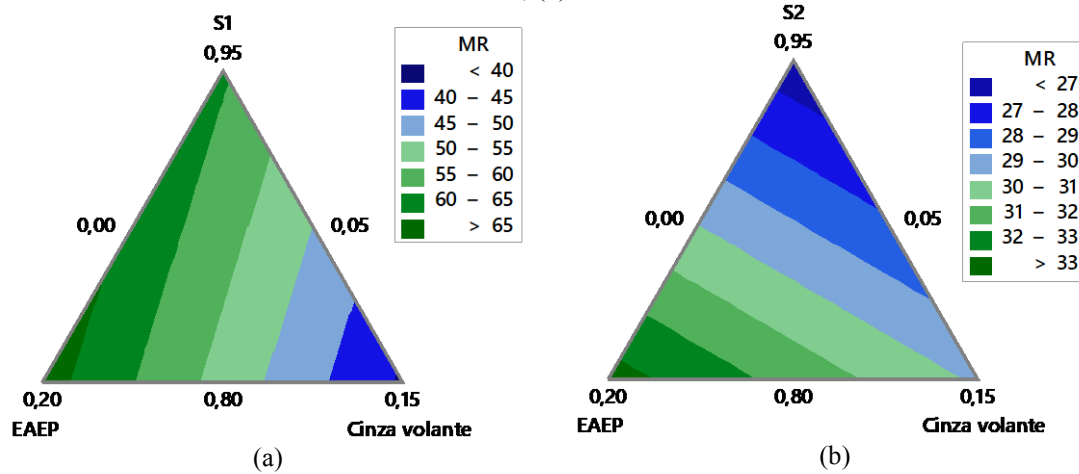


Tabela 2.21: Equações referentes às superfícies de resposta de MR para a camada de base.

Amostra de solo	Equação de regressão	R ²
S1	60,74.S+67,17.E+39,28.C	50,31
S2	26,35.S+33,44.E+29,87.C	74,53

Verificou-se que a EAEP se destaca para o aumento dos valores de MR, considerando as misturas solo-resíduos das duas amostras de solo analisadas. Tanto as imagens quanto os coeficientes da EAEP revelam essa tendência. Para a amostra de solo S1, observou-se que a cinza volante gera uma diminuição nos valores de MR, enquanto que, para a amostra de solo S2, o próprio solo é o principal fator para redução dessa propriedade.

Considerando as análises das superfícies de resposta de MR para as camadas de reforço de subleito, de sub-base e de base, verificou-se, através das figuras e dos modelos matemáticos, que os teores das misturas solo-resíduos que maximizaram o valor de MR tendem para 80% de solo, 20% de EAEP e 0% de cinza volante, com exceção da análise do MR para camada de reforço de subleito para a amostra de solo S1.

2.4.2.3.3. Superfícies de resposta para índice CBR

O ensaio de índice CBR, assim como o ensaio de RCS, não considera a variação de estados de tensões, portanto, as análises das superfícies de resposta são idênticas para as camadas estruturais do pavimento analisado. Essas superfícies de resposta para as misturas solo-resíduos das amostras de solo S1 e S2 são apresentadas na Figura 2.27, e seus modelos matemáticos correspondentes na Tabela 2.22.

Figura 2.27: Superfícies de resposta de índice CBR das misturas solo-resíduos: (a) amostra de solo S1; (b) amostra de solo S2.

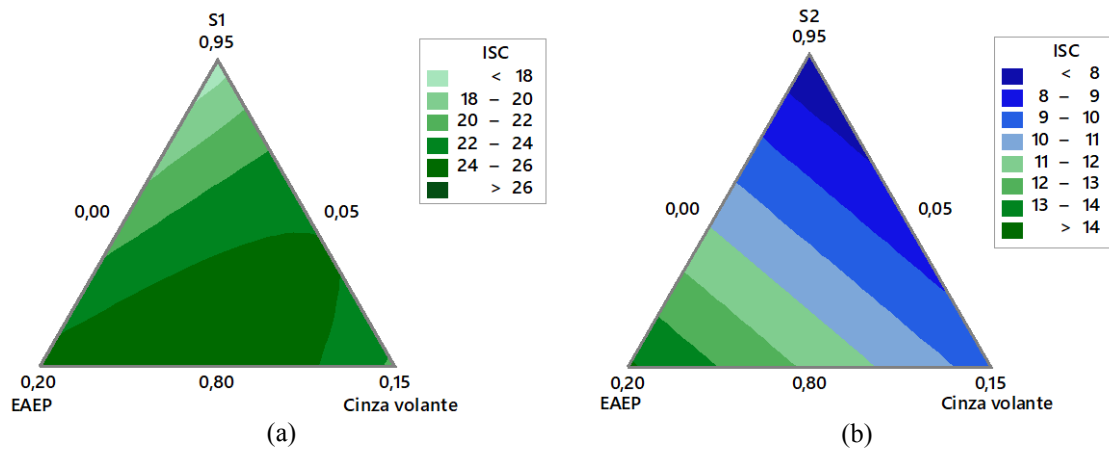


Tabela 2.22: Equações referentes às superfícies de resposta de índice CBR.

Amostra de solo	Equação de regressão	R ²
S1	$16,79.S+24,79.E+21,56.C+18,3.S.C+10,3.E.C$	98,08
S2	$7,15.S+14,15.E+9,55.C$	74,53

O modelo matemático das misturas solo-resíduos da amostra de solo S1 mostra dois termos com interação entre os pseudocomponentes, o que demonstra que as interações entre solo e cinza volante e entre EAEP e cinza volante geram um incremento no MR (sinergismo). Entretanto, considerando somente os coeficientes sem interação, percebe-se que a EAEP se apresenta como o elemento que mais contribui para o acréscimo no índice CBR.

Para as misturas solo-resíduos da amostra de solo S2, a superfície de resposta mostra uma tendência de aumento de índice CBR com o aumento de EAEP, além de apontar o solo e a cinza volante como os responsáveis pela diminuição da propriedade.

2.4.2.3.4. Determinação da dosagem ótima através da função desejabilidade

Com o objetivo de determinar qual foi a melhor dosagem para cada amostra de solo analisada, considerando sua utilização em cada camada estrutural do pavimento asfáltico estudado, utilizou-se o recurso da função desejabilidade através do *software* Minitab 18. A função desejabilidade apontou como dosagem ótima a mistura contendo 80% da amostra de solo, 20% de EAEP e 0% de cinza volante para todos os cenários de camadas estruturais considerados e para as amostras de solo S1 e S2, como observado nas Figuras 2.28 e 2.29, respectivamente, que representam a variação da função desejabilidade composta de cada mistura solo-resíduos com relação às camadas estruturais de reforço de subleito, sub-base e base.

Figura 2.28: Gráficos de desejabilidade composta para a amostra de solo S1: (a) reforço de subleito; (b) sub-base; (c) base.

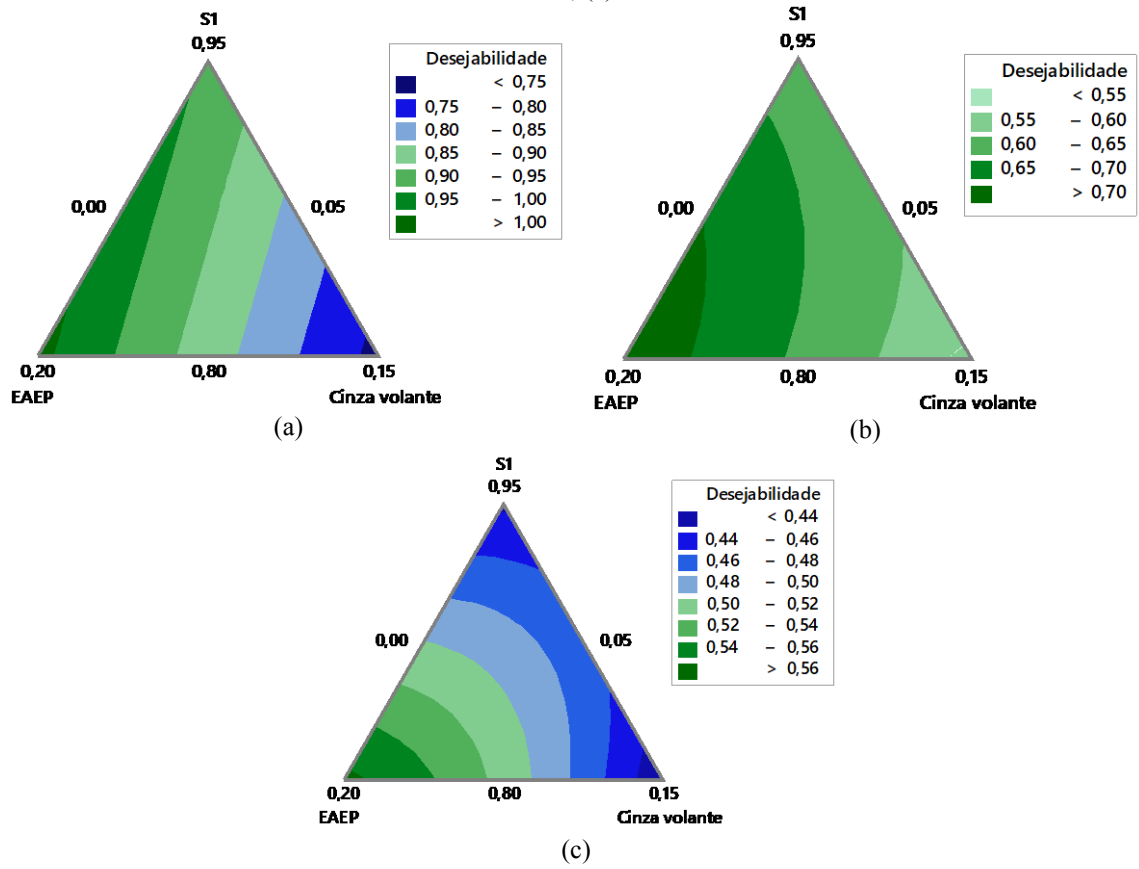
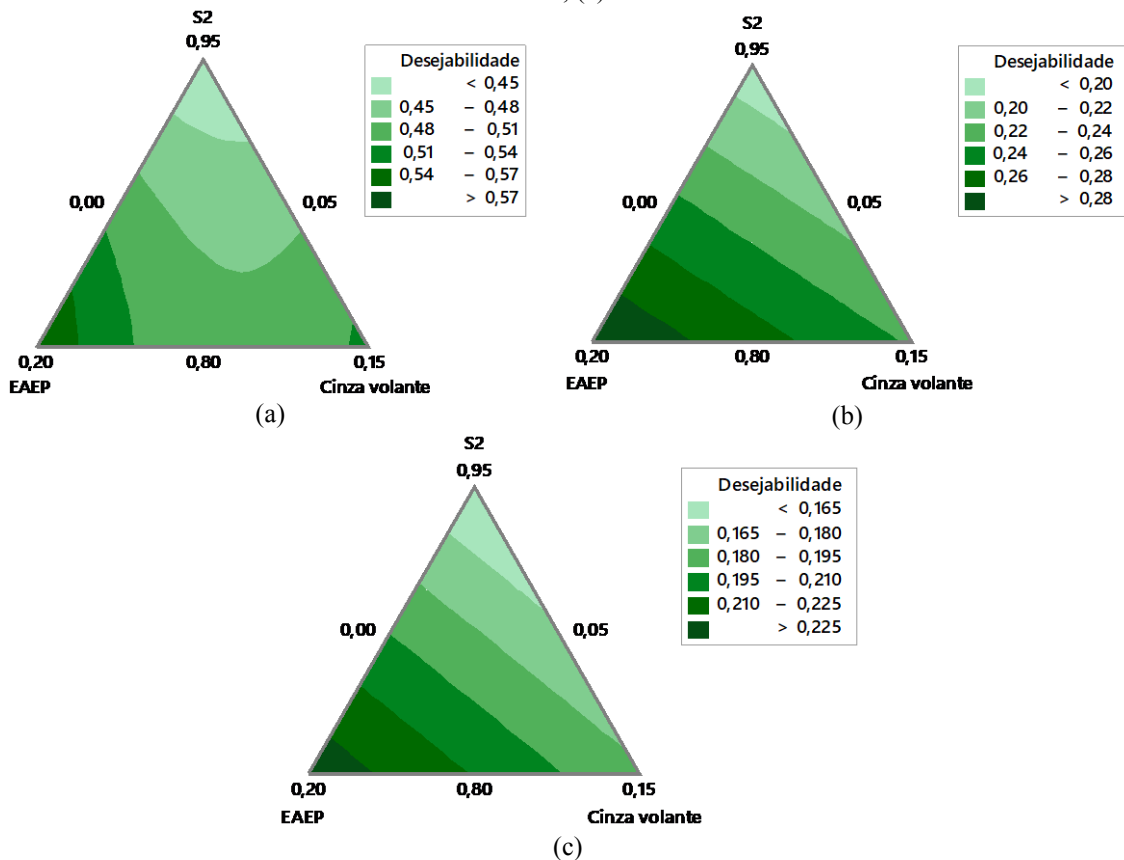


Figura 2.29: Gráficos de desejabilidade composta para a amostra de solo S2: (a) reforço de subleito; (b) sub-base; (c) base.



Observou-se, para as misturas solo-resíduos da amostra de solo S1, que a desejabilidade composta para a camada de reforço de subleito alcançou o valor de 1,00 quando a dosagem se aproxima do máximo valor de EAEP. Para as camadas de sub-base e base, o valor da desejabilidade composta não atingiu o valor de 1,00 em nenhum ponto da rede simplex, entretanto, a mesma tendência de aumento da desejabilidade com o aumento do teor de EAEP foi observada. Verificou-se também a tendência de diminuição da desejabilidade composta quando as tensões confinante e desvio aumentaram, da camada de reforço do subleito para a camada de base do pavimento, o que está em concordância com o maior nível de exigências das camadas mais nobres em relação às camadas menos nobres do pavimento.

Para as misturas solo-resíduos da amostra de solo S2, nenhuma mistura, em nenhuma das camadas analisadas, apresentou desejabilidade composta de 1,00, demonstrando que nenhuma mistura foi capaz de atender simultaneamente aos valores limites prescritos para as propriedades consideradas no método de otimização. Entretanto, observou-se que, com um maior teor de EAEP, houve aumentos na função desejabilidade para todas as condições

analisadas. Observou-se também que houve uma diminuição da desejabilidade composta com a passagem de uma camada estrutural menos nobre para uma mais nobre, devido aos seus maiores níveis de exigência.

A Tabela 2.23 apresenta os valores de desejabilidade individuais e compostos obtidos para as misturas ótimas referentes às camadas estruturais e as amostras de solo S1 e S2 na condição natural. Os valores de desejabilidade individuais foram calculados pela relação entre o valor obtido para cada propriedade analisada através do modelo matemático de sua respectiva superfície de resposta e o valor mínimo aceitável para que o material seja passível de utilização, considerando cada camada estrutural do pavimento. Os valores de desejabilidade composta foram obtidos através de uma média geométrica dos valores das desejabilidades individuais.

Tabela 2.23: Valores de desejabilidade referentes às misturas ótimas para as propriedades analisadas.

Propriedade mecânica	S1			S2		
	Reforço	Sub-base	Base	Reforço	Sub-base	Base
RCS (kPa)	1,00	0,54	0,54	0,55	0,27	0,27
MR (MPa)	1,00	0,74	0,81	0,34	0,14	0,20
CBR (%)	1,00	1,00	0,41	1,00	0,71	0,24
Desejabilidade composta	1,00	0,73	0,56	0,57	0,30	0,24

A mistura ótima da amostra de solo S1, considerando a camada de reforço de subleito, apresentou valores de desejabilidade individuais de 1,00 para a RCS, MR e CBR, o que significa que a mistura atendeu todos os valores mínimos aceitáveis de acordo com as normas técnicas, o que também pode ser observado através do valor igual a 1 obtido na desejabilidade composta.

Para a mistura ótima da amostra de solo S1, considerando a camada de sub-base, observou-se que apenas o índice CBR foi superior ao valor mínimo aceitável para que a mistura pudesse ser utilizada como camada de sub-base. A RCS e o MR alcançaram 54% e 74%, respectivamente, dos valores mínimos aceitáveis para essas propriedades.

Considerando a camada de base e a mistura ótima para a amostra de solo S1, nenhuma das propriedades analisadas atingiu o valor mínimo aceitável para a utilização dessa mistura na camada analisada. Os valores esperados para RCS, MR e índice CBR ficaram em 54%, 81% e 41% dos valores mínimos aceitáveis para a camada de base, respectivamente.

Portanto, a mistura ótima da amostra de solo S1 poderá compor uma camada de reforço de subleito, atendendo a todos os critérios de RCS, MR (considerando o estado de tensões

adotado) e índice CBR estabelecidos pelas normas técnicas adotadas nesta pesquisa, o que a configura como uma alternativa viável tecnicamente.

Considerando a mistura ótima da amostra de solo S2 para camada de reforço de subleito, verificou-se que apenas o índice CBR atingiu o valor mínimo aceitável, e que os valores de RCS e MR alcançaram 55% e 34% dos valores mínimos aceitos pelas normativas técnicas, respectivamente.

Para as camadas de sub-base e base, considerando a mistura ótima da amostra de solo S2, verificou-se que nenhuma das propriedades analisadas atingiu o valor mínimo aceitável para essas camadas. Para a camada de sub-base, apenas o índice CBR ficou acima 30% do valor mínimo, enquanto que, para a camada de base, todas as propriedades ficaram com valores abaixo de 30% do mínimo aceitável.

Apesar do não atendimento dos valores mínimos, a mistura ótima, 80% de solo, 20% de EAEP e 0% de cinza volante, para a amostra de solo S2 foi a que apresentou o maior valor de desejabilidade composta para todas as camadas estruturais analisadas. O maior valor de desejabilidade composta foi obtida na camada de reforço de subleito, mostrando a maior adequabilidade da mistura em compor camadas menos nobres do pavimento.

2.4.2.3.5. Caracterização geotécnica das misturas ótimas

As misturas ótimas para as amostras de solos S1 e S2, considerando as camadas estruturais dos pavimentos, foram de 80% de solo, 20% de EAEP e 0% de cinza volante para ambas as amostras de solo e para todas as camadas consideradas. Sobre as misturas ótimas determinadas, realizaram-se os ensaios de caracterização geotécnica [limites de Atterberg (LL e LP), Expansão CBR, Mini-MCV e Perda de massa por imersão], assim como suas respectivas classificações geotécnicas pela metodologia MCT. Os resultados desses ensaios, assim como das características geotécnicas das amostras de solo S1 e S2 na sua condição natural, apresentados para fins de comparação, são apresentados na Tabela 2.24.

Tabela 2.24: Caracterização geotécnica e classificação MCT dos solos S1 e S2 e das suas respectivas misturas ótimas.

Parâmetro	S1	Mistura ótima S1	S2	Mistura ótima S2
LL (%)	78	55	36	23
LP (%)	43	34	18	15
IP (%)	35	21	18	8
Expansão CBR (%)	0,93	0,89	0,26	0,13
Perda de massa por imersão (%)	27	67	210	153
d'	21,05	83,33	17,86	26,67
c'	1,39	1,43	0,65	0,62
e'	1,06	0,97	1,50	1,32
Classificação MCT	LA'	LA'	NA'	LA

O limite de liquidez e o índice de plasticidade podem ser relacionados com a compressibilidade e com a expansão de solos, sendo que maiores valores desses índices implicam em maior compressibilidade e maior expansão (AKBARIMEHR; AFLAKI, 2018; ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; IRAVANI; ABDEH, 2020; OKEWALE, 2020). A trabalhabilidade de solos argilosos em campo é melhorada quando o índice de plasticidade diminui (ESKISAR, 2015). Com a inserção da EAEP, as amostras de solo analisadas apresentaram redução dos limites de liquidez e de plasticidade e do índice de plasticidade, o que torna as amostras de solos menos compressíveis, menos expansíveis e com melhor trabalhabilidade. Oluwasola *et al.* (2020) atribuem a redução do índice de plasticidade de amostras de solo argilosas, como a amostra de solo S1, ao aumento do diâmetro das partículas na mistura, diminuindo a porcentagem de partículas de argila.

Alguns estudos realizados sobre misturas entre amostras de solos e EAEP relatam que a diminuição da expansão com a adição da EAEP é devida à ocorrência da troca catiônica entre os íons presentes nos dois materiais, que gera floculação das partículas, alterando sua estrutura (PARSAEI *et al.*, 2021).

Os ensaios de compactação Mini-MCV e Perda de massa por imersão foram realizados sem o processo de cura devido às particularidades dos mesmos, portanto, não havendo tempo hábil para a formação de compostos cimentícios proporcionados pela EAEP. O índice e' é utilizado para indicar o grau de laterização de uma determinada amostra de solo (VILLIBOR; NOGAMI, 2009). Verificou-se que o grau de laterização das amostras de solo S1 e S2 com a adição de 20% de EAEP aumentou, pois o valor do índice e' diminuiu. Observou-se também que houve diminuição da Perda de massa por imersão na amostra de solo S2, possivelmente devido à redução da granulometria do material, favorecendo as forças interpartículas. No caso

da amostra de solo S1, houve aumento da perda de massa por imersão, o que pode ser atribuído ao aumento do tamanho das partículas sólidas. Por fim, ressalta-se que o aumento da laterização foi mais destacado na amostra de solo S2, que sofreu uma alteração de Perda de massa por imersão, que, por sua vez, alterou o valor do índice e' , modificando sua classificação para a classe de areias lateríticas.

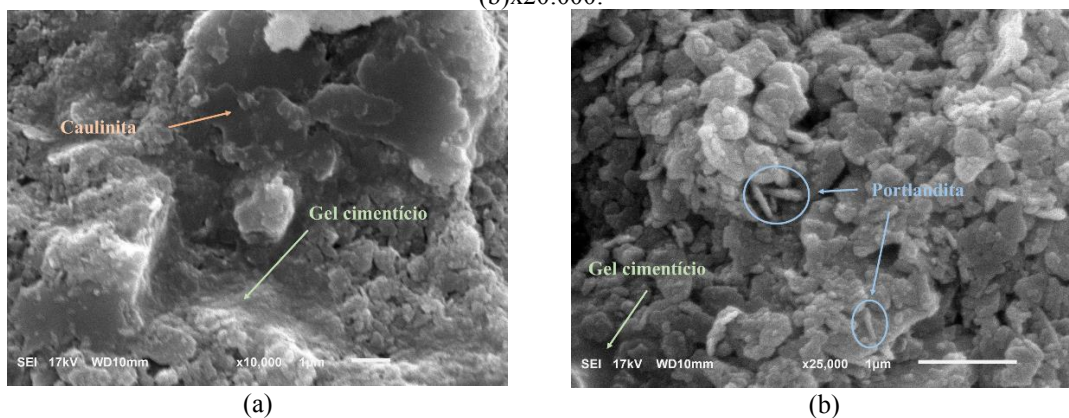
2.4.3. Influências físico-química, mineralógica e microestrutural no comportamento de resistência das misturas solo-resíduos

As composições mineralógica e morfológica das misturas ótimas das amostras de solo estabilizadas com 20% de EAEP foram obtidas a fim de estudar o papel da EAEP no aumento dos valores de RCS, MR e CBR.

2.4.3.1.1. Estabilização da mistura ótima para a amostra de solo S1

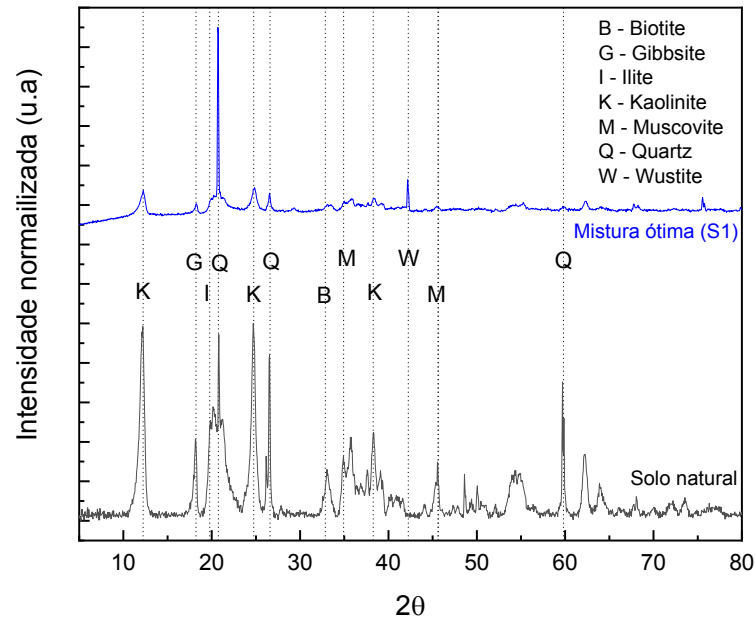
As micrografias para a mistura ótima da amostra de solo S1, apresentadas na Figura 2.30, indicam a formação de estruturas em forma de gel cimentício, o qual gera uma estrutura mais densa do que a estrutura da amostra de solo na sua condição natural, aumentando a resistência do material, como demonstrado a partir dos resultados de RCS, MR e CBR. Verificou-se que o gel cimentício pode ser composto por C-S-H, C-A-S-H e C-A-H que recobrem a superfície das partículas da amostra de solo, preenchendo os poros e fortalecendo a aglomeração entre as partículas. Esses compostos provavelmente foram formados devido às reações químicas entre o óxido de cálcio presente na EAEP e os componentes sílica e alumina presentes na amostra de solo S1. Estruturas semelhantes desses compostos também foram encontradas por outros autores (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; AMINI; GHASEMI, 2019; WU *et al.*, 2019).

Figura 2.30: Micrografias da mistura ótima para a amostra de solo S1 obtida por MEV: (a)x10.000; (b)x20.000.



A análise de DRX da mistura ótima da amostra de solo S1 é apresentada na Figura 2.31. Observou-se que houve formação do composto químico *wustite*, que segundo Al-Amoudi *et al.* (2017) pode se ligar com o hidróxido de cálcio, também presente na mistura ótima, para formarem um composto com propriedades de cimentação, devido à diferença de eletronegatividade entre Ca (1,0 Pauling) e Fe (1,8 Pauling).

Figura 2.31: Difratoograma da mistura ótima obtida por DRX para a amostra de solo S1.



A melhoria das propriedades mecânicas avaliadas também pode estar atribuída ao fato de que a eletronegatividade (1,0 Pauling) do elemento químico Ca presente na EAEP facilita a formação de compostos aglomerantes com a sílica presente na amostra de solo S1 (1,9 Pauling) devido a uma alta diferença de eletronegatividade (AL-AMOUDI *et al.*, 2017).

2.4.3.1.2. Estabilização da mistura ótima para a amostra de solo S2

As micrografias da mistura ótima referente à amostra de solo S2 (Figura 2.32) mostraram a formação de estruturas de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), sílico-aluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H), formados através das reações químicas entre o óxido de cálcio presente na EAEP e os componentes sílica e alumina presentes na amostra de solo S2. Os dados de DRX (Figura 2.33) mostraram que o difratograma da mistura ótima apresentou um pico de óxido de ferro, devido à presença deste na EAEP, o qual, quando combinado com óxidos de alumínio, provoca um efeito de agregação de partículas que diminui os poros do material (WU *et al.*, 2019). Além disso, de acordo com Al-Amoudi *et al.*

(2017), a grande diferença de eletronegatividade entre o elemento Cálcio (1,0 Pauling) e os elementos Ferro (1,8 Pauling) e Silício (1,9 Pauling) facilita a formação de ligações fortes entre esses elementos. Nesse cenário, o átomo de Ca é orientado entre Fe e Si, gerando uma reação de ligação entre sílica, hidróxido de cálcio e óxido de ferro.

Figura 2.32: Micrografias da mistura ótima para a amostra de solo S2 obtida por MEV: (a)x10.000; (b)x10.000.

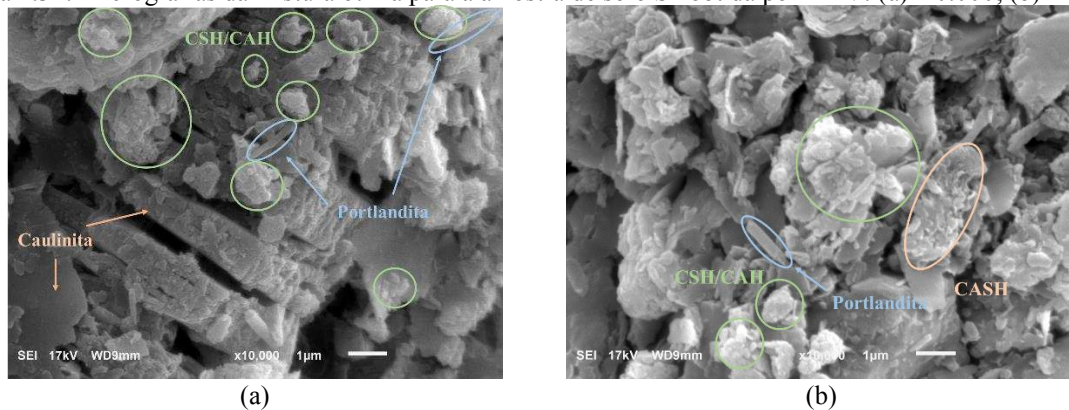
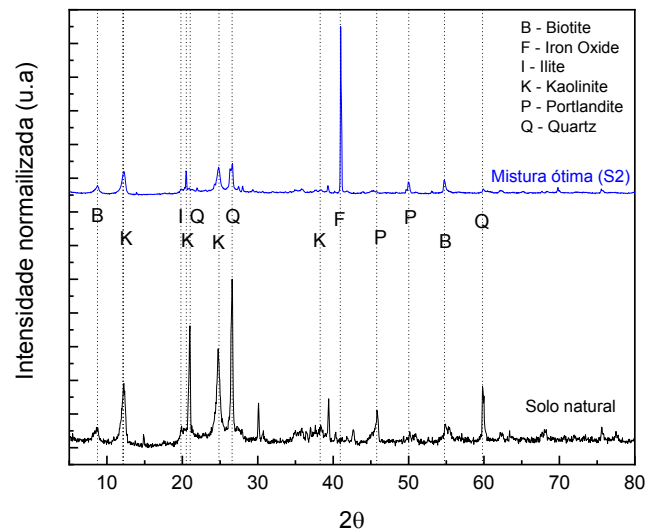


Figura 2.33: Difratograma da mistura ótima obtida por DRX para a amostra de solo S2.



2.5. Conclusões

Baseado nos resultados desta pesquisa, foi possível concluir que:

- O planejamento experimental de misturas mostrou-se eficaz para a realização da otimização das propriedades mecânicas das misturas solo-resíduos analisadas, baseado nas proporções dos constituintes das misturas, visando alcançar os valores recomendados pela literatura técnica;

- As misturas contendo resíduos apresentaram maiores magnitudes de peso específico aparente seco máximo quando comparadas com as amostras de solo no estado natural. Tais alterações podem ser atribuídas à substituição de partículas sólidas das amostras dos solos S1 e S2 pela EAEP que possui massa específica real maior. Outros fatores responsáveis pelo aumento de peso específico aparente seco máximo foram a alteração da granulometria das amostras de solo com a incorporação dos resíduos, possibilitando um arranjo de partículas mais denso, e a troca catiônica entre os íons de cálcio e as superfícies das partículas de argila presentes nas amostras de solo;
- A adição de EAEP tem uma influência positiva na RCS, no MR e no CBR, devida principalmente à formação de estruturas de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), sílico-aluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H), tanto para a amostra de solo S1 quanto para a amostra de solo S2. Foi observada também a presença de *wustite* e de óxido de ferro nas misturas ótimas das amostras de solo S1 e S2, respectivamente, que contribuíram para o preenchimento dos poros e aumento dos valores das propriedades mecânicas analisadas;
- A adição de cinza volante às amostras de solo, apesar de melhorar as propriedades mecânicas analisadas quando comparadas com o solo na sua condição natural, apresentou influência positiva somente sobre o MR de reforço de subleito e de sub-base, para as misturas da amostra de solo S2, e sobre o índice CBR, para as misturas da amostra de solo S1. Em todas as outras situações, a adição de cinza volante apresentou influência negativa;

Observou-se que a Expansão CBR diminuiu nas misturas ótimas das amostras de solo estudadas quando comparadas com as amostras de solo no seu estado natural, devido às trocas catiônicas que alteram a estrutura do material, produzindo maior grau de flocculação.;

- A aplicação de resíduos industriais na estabilização de solos tropicais de baixa capacidade de suporte mostrou-se uma alternativa viável técnica e ambientalmente ao melhorar as propriedades mecânicas avaliadas e propor uma

alternativa de aproveitamento desses resíduos em obras de pavimentação, as quais comumente demandam grandes quantitativos de materiais.

REFERÊNCIAS

- AASHTO. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice**. 3rd ed. [Washington D.C.]: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020. 978-1-56051-748-1.
- ADENIYI, F. I.; OGUNDIRAN, M. B.; HEMALATHA, T.; HANUMANTRAI, B. B. Characterization of raw and thermally treated Nigerian kaolinite-containing clays using instrumental techniques. **SN Applied Sciences**, 2, n. 5, p. 821, 2020/04/05 2020.
- AFRASIABIAN, A.; SALIMI, M.; MOVAHEDRAD, M.; VAKILI, A. H. Assessing the impact of GBFS on mechanical behaviour and microstructure of soft clay. **International Journal of Geotechnical Engineering**, p. 1-11, 2019.
- AKBARIMEHR, D.; AFLAKI, E. J. C. E. J. An experimental study on the effect of tire powder on the geotechnical properties of clay soils. 4, n. 3, p. 594-601, 2018.
- AKINWUMI, I. J. P. P. C. E. Soil modification by the application of steel slag. 58, n. 4, p. 371-377, 2014.
- 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, n. 1, p. 46676, 2017/04/28 2017.
- ALDEEKY, H.; AL HATTAMLEH, O. Experimental study on the utilization of fine steel slag on stabilizing high plastic subgrade soil. **Advances in Civil Engineering**, 2017, 2017.
- ALEISA, E.; HEIJUNGS, R. Leveraging life cycle assessment and simplex lattice design in optimizing fossil fuel blends for sustainable desalination. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 25, n. 4, p. 744-759, 2020/04/01 2020.
- ALHASSAN, M. Potentials of rice husk ash for soil stabilization. **Assumption university journal of technology**, 11, n. 4, p. 246-250, 2008.
- AL-HOMIDY, A. A.; AL-AMOUDI, O.; MASLEHUDDIN, M.; SALEH, T. A. Stabilisation of dune sand using electric arc furnace dust. **International Journal of Pavement Engineering**, 18, n. 6, p. 513-520, 2017.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 145-91**: Standard Specification for Classification of Soils and Soil Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes Washington, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2487-17**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Pensilvânia ASTM International, 2017.

AMIN, M. N.; KHAN, K. Mechanical Performance of High-Strength Sustainable Concrete under Fire Incorporating Locally Available Volcanic Ash in Central Harrat Rahat, Saudi Arabia. **Materials**, 14, n. 1, p. 21, 2021.

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, p. 409-420, 2019/10/30/ 2019.

AMIRI, S. T.; NAZIR, R.; DEHGHANBANADAKI, A. Experimental study of geotechnical characteristics of crushed glass mixed with kaolinite soil. **International Journal**, 14, n. 45, p. 170-176, 2018.

AMRAN, M.; DEBBARMA, S.; OZBAKKALOGLU, T. Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. **Construction and Building Materials**, 270, p. 121857, 2021/02/08/ 2021.

ANAND, A.; SARKAR, R. A comprehensive study on bearing behavior of cement–fly ash composites through experimental and probabilistic investigations. **Innovative Infrastructure Solutions**, 6, n. 1, p. 39, 2020/11/26 2020.

ANDAVAN, S.; PAGADALA, V. K. A study on soil stabilization by addition of fly ash and lime. **Materials Today: Proceedings**, 22, p. 1125-1129, 2020/01/01/ 2020.

APITHANYASAI, S.; SUPAKATA, N.; PAPONG, S. The potential of industrial waste: using foundry sand with fly ash and electric arc furnace slag for geopolymer brick production. **Heliyon**, 6, n. 3, p. e03697, 2020.

ARRIBAS, I.; SANTAMARIA, A.; RUIZ, E.; ORTEGA-LOPEZ, V. *et al.* Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. **Construction and Building Materials**, 90, p. 68-79, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

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, 2012b. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12024 – MB 3361**. Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos - procedimento. Rio de Janeiro, 2012g, 10p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12253**. Solo-cimento: dosagem para emprego como camada de pavimento: procedimento. Rio de Janeiro, 2012a. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**. Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014, 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.

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, 2016e, 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 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, 2016f, 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 NM 13**. Cimento Portland Análise química – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2012d, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 15**. Cimento Portland Análise química – Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012e, 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 18**. Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012c, 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 NBR NM 51**. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001, 13p.

AUTELITANO, F.; GIULIANI, F. Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties. **Construction and Building Materials**, 113, p. 280-289, 2016.

AVET, F.; SCRIVENER, K., 2020, Singapore. **Simple and Reliable Quantification of Kaolinite in Clay Using an Oven and a Balance**. Springer Singapore. 147-156.

AZEVEDO, A.; ALEXANDRE, J.; MARVILA, M.; ZANELATO, E. *et al.* Evaluation of Technological Properties of Soil-Cement Blocks Using Experimental Design of Mixtures. *In: Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2019*: Springer, 2019. p. 647-655.

AZEVEDO, A.; ALEXANDRE, J.; ZANELATO, E.; MARVILA, M. *et al.*, 2018, **Characterization of Different Clays for the Optimization of Mixtures for the Production of Ceramic Artifacts**. Springer. 287-295.

BALAGUERA, C. A. C.; BOTERO, M. A. G. Characterization of steel slag for the production of chemically bonded phosphate ceramics (CBPC). **Construction and Building Materials**, 241, p. 118138, 2020.

BASHA, E.; HASHIM, R.; MAHMUD, H.; MUNTOHAR, A. Stabilization of clay and residual soils using cement-rice husk ash mixtures. **Construction Building Materials**, 5, n. 1, p. 448-453, 2005.

BEAUCOUR, A. L.; PLIYA, P.; FALESCHINI, F.; NJINWOUA, R. *et al.* Influence of elevated temperature on properties of radiation shielding concrete with electric arc furnace slag as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, 256, p. 119385, 2020/09/30/ 2020.

BHUVANESHWARI, S.; ROBINSON, R.; GANDHI, S. Resilient modulus of lime treated expansive soil. **Geotechnical Geological Engineering**, 37, n. 1, p. 305-315, 2019.

BOARD, T. R. Lime stabilization: reactions, properties, design, and construction. **TRANSPORTATION RESEARCH BOARD**, State of the Art Report, n. 5, p. 59, 1987.

BORGES MARINHO, A. L.; MOL SANTOS, C. M.; CARVALHO, J. M. F. d.; MENDES, J. C. *et al.* Ladle furnace slag as binder for cement-based composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 29, n. 11, p. 04017207, 2017.

BOSE, B. Geo engineering properties of expansive soil stabilized with fly ash. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, 17, n. 1, p. 1339-1353, 2012.

BRAND, A. S.; SINGHVI, P.; FANIJO, E. O.; TUTUMLUER, E. Stabilization of a Clayey Soil with Ladle Metallurgy Furnace Slag Fines. **Materials**, 13, n. 19, p. 4251, 2020.

Brasil. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n° 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 mai. 2021, seção 1, ed.58, p. 127

BRITO, W. d. S.; BRUM, S. M.; SILVA, A. L. M. F.; FELIPE, A. M. P. F. *et al.* Avaliação do comportamento reológica e mecânica de geopolímero sintetizado com reaproveitamento de resíduo. **Matéria (Rio de Janeiro)**, 23, 2018.

BUDDHDEV, B. G.; TIMANI, K. L., 2021, Singapore. **Critical Review for Utilization of Blast Furnace Slag in Geotechnical Application**. Springer Singapore. 87-98.

CASTAGNOTTO, E.; LOCARDI, F.; SLIMANI, S.; PEDDIS, D. *et al.* Characterization of the Caput Mortuum purple hematite pigment and synthesis of a modern analogue. **Dyes and Pigments**, 185, p. 108881, 2021/02/01/ 2021.

ČEŠNOVAR, M.; TRAVEN, K.; HORVAT, B.; DUCMAN, V. The potential of ladle slag and electric arc furnace slag use in synthesizing alkali activated materials; the influence of curing on mechanical properties. **Materials**, 12, n. 7, p. 1173, 2019.

CHO, G.-C.; DODDS, J.; SANTAMARINA, J. C. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. 132, n. 5, p. 591-602, 2006.

CIKMIT, A. A.; TAKASHI, T.; KANG, G. O.; TANG, Y. X. *et al.*, 2018, **Strength Development of Stabilized Dredged Marine Clay Using Basic Oxygen Furnace Steel Slag**. ISOPE-I-18-316. Acesso em: 1/14/2021.

CONSOLI, N. C.; GIESE, D. N.; LEON, H. B.; MOCELIN, D. M. *et al.* Sodium chloride as a catalyser for crushed reclaimed asphalt pavement – Fly ash – Carbide lime blends. **Transportation Geotechnics**, 15, p. 13-19, 2018/06/01/ 2018.

CONSOLI, N. C.; ROSA, A. D.; SALDANHA, R. B. Variables governing strength of compacted soil–fly ash–lime mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 23, n. 4, p. 432-440, 2011.

COPPOLA, L.; BUOSO, A.; COFFETTI, D.; KARA, P. *et al.* Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. **Construction and Building Materials**, 123, p. 115-119, 2016/10/01/ 2016.

CORNELL, J. A. **Experiments with mixtures: designs, models, and the analysis of mixture data**. John Wiley & Sons, 2011. 111815049X.

CORREA-YEPES, J. A.; ROJAS-REYES, N.; TOBÓN, J. I. Effect of fly ash and silica fume on rheology, compressive strength and self-compacting in cement mixtures. **DYNA**, 85, p. 59-68, 2018.

COSTA, N. R.; LOURENÇO, J.; PEREIRA, Z. L. Desirability function approach: A review and performance evaluation in adverse conditions. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, 107, n. 2, p. 234-244, 2011/07/01/ 2011.

COUDERT, E.; PARIS, M.; DENELEE, D.; RUSSO, G. *et al.* Use of alkali activated high-calcium fly ash binder for kaolin clay soil stabilisation: Physicochemical evolution. **Construction and Building Materials**, 201, p. 539-552, 2019/03/20/ 2019.

D5982, A. Standard Test Method for Determining Cement Content of Fresh Soil-Cement (Heat of Neutralization Method). ASTM International: West Conshohocken, PA 2015.

D6276, A. Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. American Society of Testing and Materials: West Conshohocken Pennsylvania, USA 2019.

DE MATOS, P. R.; FOIATO, M.; PRUDÊNCIO JR, L. R. Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, 203, p. 282-293, 2019.

DE ROSSI, A.; RIBEIRO, M. J.; LABRINCHA, J. A.; NOVAIS, R. M. *et al.* Effect of the particle size range of construction and demolition waste on the fresh and hardened-state

properties of fly ash-based geopolymer mortars with total replacement of sand. **Process Safety and Environmental Protection**, 129, p. 130-137, 2019/09/01/ 2019.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-CLA 259**: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996.

DIAS, A. R. d. O.; AMANCIO, F. A.; SOUSA, I. L. X. d.; LUCAS, S. O. *et al.* Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. **Matéria (Rio de Janeiro)**, 25, 2020.

DINIZ, D. H.; CARVALHO, J. M. F. d.; 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**, 29, n. 9, p. 04017118, 2017.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. **Highway Research Board**, n. 139, p. 12, 1966.

ELHADJ, M. S. Y.; PERRIN, F. X. Influencing parameters of mechanochemical intercalation of kaolinite with urea. **Applied Clay Science**, 213, p. 106250, 2021/11/01/ 2021.

EMMANUEL, E.; FOGNE APPIAH, N.; AGYEMANG, P.; ABUNDE NEBA, F. *et al.* Simplex Lattice Strength Optimization of Lime-micro Silica Stabilized Coir Fiber-reinforced Soil. **Journal of Natural Fibers**, p. 1-17, 2020.

ESKISAR, T. Influence of Cement Treatment on Unconfined Compressive Strength and Compressibility of Lean Clay with Medium Plasticity. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 40, n. 3, p. 763-772, 2015/03/01 2015.

EUROSLAG. **The European Association representing metallurgical slag producers and processors**. 2019. Disponível em: <http://www.euroslag.com>

EVANGELISTA, B. L.; ROSADO, L. P.; PENTEADO, C. S. G. Life cycle assessment of concrete paving blocks using electric arc furnace slag as natural coarse aggregate substitute. **Journal of Cleaner Production**, 178, p. 176-185, 2018/03/20/ 2018.

FALESCHINI, F.; BRUNELLI, K.; ZANINI, M. A.; DABALA, M. *et al.* Electric arc furnace slag as coarse recycled aggregate for concrete production. **Journal of Sustainable Metallurgy**, 2, n. 1, p. 44-50, 2016.

FERREIRA, V. J.; VILAPLANA, A. S.-D.-G.; GARCÍA-ARMINGOL, T.; ARANDA-USÓN, A. *et al.* Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment. **Journal of Cleaner Production**, 130, p. 175-186, 2016.

FICAGNA, E.; GAVA, A.; ROSSATO, S. B.; ROMBALDI, C. V. *et al.* Effect on Merlot red wine of fining agents mixture: application of the simplex centroid design. **Food Science and Technology**, n. AHEAD, 2020.

GAUTREAU, G. P.; ZHANG, Z.; WU, Z. **Accelerated loading evaluation of subbase layers in pavement performance**. Louisiana Transportation Research Center. 2010.

GOLAKIYA, H. D.; SAVANI, C. D. Studies on geotechnical properties of black cotton soil stabilized with furnace dust and dolomitic lime. **International Research Journal of Engineering and Technology**, 2, p. 810-823, 2015.

GOLLAKOTA, A. R. K.; VOLLI, V.; SHU, C.-M. Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. **Science of The Total Environment**, 672, p. 951-989, 2019/07/01/ 2019.

GONZÁLEZ, I.; VÁZQUEZ, M. A.; ROMERO-BAENA, A. J.; BARBA-BRIOSO, C. Stabilization of fly ash using cementing bacteria. Assessment of cementation and trace element mobilization. **Journal of Hazardous Materials**, 321, p. 316-325, 2017/01/05/ 2017.

GRAFFITTI, D. F. Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica. 2002.

GUARIN, A. S.; DELGADO, R. P. R.; MOLINA, J. S., 2017, **Use of central thermoelectric plant's coal fly ash for the production of ceramic tiles in the metropolitan area of Cúcuta**. 1-6.

GUNARTI, A. S. S.; RAHARJA, I., 2020, **Mechanical Properties Improvement of Clays Using Silica Sand Waste and Dust Sand Foundry Waste**. IOP Publishing. 012002.

HASTUTY, I. P.; ROESYANTO; RAHMAN, A. F. The comparison of adding fly ash and Sinabung ash to limestone towards the soil improvement via CBR value. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 615, p. 012041, 2019/10/15 2019.

HEMALATHA, T.; RAMASWAMY, A. A review on fly ash characteristics—Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. **Journal of cleaner production**, 147, p. 546-559, 2017.

HEWLETT, P.; LISKA, M. **Lea's chemistry of cement and concrete**. Butterworth-Heinemann, 2019. 0081007957.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2004. 0136552757.

HUSSIEN, A. M.; MURAD, M. A. S.; NAJIM, H. Y. Optimal Production Of Bra Block Factory By Using Simplex Method. **Academic Journal of Nawroz University**, 7, n. 3, p. 10-16, 2018.

IAB. Relatório de sustentabilidade. **Instituto Aço Brasil**, p. 84, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320**. Partice Size Analysis - Laser Diffraction Methods, the International Organization for Standardization, 2020.

IRAVANIAN, A.; ABDEH, A. Swell and compressibility characteristics of expansive clays in north Cyprus. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 800, p. 012027, 2020/05/19 2020.

ISLAM, M. R.; TAREFDER, R. A. **Pavement Design: Materials, Analysis, and Highways**. McGraw-Hill Education, 2020. 1260458911.

ISMAIL, A. I. M.; AWAD, S. A.; MWAIFY, M. A. G. The Utilization of Electric Arc Furnace Slag in Soil Improvement. **Geotechnical and Geological Engineering**, 37, n. 1, p. 401-411, 2019/01/01 2019.

JHA, A. K.; SIVAPULLAIAH, P. V. Lime Stabilization of Soil: A Physico-Chemical and Micro-Mechanistic Perspective. **Indian Geotechnical Journal**, 50, n. 3, p. 339-347, 2020/06/01 2020.

JIAO, D.; SHI, C.; YUAN, Q.; AN, X. *et al.* Mixture design of concrete using simplex centroid design method. **Cement and Concrete Composites**, 89, p. 76-88, 2018.

KANG, G.; CIKMIT, A. A.; TSUCHIDA, T.; HONDA, H. *et al.* Strength development and microstructural characteristics of soft dredged clay stabilized with basic oxygen furnace steel slag. **Construction and Building Materials**, 203, p. 501-513, 2019/04/10/ 2019.

KARTHIK, S.; ASHOK, E.; GOWTHAM, P.; ELANGO, G. *et al.* Soil stabilization by using fly ash. **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, 10, n. 6, p. 20-26, 2014.

KHOBBAKHT, G.; KHEIRALIPOUR, K.; YUAN, W.; SEIFI, M. R. *et al.* Desirability function approach for optimization of enzymatic transesterification catalyzed by lipase immobilized on mesoporous magnetic nanoparticles. **Renewable Energy**, 158, p. 253-262, 2020/10/01/ 2020.

KUČERÍK, J.; SVATOŇ, K.; MALÝ, S.; BRTNICKÝ, M. *et al.* Determination of soil properties using thermogravimetry under laboratory conditions. 71, n. 3, p. 415-419, 2020.

LAM, M. N.-T.; JARITNGAM, S.; LE, D.-H. Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, 154, p. 482-495, 2017/11/15/ 2017.

LAM, M. N.-T.; LE, D.-H.; JARITNGAM, S. Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash. **Construction and Building Materials**, 191, p. 912-922, 2018/12/10/ 2018.

LEE, J.-Y.; CHOI, J.-S.; YUAN, T.-F.; YOON, Y.-S. *et al.* Comparing properties of concrete containing electric arc furnace slag and granulated blast furnace slag. **Materials**, 12, n. 9, p. 1371, 2019.

LEE, Y.-J.; KIM, H.-G.; KIM, M.-J.; KIM, D.-H. *et al.* Bond performance of reinforced concrete beams with electric arc furnace slag aggregates. **Construction and Building Materials**, 244, p. 118366, 2020/05/30/ 2020.

LI, C.-C.; LIN, C.-M.; CHANG, Y.-E.; CHANG, W.-T. *et al.* Stabilization and Crystal Characterization of Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Modified with Ladle Furnace Slag and Alumina. **Metals**, 10, n. 4, p. 501, 2020.

LI, Y.; QIAO, C.; NI, W. Green concrete with ground granulated blast-furnace slag activated by desulfurization gypsum and electric arc furnace reducing slag. **Journal of Cleaner Production**, 269, p. 122212, 2020/10/01/ 2020.

LIM, J. S.; CHEAH, C. B.; RAMLI, M. B. The setting behavior, mechanical properties and drying shrinkage of ternary blended concrete containing granite quarry dust and processed steel slag aggregate. **Construction and Building Materials**, 215, p. 447-461, 2019/08/10/ 2019.

LIU, C.; DUPONT-NIVET, G.; WANG, W.; DENG, C. Magnetic response to pedogenesis in aerobic soils of different weathering degree. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 567, p. 110240, 2021/04/01/ 2021.

LIU, L.; RUAN, S.; QI, C.; ZHANG, B. *et al.* Co-disposal of magnesium slag and high-calcium fly ash as cementitious materials in backfill. **Journal of Cleaner Production**, 279, p. 123684, 2021/01/10/ 2021.

LOPES, E. C.; DA SILVA, T. O.; PITANGA, H. N.; PEDROTI, L. G. *et al.* Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. **International Journal of Pavement Engineering**, p. 1-12, 2021.

LOPES, M. M. S.; ALVARENGA, R. d. C. S. S. A.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L. *et al.* Influence of the incorporation of granite waste on the hiding power and abrasion resistance of soil pigment-based paints. **Construction and Building Materials**, 205, p. 463-474, 2019/04/30/ 2019.

LÓPEZ, C. M.; BUENO, J. P.; LÓPEZ, M. M.; ARAIZA, J. R. *et al.* Fly ash lightweight material of the cellular concrete type using sol-gel and thermal treatment. **Construction and Building Materials**, 206, p. 512-518, 2019.

MAGHOOL, F.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.; DU, Y.-J., 2016, **GEOTECHNICAL PROPERTIES OF LADLE FURNACE SLAG IN ROADWORK APPLICATIONS**.

MAHEDI, M.; CETIN, B.; DAYIOGLU, A. Y. J. W. M. Leaching behavior of aluminum, copper, iron and zinc from cement activated fly ash and slag stabilized soils. 95, p. 334-355, 2019.

MAHMUDI, M.; ALTUN, S.; ESKISAR, T. Experimental and Numerical Evaluation of Clay Soils Stabilized with Electric Arc Furnace (EAF) Slag. **Advances in Sustainable Construction Resource Management**, 144, p. 73, 2021.

MAHOUTIAN, M.; GHOULEH, Z.; SHAO, Y. Carbon dioxide activated ladle slag binder. **Construction and Building Materials**, 66, p. 214-221, 2014/09/15/ 2014.

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

MAKÓ, É.; KRISTÓF, J.; HORVÁTH, E.; VÁGVÖLGYI, V. Kaolinite–urea complexes obtained by mechanochemical and aqueous suspension techniques—A comparative study. **Journal of Colloid and Interface Science**, 330, n. 2, p. 367-373, 2009/02/15/ 2009.

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

MANSO, J. M.; POLANCO, J. A.; LOSANEZ, M.; GONZALEZ, J. J. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. **Cement and concrete composites**, 28, n. 6, p. 528-534, 2006.

MARVILA, M.; AZEVEDO, A.; ALEXANDRE, J.; ZANELATO, E. *et al.* Proposal of Dosing of Mortars Using Simplex Network. *In: Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2019*: Springer, 2019. p. 747-756.

MARZULLI, V.; SANDEEP, C. S.; SENETAKIS, K.; CAFARO, F. *et al.* Scale and water effects on the friction angles of two granular soils with different roughness. **Powder Technology**, 377, p. 813-826, 2021/01/02/ 2021.

MATHIAN, M.; BUENO, G. T.; BALAN, E.; FRITSCH, E. *et al.* Kaolinite dating from Acrisol and Ferralsol: A new key to understanding the landscape evolution in NW Amazonia (Brazil). **Geoderma**, 370, p. 114354, 2020/07/01/ 2020.

MCCARTHY, M.; CSETENYI, L.; SACHDEVA, A.; DHIR, R. Identifying the role of fly ash properties for minimizing sulfate-heave in lime-stabilized soils. 92, n. 1, p. 27-36, 2012.

MEDEIROS, V. S. C.; PEDROTI, L. G.; MENDES, B. C.; PITANGA, H. N. *et al.* Study of mixtures using simplex design for the addition of chamotte in clay bricks. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, 16, n. 6, p. 2349-2361, 2019.

MEDINA, J.; MOTTA, L. **Mecânica dos pavimentos**. Ed. Interciência: 2015.

MISTRY, R.; ROY, T. K. Performance evaluation of bituminous mix and mastic containing rice husk ash and fly ash as filler. **Construction and Building Materials**, 268, p. 121187, 2021/01/25/ 2021.

MOLLON, G.; QUACQUARELLI, A.; ANDÒ, E.; VIGGIANI, G. Can friction replace roughness in the numerical simulation of granular materials? **Granular Matter**, 22, n. 2, p. 42, 2020/03/23 2020.

MONOSI, S.; RUELLO, M. L.; SANI, D. Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. **Cement and concrete composites**, 66, p. 66-72, 2016.

MONTENEGRO-COOPER, J. M.; CELEMÍN-MATACHANA, M.; CAÑIZAL, J.; GONZÁLEZ, J. J. Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils. **Construction and Building Materials**, 203, p. 201-209, 2019/04/10/ 2019.

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

MORSI, S. M.; EMIRA, H. S.; EL-SAWY, S. M.; MOHSEN, R. M. *et al.* Synthesis and characterization of kaolinite/polyaniline nanocomposites and investigating their anticorrosive performance in chlorinated rubber/alkyd coatings. 40, n. 7, p. 2777-2789, 2019.

MYPATI, V. N.; SARIDE, S. Effect of Alkali Activated Fly Ash on Shrinkage Characteristics of Expansive Soil. p. 11, 2020.

NARDELLI, V.; COOP, M. R. The experimental contact behaviour of natural sands: normal and tangential loading. 69, n. 8, p. 672-686, 2019.

NATH, B. D.; MOLLA, M. K. A.; SARKAR, G. Study on Strength Behavior of Organic Soil Stabilized with Fly Ash. **International Scholarly Research Notices**, 2017, p. 5786541, 2017/09/11 2017.

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

NETINGER, I.; JELČIĆ RUKAVINA, M.; SERDAR, M.; BJEGOVIĆ, D. J. T. v. T. G. STEEL SLAG AS A VALUABLE MATERIAL FOR CONCRETE PRODUCTION. 21, n. 5, 2014.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos-: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. Bookman Editora, 2010. 8577807134.

NIKOLIĆ, I.; ĐUROVIĆ, D.; MARKOVIĆ, S.; VESELINOVIĆ, L. *et al.* Alkali activated slag cement doped with Zn-rich electric arc furnace dust. **Journal of Materials Research and Technology**, 9, n. 6, p. 12783-12794, 2020/11/01/ 2020.

ODION, D.; KHATTAK, M. J. Stabilizing Sandy Silt Soil with Fly-Ash Based RCA Geopolymer in Pavement Base Layers. *In: Tran-SET 2020*, 2021. p. 76-86.

OKEWALE, I. A. Compressibility and the Effects of Structure of Tropical Clay in Incremental Loading Oedometer Tests. **Geotechnical and Geological Engineering**, 38, n. 5, p. 5355-5371, 2020/10/01 2020.

OKONKWO, U.; AGUNWAMBA, J. CLASSICAL OPTIMIZATION OF BAGASSE ASH CONTENT IN CEMENT-STABILIZED LATERITIC SOIL. **Nigerian Journal of Technology**, 35, n. 3, p. 481-490, 2016.

OLUWASOLA, E.; AFOLAYAN, A.; POPOOPA, M.; AFOLABI, A. Effect of Steel Slag on Engineering Properties of Lateritic Soil. **American Journal of Engineering Research**, 9, n. 6, p. 20-27, 2020.

ONYELOWE, K. C.; ALANEME, G.; VAN, D. B.; VAN, M. N. *et al.* Generalized Review on EVD and Constraints Simplex Method of Materials Properties Optimization for Civil Engineering. **Civil Engineering Journal**, 5, n. 3, p. 729-749, 2019.

ONYELOWE, K. Nanostructured waste paper ash treated lateritic soil and its California bearing ratio optimization. **Global J Technol Optim**, 8, p. 220, 2017.

OZDEMIR, M. A. J. P. e. Improvement in bearing capacity of a soft soil by addition of fly ash. 143, p. 498-505, 2016.

OZTURK, M.; AKGOL, O.; SEVIM, U. K.; KARAASLAN, M. *et al.* Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag. **Construction and Building Materials**, 165, p. 58-63, 2018/03/20/ 2018.

PALOD, R.; DEO, S.; RAMTEKKAR, G. Review and Suggestions on use of Steel Slag in Concrete and its Potential use as Cementitious Component Combined with GGBS. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, 8, n. 4, p. 1026-1035, 2017.

PANDEY, A.; GUPTA, A.; SUNNY, A.; KUMAR, S. *et al.* Multi-objective optimization of media components for improved algae biomass, fatty acid and starch biosynthesis from *Scenedesmus* sp. ASK22 using desirability function approach. **Renewable Energy**, 150, p. 476-486, 2020/05/01/ 2020.

PARSAEI, M.; VAKILI, A. H.; SALIMI, M.; FARHADI, M. S. *et al.* Effect of electric arc and ladle furnace slags on the strength and swelling behavior of cement-stabilized expansive clay. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2021/06/10 2021.

PENTEADO, C. S. G.; EVANGELISTA, B. L.; FERREIRA, G. C. d. S.; BORGES, P. H. A. *et al.* Use of electric arc furnace slag for producing concrete paving blocks. **Ambiente Construído**, 19, n. 2, p. 21-32, 2019.

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**, University of Texas, 1992.

PHUMMIPHAN, I.; HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; ARULRAJAH, A. *et al.* High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material. **Journal of Hazardous Materials**, 341, p. 257-267, 2018/01/05/ 2018.

PITANGA, H. N.; SILVA, T. O. d.; SANTOS, A. L. d.; SILVA, A. C. B. *et al.* MCT CLASSIFICATION FOR COMPACTED MIXTURES OF SOIL-STEEL SLAG-FLY ASH FOR APPLICATION IN FOREST ROADS. **Revista Árvore**, 40, p. 911-919, 2016.

PLANTE, A. F.; FERNÁNDEZ, J. M.; LEIFELD, J. Application of thermal analysis techniques in soil science. **Geoderma**, 153, n. 1-2, p. 1-10, 2009.

POMARO, B.; GRAMEGNA, F.; CHERUBINI, R.; DE NADAL, V. *et al.* Gamma-ray shielding properties of heavyweight concrete with Electric Arc Furnace slag as aggregate: an experimental and numerical study. **Construction and Building Materials**, 200, p. 188-197, 2019.

QASRAWI, H. Hardened Properties of Green Self-Consolidating Concrete Made with Steel Slag Coarse Aggregates under Hot Conditions. **Materials Journal**, 117, n. 1, 2020.

QUINTERO, A. B.; CANO, D. G.; PELÁEZ, G. C.; ARIAS, Y. P., 2017, Cham. **Technical and Environmental Assessment of an Alternative Binder for Low Traffic Roads with LCA Methodology**. Springer International Publishing. 155-164.

RANDHAWA, K.; CHAUHAN, R., 2021, **Investigating Strength Behaviour of Pond Ash as a Construction fill material**. IOP Publishing. 012085.

ROA-BOHÓRQUEZ, K. L.; PAREDES-ROA, R. A.; LARA-GONZÁLEZ, L. Á. Aplicación de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ y cenizas volantes como refuerzo en la matriz de unidades cerámicas macizas. **Revista Ingenierías Universidad de Medellín**, 17, p. 35-49, 2018.

RONDÓN-QUINTANA, H. A.; RUGE-CÁRDENAS, J. C.; FARIAS, M. M. d. Behavior of Hot-Mix Asphalt Containing Blast Furnace Slag as Aggregate: Evaluation by Mass and Volume Substitution. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 31, n. 2, p. 04018364, 2019.

SANDEEP, C. S.; HE, H.; SENETAKIS, K. An experimental micromechanical study of sand grain contacts behavior from different geological environments. **Engineering Geology**, 246, p. 176-186, 2018/11/28/ 2018.

SANDEEP, C. S.; SENETAKIS, K. Effect of Young's Modulus and Surface Roughness on the Inter-Particle Friction of Granular Materials. 11, n. 2, p. 217, 2018.

SANTAMARIA, A.; FALESCHINI, F.; GIACOMELLO, G.; BRUNELLI, K. *et al.* Dimensional stability of electric arc furnace slag in civil engineering applications. **Journal of Cleaner Production**, 205, p. 599-609, 2018/12/20/ 2018.

SANTAMARÍA, A.; GARCÍA-LLONA, A.; REVILLA-CUESTA, V.; PIÑERO, I. *et al.* Bending tests on building beams containing electric arc furnace slag and alternative binders and manufactured with energy-saving placement techniques. **Structures**, 32, p. 1921-1933, 2021/08/01/ 2021.

SANTAMARÍA, A.; ORTEGA-LÓPEZ, V.; SKAF, M.; CHICA, J. A. *et al.* The study of properties and behavior of self compacting concrete containing Electric Arc Furnace Slag (EAFS) as aggregate. **Ain Shams Engineering Journal**, 11, n. 1, p. 231-243, 2020/03/01/ 2020.

SANTAMARÍA, A.; ROJÍ, E.; SKAF, M.; MARCOS, I. *et al.* The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars. **Construction and Building Materials**, 106, p. 364-373, 2016/03/01/ 2016.

SARHAN, A.; KISHAR, E. A.; HAMED, S. A. Uses of EAFS in production of blended cements. **Journal of Scientific Research in Science**, 37, n. Part 1 (Basic Sciences), p. 111-124, 2020.

SEBBAR, N.; LAHMILI, A.; BAHI, L.; OUADIF, L., 2020, **Treatment of clay soils with steel slag, in road engineering**. EDP Sciences. 02017.

SERRA, M. F.; CONCONI, M. S.; SUÁREZ, G.; AGIETTI, E. *et al.* Firing transformations of an argentinean calcareous commercial clay. 59, p. 254-261, 2013.

SHAHSAVANI, S.; VAKILI, A. H.; MOKHBERI, M. Effects of freeze-thaw cycles on the characteristics of the expansive soils treated by nanosilica and Electric Arc Furnace (EAF) slag. **Cold Regions Science and Technology**, 182, p. 103216, 2021/02/01/ 2021.

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**, 29, n. 4, p. 394-399, 2017.

SHEEN, Y.-N.; LE, D.-H.; LAM, M. N.-T. Performance of Self-compacting Concrete with Stainless Steel Slag Versus Fly Ash as Fillers: A Comparative Study. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, 2021.

SHI, Z.; SHI, C.; ZHAO, R.; WANG, D. *et al.* Factorial Design Method for Designing Ternary Composite Cements to Mitigate ASR Expansion. 28, n. 9, p. 04016064, 2016.

SIEWERT, C.; KUČERÍK, J. Practical applications of thermogravimetry in soil science. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 120, n. 1, p. 471-480, 2015/04/01 2015.

SIMATUPANG, M. Effectiveness of lowering saturation on residual shear strength of sand stabilized with fly-ash. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 622, p. 012003, 2021/01/08 2021.

SKAF, M.; PASQUINI, E.; REVILLA-CUESTA, V.; ORTEGA-LÓPEZ, V. Performance and Durability of Porous Asphalt Mixtures Manufactured Exclusively with Electric Steel Slags. **Materials**, 12, n. 20, p. 3306, 2019.

SOLOUKI, A.; VISCOMI, G.; TATARANNI, P.; SANGIORGI, C. Preliminary Evaluation of Cement Mortars Containing Waste Silt Optimized with the Design of Experiments Method. **Materials**, 14, n. 3, p. 528, 2021.

SOSA, I.; THOMAS, C.; POLANCO, J. A.; SETIÉN, J. *et al.* High Performance Self-Compacting Concrete with Electric Arc Furnace Slag Aggregate and Cupola Slag Powder. **Applied Sciences**, 10, n. 3, p. 773, 2020.

SRIDHARAN, A.; PRASHANTH, J. P.; SIVAPULLAIAH, P. V. Effect of fly ash on the unconfined compressive strength of black cotton soil. 1, n. 3, p. 169-175, 1997.

SUDLA, P.; HORPIBULSUK, S.; CHINKULKIJNIWAT, A.; ARULRAJAH, A. *et al.* Marginal lateritic soil/crushed slag blends as an engineering fill material. **Soils and Foundations**, 58, n. 3, p. 786-795, 2018/06/01/ 2018.

TAMAYO, P.; PACHECO, J.; THOMAS, C.; DE BRITO, J. *et al.* Mechanical and Durability Properties of Concrete with Coarse Recycled Aggregate Produced with Electric Arc Furnace Slag Concrete. **Applied Sciences**, 10, n. 1, p. 216, 2020.

TASTAN, E. O.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H.; AYDILEK, A. H. J. J. o. g. *et al.* Stabilization of organic soils with fly ash. 137, n. 9, p. 819-833, 2011.

TEIXEIRA, E. R.; CAMÕES, A.; BRANCO, F.; AGUIAR, J. *et al.* Recycling of biomass and coal fly ash as cement replacement material and its effect on hydration and carbonation of concrete. **Waste Management**, 94, p. 39-48, 2019.

TOKARSKI, D.; WIESMEIER, M.; DOLEŽALOVÁ WEISSMANNOVÁ, H.; KALBITZ, K. *et al.* Linking thermogravimetric data with soil organic carbon fractions. **Geoderma**, 362, p. 114124, 2020/03/15/ 2020.

TRAVEN, K.; ČEŠNOVAR, M.; DUCMAN, V. Particle size manipulation as an influential parameter in the development of mechanical properties in electric arc furnace slag-based AAM. **Ceramics International**, 45, n. 17, p. 22632-22641, 2019.

VARGA, G. J. E. The structure of kaolinite and metakaolinite. 59, n. 1, p. 6-9, 2007.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. Editora Arte & Ciência, 2009. 8561165340.

WANG, G.; WANG, Y.; GAO, Z. Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. **Journal of Hazardous Materials**, 184, n. 1, p. 555-560, 2010/12/15/ 2010.

WANG, Y.; LU, S.; REN, T.; LI, B. Bound water content of air-dry soils measured by thermal analysis. **Soil Science Society of America Journal**, 75, n. 2, p. 481-487, 2011.

WU, J.; LIU, Q.; DENG, Y.; YU, X. *et al.* Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways. **Soils Foundations**, 59, n. 4, p. 955-965, 2019.

XU, B.; YI, Y. Soft clay stabilization using ladle slag-ground granulated blastfurnace slag blend. **Applied Clay Science**, 178, p. 105136, 2019.

XU, B.; YI, Y. Use of ladle furnace slag containing heavy metals as a binding material in civil engineering. **Science of The Total Environment**, 705, p. 135854, 2020.

YADU, L.; TRIPATHI, R. K.; SINGH, D. Comparison of fly ash and rice husk ash stabilized black cotton soil. **International Journal of Earth Sciences Engineering**, 4, n. 06, p. 42-45, 2011.

YEIH, W.; CHANG, J. J. The influences of cement type and curing condition on properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag as aggregates. **Construction and Building Materials**, 197, p. 813-820, 2019.

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**, 154, p. 23-33, 2017.

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

YOOBANPOT, N.; JAMSAWANG, P.; POORAHONG, H.; JONGPRADIST, P. *et al.* Multiscale laboratory investigation of the mechanical and microstructural properties of dredged sediments stabilized with cement and fly ash. **Engineering Geology**, 267, p. 105491, 2020/03/20/ 2020.

ZHANG, N.; WU, L.; LIU, X.; ZHANG, Y. Structural characteristics and cementitious behavior of basic oxygen furnace slag mud and electric arc furnace slag. **Construction and Building Materials**, 219, p. 11-18, 2019/09/20/ 2019.

ZHANG, Q.; FENG, X.; CHEN, X.; LU, K. Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on response surface methodology. **Construction and Building Materials**, 259, p. 119776, 2020/10/30/ 2020.

ZHUANG, X. Y.; CHEN, L.; KOMARNENI, S.; ZHOU, C. H. *et al.* Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. **Journal of Cleaner Production**, 125, p. 253-267, 2016.

ZIAEE, S. A.; BEHNIA, K. Evaluating the effect of electric arc furnace steel slag on dynamic and static mechanical behavior of warm mix asphalt mixtures. **Journal of Cleaner Production**, 274, p. 123092, 2020/11/20/ 2020.

ZUMRAWI, M. M.; BABIKIR, A. A.-A. A. Laboratory Study of Steel Slag Used for Stabilizing Expansive Soil. **University Of Khartoum Engineering Journal**, 6, n. 2, 2017.

3. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURAS SOLO-ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA PRIMÁRIA SOB CARBONATAÇÃO

Resumo: O comportamento geotécnico sob carbonatação de solos estabilizados com materiais que possuem grande quantidade de óxido e/ou hidróxido de cálcio é importante para avaliar a eficiência da estabilização do ponto de vista da durabilidade. Neste contexto, este estudo teve como objetivo investigar a influência da carbonatação em misturas entre duas amostras de solos tropicais e escória de aciaria elétrica primária (EAEP) com respeito às propriedades de resistência à compressão simples (RCS), índice mini-CBR, expansão mini-CBR e módulo de resiliência (MR). Para isso, foram utilizados quatro tipos de cura: (1) convencional selada em câmara úmida seguida de cura não selada em câmara de carbonatação acelerada; (2) cura da amostra de EAEP antes da compactação dos corpos de prova seguida de cura convencional selada em câmara úmida; (3) convencional selada em câmara úmida; e (4) convencional selada em câmara úmida seguida de cura não selada com exposição ao ar. Adicionalmente, foram realizados ensaios de determinação da frente de carbonatação através da aspersão de fenolftaleína, pH, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX). Observou-se que, em todos os processos de cura analisados, para as misturas solo S1-EAEP e solo S2-EAEP, os resultados das propriedades mecânicas analisadas foram superiores aos das amostras de solos na sua condição natural (não estabilizada). Através dos ensaios de MEV e DRX, identificou-se a formação de estruturas de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), sílico-aluminatos de cálcio hidratado (C-A-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H) após o período de cura em câmara úmida, melhorando o comportamento mecânico das misturas solo-EAEP. A formação de carbonato de cálcio (CaCO_3), devida à reação entre hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ e gás carbônico (CO_2), foi observada nos processos de cura (1) e (4), gerando acréscimos substanciais nas propriedades mecânicas, sobretudo para o processo de cura (1). A expansibilidade foi mais impactante para as misturas solo S1-EAEP submetidas aos processos de cura (1) e (4), aumentando com o tempo de cura. Através dos ensaios de aspersão de fenolftaleína e de pH, foi possível identificar o avanço da frente de carbonatação nos processos de cura (1) e (4). O processo de carbonatação, portanto, não se mostrou deletério como no caso

de concretos, aumentando a resistência e rigidez das misturas solo-EAEP, o que garante a durabilidade dessas misturas ao longo dos anos.

Palavras-chave: Carbonatação acelerada. Carbonatação ao ar Estabilização de solos. Escória de aciaria elétrica primária.

Abstract: The geotechnical behavior under carbonation of soils stabilized with materials that have a large amount of calcium oxide and/or hydroxide is important to assess the stabilization efficiency from the point of view of durability. In this context, this study aimed to investigate the influence of carbonation in mixtures between two samples of tropical soils and Electric Arc Furnace Slag (EAFS) with respect to the properties of Unconfined Compressive Strength (UCS), mini-CBR index, expansion mini-CBR and Resilient Modulus (RM). For this, four types of curing were used: (1) conventional sealed in a humid chamber followed by unsealed curing in an accelerated carbonation chamber; (2) curing of the EAFS sample before compaction of the specimens followed by conventional sealed curing in a humid chamber; (3) conventional sealed in a humid chamber; and (4) conventional sealed in a humid chamber followed by unsealed curing with exposure to air. Additionally, tests were carried out to determine the carbonation front by spraying phenolphthalein, pH, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). It was observed that, in all the curing processes analyzed, for the S1-EAFS and S2-EAFS mixtures, the results of the analyzed mechanical properties were superior to those of soil samples in their natural condition (not stabilized). Through SEM and XRD tests, the formation of calcium silicate hydrate (CSH), calcium aluminum silicate hydrate (CASH) and calcium aluminate hydrate (CAH) structures were identified after the period of curing in a humid chamber, improving the mechanical behavior of soil-EAFS mixtures. The formation of calcium carbonate (CaCO_3), due to the reaction between calcium hydroxide [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] and carbon dioxide (CO_2), was observed in the curing processes (1) and (4), generating substantial increases in mechanical properties, especially for the curing process (1). The expandability was more impactful for the S1-EAEP mixtures submitted to the curing processes (1) and (4), increasing with the curing time. Through the phenolphthalein and pH spray tests, it was possible to identify the advance of the carbonation front in the curing processes (1) and (4). The carbonation process, therefore, was not harmful as in the case of concrete, increasing the strength and stiffness of the soil-EAEP mixtures, which guarantees the durability of these mixtures over the years.

Key-words: Accelerated carbonation. Carbonation in air. Soil stabilization. Electric arc furnace slag.

3.1. INTRODUÇÃO

Para avaliar a eficiência da estabilização de solos sob a ótica da durabilidade, investigações detalhadas da influência de fatores, como chuva ácida, ataque por sulfatos, ciclos de umedecimento-secagem, ciclos de congelamento-degelo e processos de carbonatação, devem ser realizadas (XU *et al.*, 2020).

Convencionalmente, a reação de carbonatação que ocorre em concretos é considerada desfavorável, pois diminui a durabilidade do material, mas para a estabilização de solos ocorre o inverso (ZHOU *et al.*, 2018). A exposição de solos tratados com materiais à base de cálcio à ação do gás carbônico resulta em transformações físicas e químicas que afetam o comportamento da mistura resultante em longo prazo, aumentando a resistência e a rigidez (VITALE *et al.*, 2021).

A técnica de carbonatação acelerada simula a carbonatação em campo com uma intensidade superior à de serviço do material. Essa técnica tem como objetivo obter o comportamento dos materiais submetidos à carbonatação em um curto período de tempo (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007; SILVA; MELO, 2020).

Haas e Ritter (2019) avaliaram o comportamento estrutural de um aterro de solo estabilizado com cal após 34 anos. Os autores observaram que o processo de carbonatação não foi deletério, aumentando a resistência à compressão simples do material, e que ainda havia cal disponível para que o processo de carbonatação continuasse a ocorrer.

A captura e armazenamento de CO₂, bem como os métodos de carbonatação mineral, possuem um importante papel na redução de CO₂ na atmosfera. A carbonatação mineral envolve o uso de minerais industriais, naturais e resíduos que possuem cálcio ou magnésio em sua composição para que possam capturar CO₂ através do processo de carbonatação (MOHAMMED *et al.*, 2021).

De acordo com o World Bank (2019), a geração de resíduos no planeta só aumenta, atingindo mais de 2 bilhões de toneladas em 2016 e com uma estimativa de cerca de 3,4 bilhões em 2050, devido ao grande crescimento populacional. No Brasil, por exemplo, segundo o relatório de sustentabilidade emitido pelo Instituto Aço Brasil (IAB, 2018), a produção de aço

gera mais de 600kg/tonelada de coprodutos e resíduos, dentre os quais encontra-se a escória, que sozinha contribui com, em média, 100 a 150kg desse valor. Em 2017, cerca de 59% desse total foram reutilizados e reciclados, restando ainda mais de 12 milhões de toneladas de escórias de aciaria estocadas.

Segundo a norma técnica brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004), resíduos sólidos são definidos como resíduos em estado semissólido e sólido que advêm de atividades de origens industrial, doméstica, comercial, hospitalar, agrícola, de serviços e varrição. Mais precisamente, a norma regulamentadora NR 25 (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2011) traz a definição de resíduos industriais como aqueles provenientes dos processos industriais, na forma sólida, líquida ou gasosa ou combinação dessas, e que por suas características físicas, químicas ou microbiológicas não se assemelham ao lixo doméstico. Dentre esses resíduos, se incluem as escórias de aciaria, bem como cinzas, materiais alcalinos ou ácidos, substâncias lixiviadas, despejos gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição e também os demais efluentes líquidos e emissões gasosas que contaminam a atmosfera.

Considerando a necessidade de redução do consumo de recursos naturais empregados como matéria-prima na construção civil, alguns estudos têm sido realizados a fim de avaliar os aspectos técnicos relacionados ao uso da escória de aciaria elétrica primária (EAEP) como um material alternativo empregado em substituição parcial do cimento (NIKOLIĆ *et al.*, 2020), como agregado em argamassas (OZTURK *et al.*, 2018), na composição de tijolos (APITHANYASAI; SUPAKATA; PAPONG, 2020), concretos convencionais (BEAUCOUR *et al.*, 2020; LEE *et al.*, 2020; LI; QIAO; NI, 2020; TAMAYO *et al.*, 2020), concretos auto-adensáveis (SANTAMARÍA *et al.*, 2020; SOSA *et al.*, 2020), concretos compactados com rolo (LAM; JARITNGAM; LE, 2017), blocos intertravados (EVANGELISTA; ROSADO; PENTEADO, 2018; PENTEADO *et al.*, 2019), corpos de aterro (YILDIRIM; PREZZI, 2017) e misturas asfálticas (FERREIRA *et al.*, 2016; SKAF *et al.*, 2019), assim como na estabilização de solos em substituição ao cimento e à cal, que são os materiais comumente utilizados para essa finalidade (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; AUTELITANO; GIULIANI, 2016; BRAND *et al.*, 2020; DINIZ *et al.*, 2017; ISMAIL; AWAD; MWAIFY, 2019; SEBBAR *et al.*, 2020; SHAHSAVANI; VAKILI; MOKHBERI, 2021; ZUMRAWI; BABIKIR, 2017). Neste último caso, ressalta-se que os mecanismos de

estabilização são similares aos dos agentes estabilizantes mais comuns, cimento e cal, e geram como produto final compostos cimentícios, como os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) (RANDHAWA; CHAUHAN, 2021).

Segundo Mohammed *et al.* (2021), a carbonatação mineral melhora a resistência do solo, pois os novos produtos da carbonatação se expandem e preenchem os vazios do solo, melhorando a resistência. O aumento da carbonatação na estabilização do solo é limitado pela pressão e concentração de CO₂. Os estudos nesta área são limitados, sendo que os materiais mais frequentemente utilizados para estabilização de solos através da carbonatação são a magnésia reativa e a olivina natural. No entanto, o uso desses materiais apresenta algumas desvantagens e não são materiais sustentáveis. É fundamental encontrar outra alternativa com grande potencial para capturar o CO₂ e melhorar a resistência dos solos naturais.

Durabilidade de misturas solo-cal é a manutenção das propriedades de engenharia acima dos valores mínimos de projeto durante a vida útil da construção (VITALE *et al.*, 2021). As diferentes causas de diminuição da durabilidade de solos tratados quimicamente com materiais à base de cal incluem variações sazonais de umidade (ciclos de umedecimento e secagem), chuva ácida, ciclos de congelamento e degelo, lixiviação de cálcio e carbonatação de hidróxido de cálcio e de compostos cimentícios (CHAKRABORTY; NAIR, 2020; PADMARAJ; ARNEPALLI, 2018; 2021; XU *et al.*, 2020). Segundo Xu *et al.* (2020), a carbonatação é uma das propriedades chave para a avaliação da durabilidade de materiais à base de cal e cimento.

Na literatura técnica, estudos sobre a ocorrência de carbonatação e seu efeito na durabilidade de solos tratados com materiais à base de cal são escassos (VITALE *et al.*, 2021). Estudos recentes têm sido desenvolvidos com a finalidade de tratar esse aspecto de forma mais aprofundada (DENELE *et al.*, 2021; HO *et al.*, 2018; HO *et al.*, 2017; HOSSEN; GALLANT; ASHRAF, 2020; LI *et al.*, 2021; PARK *et al.*, 2020; VITALE *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2020; ZHA *et al.*, 2021), entretanto ainda não há na literatura técnica um estudo que apresente a influência de processos de carbonatação em solos tropicais estabilizados com EAEP, sobretudo considerando os ensaios mecânicos aplicáveis aos materiais estruturais de pavimentos asfálticos (módulo de resiliência e índice CBR, por exemplo).

Sob a perspectiva previamente apresentada, o objetivo geral deste estudo foi avaliar a influência de 3 diferentes processos de carbonatação no comportamento mecânico de misturas compostas por solos tropicais e escória de aciaria elétrica primária moída (EAEP), compactadas no teor de umidade ótimo e na energia Proctor Normal. Como objetivos específicos, relacionados ao objetivo geral, citam-se: (i) Determinação dos parâmetros de resistência mecânica [resistência à compressão simples (RCS), índice mini-CBR (*California Bearing Ratio*) e módulo de resiliência (MR)] e de expansibilidade (expansão mini-CBR) das misturas solo-EAEP; (ii) Determinação da frente de carbonatação em diferentes procedimentos de cura; (iii) Determinação das medidas de pH nos diferentes tipos de cura; (iv) Interpretação dos resultados pertinentes às referidas propriedades com base nas características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais das misturas solo-EAEP.

3.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No processo de refino do aço, o carbono presente no ferro é parcialmente oxidado, sendo liberado na forma gasosa (CO e CO₂) junto com algumas impurezas eliminadas na escória, como silício (Si) e fósforo (P) (GUO; BAO; WANG, 2018; IAB, 2018). Apesar da perspectiva de seu aproveitamento, a utilização das escórias de aciaria pode enfrentar obstáculos devido ao seu potencial expansivo. A instabilidade volumétrica pode limitar a aplicabilidade das escórias de aciaria elétrica devido à presença de óxidos livres em sua composição, como o óxido de cálcio (CaO) e o óxido de magnésio (MgO) (SANTAMARIA *et al.*, 2018).

A expansibilidade é um efeito da hidratação desses óxidos se transformando em hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, respectivamente, sendo que o volume dos hidróxidos é aproximadamente o dobro do volume dos óxidos. Apesar disso, essa expansão pode ser solucionada caso a reação já tenha ocorrido anteriormente, em um processo de cura do material quando exposto ao ambiente natural (BRAND *et al.*, 2020; LAM; LE; JARITNGAM, 2018; LI *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2019). No entanto, nem todas as escórias de aço sofrem expansão, e as composições químicas variadas excluem qualquer generalização de sua expansividade (NETINGER *et al.*, 2014; QASRAWI, 2020; SANTAMARÍA *et al.*, 2021).

A Tabela 3.1 apresenta as composições químicas de várias EAEPs estudadas recentemente para reutilização em obras de engenharia civil. Observou-se que o teor de óxido de cálcio nas EAEPs variou entre 20 e 35%.

Tabela 3.1: Composições químicas de EAEPs oriundas de estudos prévios.

Referência	Composição química em massa (%)													
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	PF*	CaO livre
Manso <i>et al.</i> (2006)	15,3	7,4	42,5	23,9	-	-	5,1	4,5	-	-	-	-	-	0,5
Arribas <i>et al.</i> (2015)	17,9	11,6	27,5	25,7	-	0,1	3,8	4,2	-	0,7	0,5	-	-	-
Faleschini <i>et al.</i> (2016)	14,6	10,2	33,3	30,3	-	-	3,0	4,3	-	-	-	-	-	-
Monosi; Ruello e Sani (2016)	14,0	12,0	35,0	26,0	0,1	0,2	5,0	6,0	-	0,4	-	-	-	-
Zumrawi e Babikir (2017)	16,4	2,4	26,0	25,8	-	-	10,0	11,2	-	0,8	-	-	-	2,1
Lam; Jaritngam e Le (2017)	16,3	8,3	34,7	25,9	0,1	0,3	6,9	5,2	-	2,0	0,3	-	-	<0.1%
Santamaria <i>et al.</i> (2018)	16,3	10,5	35,4	26,8	-	-	2,8	5,6	-	-	-	2,6	-	-
Lee <i>et al.</i> (2019)	16,1	12,0	37,3	20,6	-	-	4,4	5,6	-	0,7	-	-	-	-
Zhang <i>et al.</i> (2019)	15,5	4,3	28,2	38,0	0,1	0,2	3,5	3,6	0,7	0,8	1,8	0,5	2,2	-
Pomaro <i>et al.</i> (2019)	14,6	10,2	33,3	30,3	-	-	3,0	4,3	-	-	-	2,7	-	-
Yeih e Chang (2019)	21,4	6,1	18,9	23,4	-	-	8,3	-	0,0	-	-	-	-	-
Ismail; Awad e Mwafy (2019)	14,2	8,1	29,8	38,3	0,0	0,0	4,2	2,8	0,1	0,4	0,3	-	-	-
Traven; Češnovar e Ducman (2019)	17,4	8,4	12,2	22,2	0,2	0,3	16,7	2,2	0,3	0,4	0,1	3,8	15,5	-
Češnovar <i>et al.</i> (2019)	21,1	8,5	11,4	20,9	0,2	0,1	14,9	2,2	-	-	-	3,8	14,2	-
Balaguera e Botero (2020)	12,2	1,6	38,5	25,1	0,4	0,3	7,7	5,9	0,6	0,4	0,6	0,8	-	-
Balaguera e Botero (2020)	13,4	2,7	37,9	30,9	0,3	0,3	2,8	4,1	0,7	0,5	1,4	0,8	-	-
Li <i>et al.</i> (2020)	11,2	7,4	25,9	37,8	-	-	6,2	3,4	-	-	-	-	-	-
Li <i>et al.</i> (2020)	11,9	6,4	28,6	28,8	-	-	3,7	4,9	-	-	-	-	-	-
Li <i>et al.</i> (2020)	10,7	4,5	28,4	35,6	-	-	6,9	4,5	-	-	-	-	-	-
Sosa <i>et al.</i> (2020)	12,0	7,4	37,9	30,3	-	-	4,9	4,5	-	0,5	-	1,2	-	-
Dias <i>et al.</i> (2020)	5,8	0,6	53,0	33,5	0,0	-	-	5,1	-	0,6	1,0	0,2	-	-
Shahsavani; Vakili e Mokhberi (2021)	23,0	4,5	16,5	34,0	-	-	12,4	-	-	-	-	-	9,6	-

*Perda ao fogo

O óxido de cálcio (CaO) promove múltiplas ações que alteram as propriedades de um solo. Inicialmente, a adição de CaO ao solo reduz o teor de umidade do solo devido à sua reação de hidratação [$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{calor}$]. Essa reação eleva o pH e o teor de íons Ca^{2+} da água intersticial do solo em razão da dissociação do hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$]. A partir disso, ocorre a troca catiônica entre os íons adsorvidos presentes na superfície das partículas de argila e os cátions de cálcio fornecidos pelo óxido de cálcio, resultando em uma dupla camada difusa de menor espessura, com menores forças de repulsão, gerando como consequência a floculação da fração argilosa do solo (DENELE *et al.*, 2021).

Simultaneamente, valores elevados de pH induzem lentamente a dissolução de minerais, como sílica, alumina e feldspatos, os quais se combinam com cálcio e água, produzindo compostos cimentícios, como silicato de cálcio hidratado (C-S-H), silico-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) (DE WINDT; DENELEE; MAUBEC, 2014; DENELEE *et al.*, 2021; POMAKHINA *et al.*, 2012; VITALE *et al.*, 2021).

A carbonatação é um fenômeno que ocorre naturalmente em qualquer composto cimentício ou pozolânico quando em contato com o ar. O processo da carbonatação ocorre em duas etapas. Inicialmente, ocorre a dissolução do dióxido de carbono em água, formando o ácido carbônico ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_3$), o qual reage com o hidróxido de cálcio para formar o carbonato de cálcio [$\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaCO}_3$] (DENELEE *et al.*, 2021).

A difusividade do dióxido de carbono em um material sólido depende da abertura da estrutura porosa e, portanto, da presença de água nos poros. Na água, essa difusividade é aproximadamente 10.000 vezes menor que no ar, sendo a carbonatação retardada quando o teor de umidade do material aumenta (DENELEE *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2020). Além disso, a carbonatação é um método eficiente de redução de lixiviação de metais pesados encontrados na escória de aciaria, o que evita a emissão desses metais no meio ambiente (PAN *et al.*, 2013).

Ho *et al.* (2018) estudaram o efeito da carbonatação através de cura em câmara úmida seguida por cura ao ar em uma amostra de areia tratada com cimento. Observou-se que, em comparação com o processo de cura selada em câmara úmida, os corpos de prova submetidos à cura ao ar precedida por 7 dias de cura em câmara úmida apresentaram valores de RCS de quase o dobro para os tempos de cura analisados. Observou-se também uma relação linear do aumento nos valores de RCS com o aumento na quantidade de carbonato de cálcio. Através de aspersão de fenolftaleína, observou-se que a frente de carbonatação avançou com o tempo de exposição ao ar.

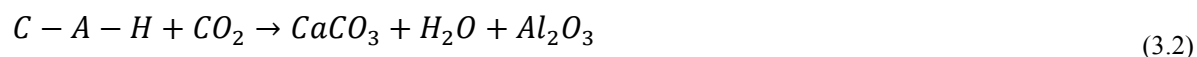
Xu *et al.* (2020), no seu estudo sobre influência da carbonatação acelerada em misturas entre um solo argiloso com propriedades expansivas e cal, observaram que a taxa de carbonatação, medida através da aspersão de fenolftaleína, diminui com o tempo de carbonatação, pois o carbonato de cálcio formado preenche poros do corpo de prova, obstruindo a passagem de ar, o que foi verificado por análises morfológicas. Medições de pH também

foram realizadas, mostrando que, nas regiões carbonatadas, o pH chegava próximo de 6, enquanto que, nas regiões não carbonatadas, o valor de pH era próximo de 12.

Hossen; Gallant e Ashraf (2020) estudaram a influência do teor de finos, do teor de cal e do tempo de carbonatação em uma mistura de areia siltosa com cal. Observou-se, através de resultados de termogravimetria (TGA), que o processo de carbonatação do hidróxido de cálcio promovia um aumento nos valores de RCS. Além disso, os valores de RCS aumentaram com o aumento do teor de finos, do teor de cal e do tempo de carbonatação nas misturas, alcançando 1,0 MPa para as misturas mais resistentes.

Vitale *et al.* (2021) avaliaram o efeito da carbonatação, em corpos de prova submetidos ao processo de cura ao ar, nos comportamentos mecânico [através do ensaio de compressão triaxial CIU (Consolidado Isotropicamente e Não Drenado)] e químico de amostras de solos tratadas com cal. Para fins de comparação, foram confeccionados corpos de prova submetidos a três processos de cura: cura selada em câmara úmida, cura não selada ao ar e cura selada em câmara úmida seguida de cura não selada ao ar. No processo de cura selada em câmara úmida, foi observado um aumento de resistência e rigidez das misturas solo-cal com o tempo, o qual foi significativo apenas após 90 dias de cura, devido à formação de compostos hidratados. No processo de cura ao ar, logo após a confecção dos corpos de prova, foi observado um processo gradual de carbonatação, transformando o hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio, o qual inibiu a formação de compostos hidratados em longo prazo, gerando um aumento de resistência semelhante à cura em câmara úmida até os 28 dias, mas que não evoluiu além dessa idade.

Neste mesmo trabalho, foi também observado que a carbonatação gera uma menor porosidade devido ao crescimento dos cristais de carbonato de cálcio. No processo de cura selada em câmara úmida seguida de cura não selada ao ar, foi observada a formação de compostos hidratados na primeira fase, mas no processo de cura ao ar, esses compostos foram carbonatados, formando carbonato de cálcio, o qual é menos resistente do que os compostos hidratados, promovendo um enfraquecimento da estrutura solo-cal. As reações de carbonatação dos compostos químicos silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) são apresentadas nas Equações (3.1) e (3.2).



Deneele *et al.* (2021) estudaram o efeito da carbonatação em misturas entre solo e cal. Foram estudados três tipos de cura: em câmara de carbonatação acelerada, em câmara úmida e ao ar. Foi observado que o processo de cura em câmara de carbonatação acelerada promoveu um rápido aumento de RCS até os 28 dias de cura, devido à carbonatação do hidróxido de cálcio. De forma semelhante, o processo de cura ao ar promoveu um rápido aumento de RCS até os 7 dias de cura. Após o rápido aumento nos valores de RCS nesses dois processos de cura, não houve mais variações significativas dessa propriedade, sendo que os valores de RCS para o processo de cura em câmara de carbonatação acelerada foram aproximadamente o dobro em comparação com os do processo de cura ao ar, para o mesmo tempo de cura. Para a cura em câmara úmida, foi observado um crescimento lento nos valores de RCS até os 28 dias de idade; após esse tempo, os valores de RCS aumentaram com uma taxa de crescimento maior, chegando a valores próximos do processo de cura em câmara de carbonatação acelerada aos 180 dias, o que mostra que a contribuição mais significativa dos compostos cimentícios ocorre em longo prazo.

Li *et al.* (2021), avaliando uma mistura de solo argiloso, escória de aço e gesso dessulfurizado em até 5 dias de cura, verificaram que há um acréscimo nos valores de RCS com o aumento do tempo de carbonatação das misturas, devido à transformação de hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio, a qual foi observada através de análises morfológicas. Observou-se também que o pH diminuiu e a profundidade de carbonatação aumentou com o aumento do tempo de carbonatação das misturas compactadas.

Assim, devido ao poder de sequestro do dióxido de carbono da EAEP e de como ele é benéfico ao meio ambiente, a necessidade da reutilização da EAEP, dada sua alta reatividade com o CO₂ e seu baixo custo, deve ser estudada de forma aprofundada. Diante do estudo sobre a influência de carbonatação em solos estabilizados, verificou-se a ausência de um estudo que avalie a influência da carbonatação em misturas solo-EAEP, com a finalidade de utilizá-las em

camadas estruturais de pavimentos asfálticos. Justifica-se, portanto, uma avaliação da viabilidade de utilização do resíduo industrial EAEP e sua mistura com solos tropicais após cura por carbonatação.

3.3. Materiais e métodos

3.3.1. Materiais

As amostras de solos, designadas S1 e S2, utilizadas nesta pesquisa foram provenientes de jazidas de empréstimo localizadas no Município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil. As normas técnicas PRO 003 (DNER, 1994a) e NBR 6457 (ABNT, 2016a) foram utilizadas como referência, respectivamente, para a coleta e a preparação das amostras de solos.

Uma empresa atuante no setor de fabricação de tubos metálicos, localizada na Região do Alto Paraopeba, Estado de Minas Gerais, Brasil, forneceu a amostra de escória de aciaria elétrica primária (EAEP). A coleta da amostra da EAEP seguiu as recomendações da norma técnica NBR 10007 (ABNT, 2004).

3.3.2. Caracterizações geotécnica e física

A caracterização geotécnica das amostras de solos foi realizada de acordo com os seguintes ensaios: i) Análise granulométrica conjunta, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016b); ii) Limite de liquidez (LL), segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016c); iii) Limite de plasticidade (LP), segundo a NBR 7180 (ABNT, 2016d); iv) Massa específica dos grãos do solo (ρ_s), segundo a NBR 6458 (ABNT, 2016e); e v) Compactação na energia do Proctor normal, segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016f), para fins de determinação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (w_{ot}) das amostras de solo compactadas. Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Resumo dos resultados da caracterização e classificação das amostras de solo analisadas.

Parâmetro	S1	S2
% argila ($\varphi < 0,002$ mm)	61	5
% silte ($0,002$ mm $< \varphi < 0,06$ mm)	14	24
% areia ($0,06$ mm $< \varphi < 2$ mm)	25	68
% pedregulho (2 mm $< \varphi < 60$ mm)	0	3
LL (%)	78	36
LP (%)	43	18
IP (%)	35	18
ρ_s (g/cm ³)	2,869	2,657
$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	13,95	15,57
w_{ot} (%)	31,03	15,00
TRB	A-7-5 (20)	A-2-6 (1)
USC	MH	SC
MCT	LA'	NA'

Com a finalidade de aumentar a superfície específica da amostra de EAEP, esta foi moída em um equipamento Los Angeles, utilizado para a determinação da abrasão em agregados graúdos, por um período de duas a três horas, sendo utilizada a porção passante na peneira de abertura 0,6 mm (peneira #30), tamanho semelhante ao que foi utilizado em estudos prévios (AKINWUMI, 2014; MAHMUDI; ALTUN; ESKISAR, 2021; MANSO *et al.*, 2013), visando alcançar valor próximo de 0,18 m²/g, o qual foi utilizado para a escória de aciaria no estudo desenvolvido por Sheen; Le e Lam (2021). A redução granulométrica e a preparação da amostra de EAEP foram realizadas conforme as normas técnicas PRO 199 (DNER, 1996b) e NBR 6457 (ABNT, 2016a), respectivamente.

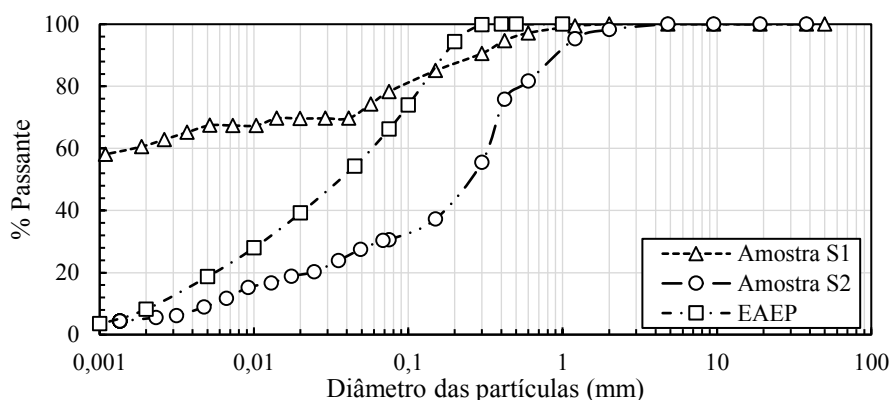
Para que a amostra de EAEP fosse caracterizada fisicamente, foram realizados os seguintes ensaios, adaptados das normas técnicas para cimento Portland: i) finura por peneiramento, de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2012b); ii) superfície específica pelo método de Blaine, conforme a NBR 16372 (ABNT, 2015); iii) massa específica da escória moída, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017); e iv) distribuição granulométrica do material depois de passado na peneira de 0,6 mm, determinada por difração a laser conforme a norma técnica ISO 13320 (ISO, 2020).

A amostra de EAEP moída apresentou índice de finura por peneiramento de 24,88%, o qual é um alto valor para materiais cimentícios no Brasil (LOPES *et al.*, 2021). A superfície específica pelo método de Blaine foi de 0,20 m²/g, valor próximo ao valor requerido para cimento Portland, o qual deve ser superior a 0,24 m²/g (DINIZ *et al.*, 2017). O resultado do

ensaio de massa específica dos sólidos foi de $3,7 \text{ g/cm}^3$. A curva granulométrica da amostra de EAEP moída é apresentada na Figura 3.1.

A Figura 3.1 apresenta as curvas granulométricas das amostras de solos S1 e S2, as quais foram classificadas (Tabela 3.2) segundo a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), de acordo com a CLA 259 (DNER, 1996a), e segundo os sistemas de classificação geotécnica de solos TRB (*Transportation Research Board*), conforme a M 145-91 (AASHTO, 2017), e USC (*Unified Soil Classification*), conforme a D2487 (ASTM, 2017).

Figura 3.1: Curvas granulométricas das amostras de solo S1 e S2 e da amostra de EAEP moída.



As curvas de distribuição granulométrica permitem concluir que a amostra de solo S1 possui um alto teor de partículas de tamanho argila, enquanto que, na amostra de solo S2, predominam as partículas de tamanho areia. Na amostra de EAEP, predominam as partículas de tamanho silte.

3.3.3. Caracterizações química, mineralógica e morfológica

As amostras de solos e de EAEP foram submetidas à análise de Fluorescência de Raios-X (FRX), sendo os resultados apresentados na Tabela 3.3, juntamente com o ensaio de perda ao fogo que foi realizado conforme a NBR NM 18 (ABNT, 2012c).

Tabela 3.3: Composição química obtida por FRX e perda ao fogo das amostras de solos S1 e S2 e da amostra de EAEP moída.

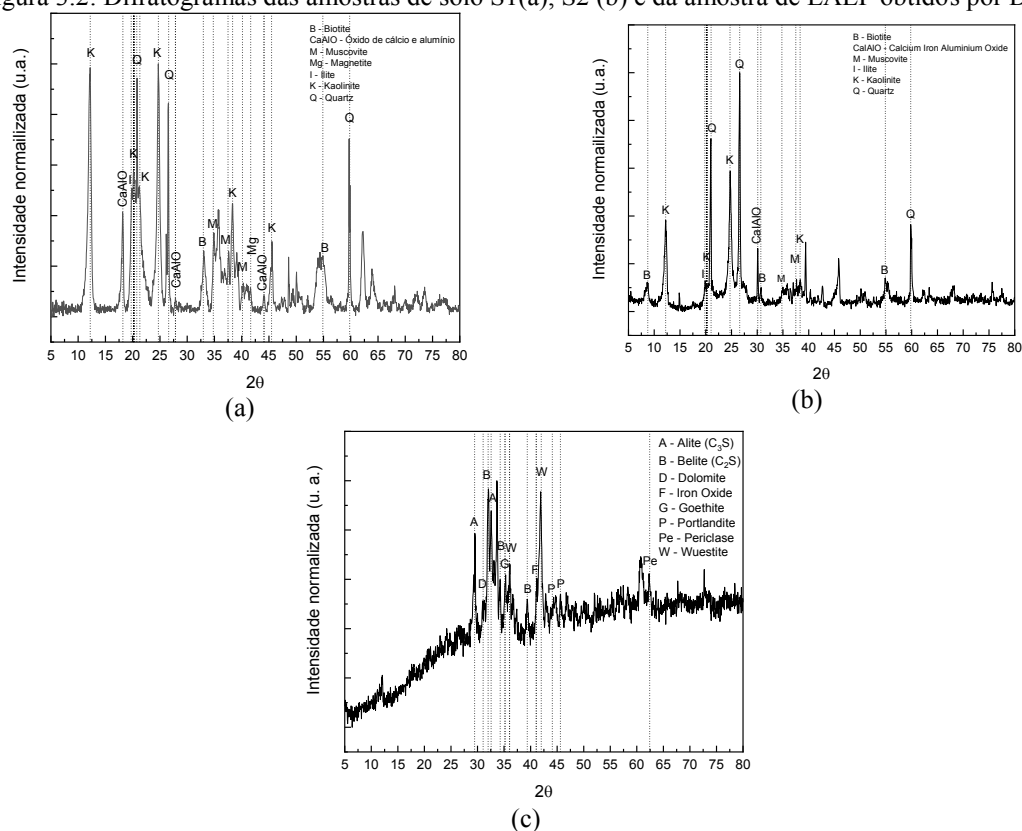
Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	PF* (%)
S1	27,11	24,52	12,47	0,02	1,28	0,07	1,55	1,53	0,04	0,27	11,49
S2	36,27	24,31	1,92	0,17	1,41	1,30	2,40	0,18	0,03	0,22	4,19
EAEP	21,35	5,17	24,50	33,15	1,01	0,30	0,00	0,64	0,18	0,32	0,19

*Perda ao fogo

Observou-se a predominância dos compostos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ para a amostra de solo S1, os quais também foram encontrados na amostra de solo S2. As amostras de solos são caulínicas, como a maioria dos solos brasileiros, portanto seus principais constituintes são a caulinita e o quartzo (LOPES *et al.*, 2019). Conseqüentemente, altos níveis de SiO₂ e Al₂O₃ foram observados. A presença de magnetita na amostra de solo S1 é o principal fator para sua coloração avermelhada (CASTAGNOTTO *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2021; MATHIAN *et al.*, 2020). A caulinita, presente na amostra de solo S2, é um silicato de alumínio hidratado que pode se apresentar sob as cores branco, branco-acinzentado ou levemente colorido (VARGA, 2007). A coloração da amostra de solo S2 é branco-acinzentado com baixa pigmentação amarela, a qual também foi observada em solos argilosos com predominância do argilomineral caulinita estudados por outros autores (AMIRI; NAZIR; DEHGHANBANADAKI, 2018; MORSI *et al.*, 2019).

A técnica de Difração de Raios-X foi utilizada para a determinação das constituições mineralógicas das amostras dos materiais analisados. Para isso, foram realizadas medidas teta-teta na faixa de 5 a 80 graus, utilizando passo de 0,05 graus, com 1 segundo por passo. Os resultados da análise de DRX são apresentados nas Figuras 3.2a, 3.2b e 3.2c para as amostras de solo S1, S2 e EAEP, respectivamente.

Figura 3.2: Difratogramas das amostras de solo S1(a), S2 (b) e da amostra de EAEP obtidos por DRX.



Através do difratograma da amostra de EAEP, observou-se uma ampla gama de minerais constituintes do material. Os picos de alta intensidade de óxido de cálcio (*lime*) e óxido de ferro (*wustite*) confirmaram os resultados da análise por fluorescência de raios-X. A presença de óxido de cálcio e óxido de magnésio pode induzir problemas de expansão volumétrica devido ao processo de carbonatação quando em contato com ambiente aquoso (DENELEE *et al.*, 2021), enquanto que a presença de óxidos de ferro garante elevadas dureza e massa específica para a escória de aciaria elétrica (ARRIBAS *et al.*, 2015).

Os compostos químicos e suas respectivas porcentagens presentes na amostra de EAEP estão em concordância com os encontrados na literatura técnica (BRAND *et al.*, 2020; ISMAIL; AWAD; MWAIFY, 2019; LI *et al.*, 2020; ZIAEE; BEHNIA, 2020). O valor do índice de hidráulidade $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO})$ foi de 1,49, classificando a EAEP como fortemente hidráulica (BORGES MARINHO *et al.*, 2017).

Para a amostra de EAEP, foram também realizados os ensaios de Cal livre, segundo a NBR NM 13 (ABNT, 2012d), e Resíduo insolúvel, de acordo com a NBR NM 15 (ABNT,

2012e), os quais apresentaram os valores de 0,74% e 7,94%, respectivamente. O resultado da cal livre obtido, que se encontra abaixo de 1%, habilita o material para utilização em obras rodoviárias (GRAFFITTI, 2002).

As caracterizações microestruturais das amostras de solos e da amostra de EAEP foram realizadas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons secundários. As imagens microestruturais da amostra de solo S1 mostraram que o solo apresentou granulação fina (Figura 3.3a) com predominância de grãos de diâmetros menores que $2\mu\text{m}$ e com forma lamelar (Figura 3.3b). A amostra de solo S2 apresentou grãos de tamanhos maiores do que 0,1 mm, sendo esses de forma cúbica (Figura 3.4a), e seus finos apresentaram formas lamelares e prismáticas (Figura 3.4b).

A amostra de solo S1 apresenta uma estrutura mais compacta, quando comparada à amostra de solo S2, resultado de sua granulometria mais fina e do efeito da agregação de suas partículas através dos óxidos de ferro e de alumínio (WU *et al.*, 2019). Através das micrografias da amostra de EAEP (Figura 3.5a e Figura 3.5b), observou-se a presença de partículas com textura rugosa, morfologia levemente irregular. Estas características morfológicas, quando em mistura com amostras de solo, podem aumentar o grau de interação entre as partículas presentes no sistema solo-EAEP, proporcionando uma melhoria nas propriedades mecânicas (BORGES MARINHO *et al.*, 2017; LOPES *et al.*, 2021).

Figura 3.3: Micrografias da amostra de solo S1 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.

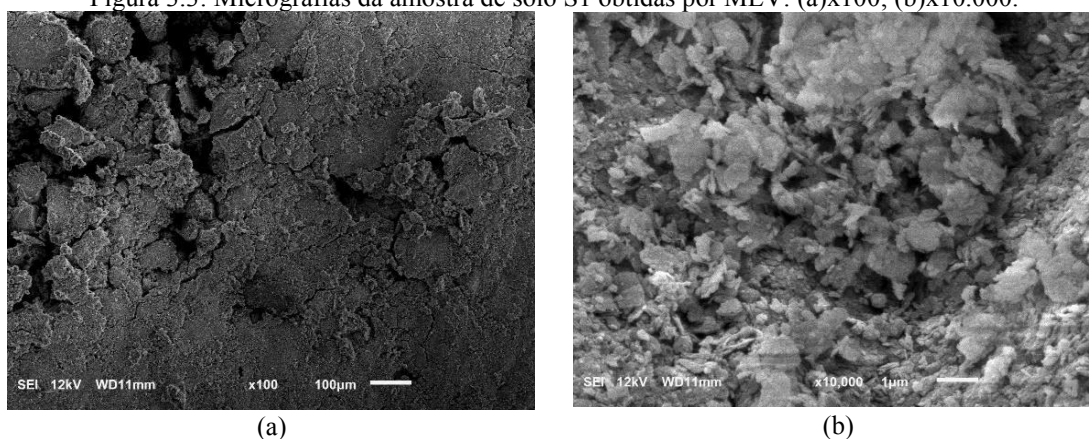


Figura 3.4: Micrografias da amostra de solo S2 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.

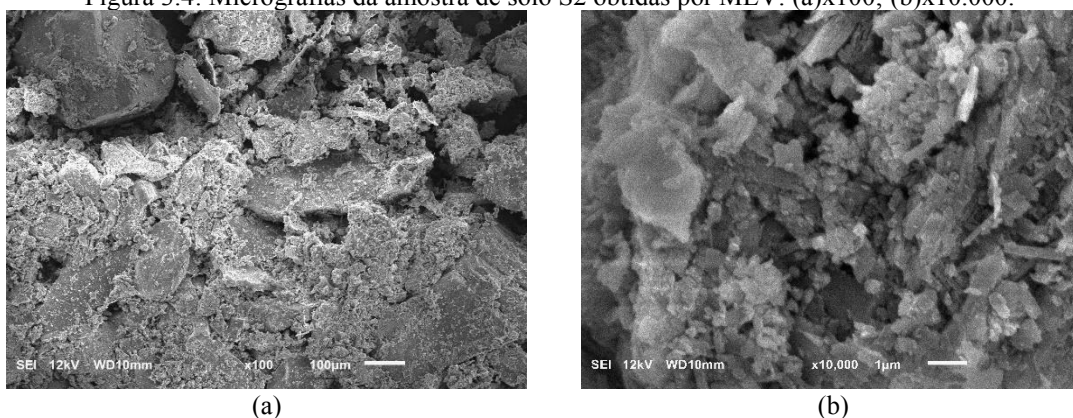
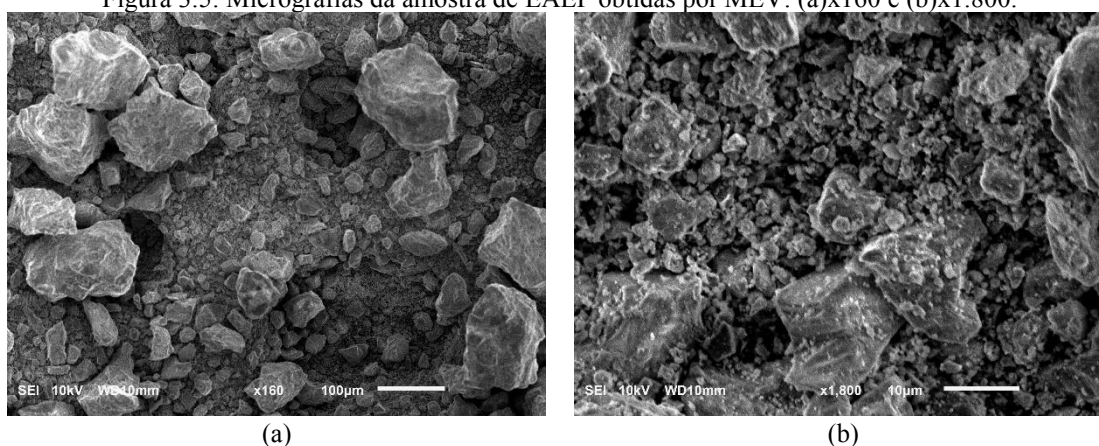


Figura 3.5: Micrografias da amostra de EAEP obtidas por MEV: (a)x160 e (b)x1.800.



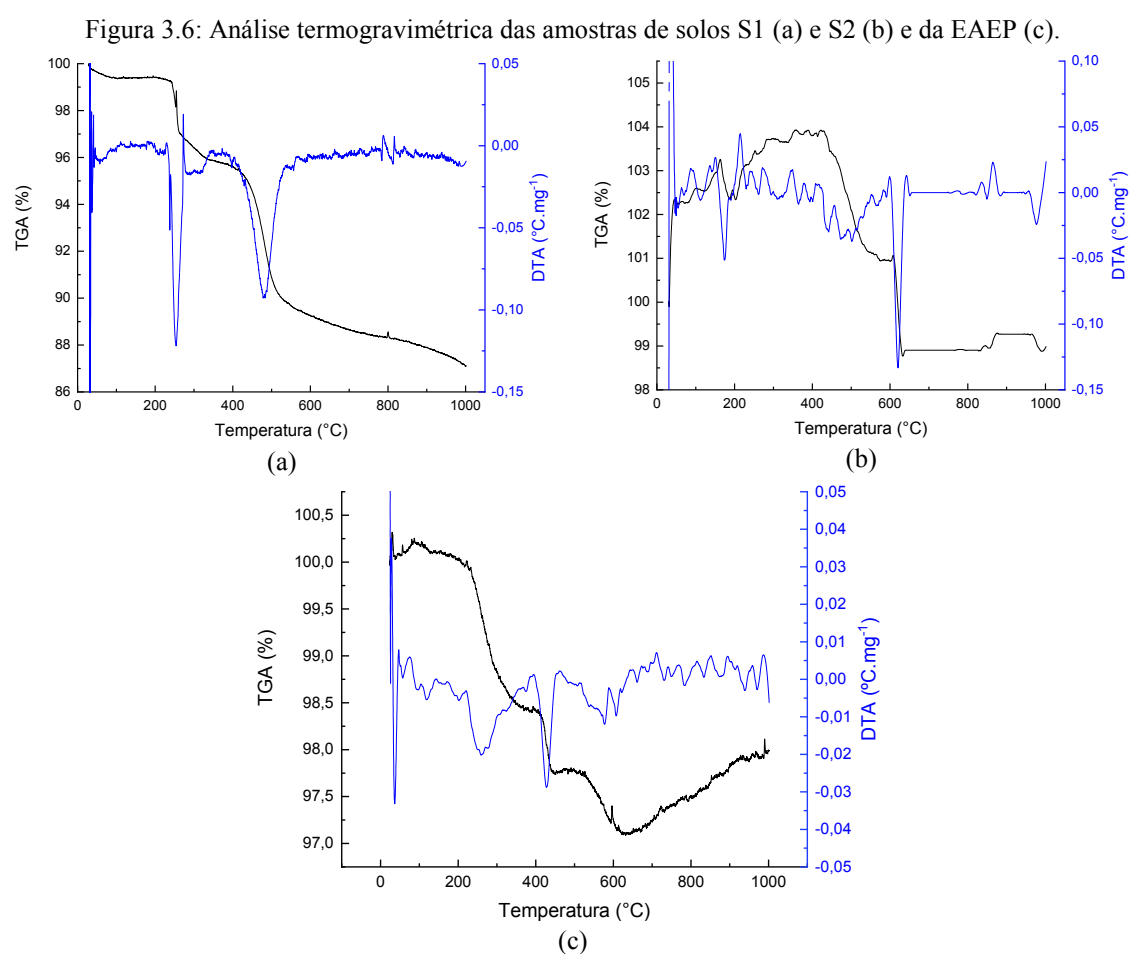
O ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi realizado para se obter os elementos químicos presentes nas amostras de solos S1 e S2 e na amostra de EAEP (Tabela 3.4).

Tabela 3.4: Elementos químicos presentes nas amostras de solo S1 e S2.

Fórmula química	% de massa		
	S1	S2	EAEP
C	9,39	9,94	3,51
O	39,89	41,58	35,17
Al	19,42	20,90	2,79
Si	16,07	23,77	5,80
Fe	15,22	-	-
Mg	-	0,82	2,65
K	-	3,00	0,03
Ca	-	-	29,57
Na	-	-	0,04
P	-	-	0,34
S	-	-	0,15
Mn	-	-	2,92

Os dados obtidos por EDS corroboraram os dados obtidos por FRX e DRX, mostrando que a amostra de solo S1 possui quantidade significativa de Ferro e que a amostra de solo S2 possui uma maior quantidade de Silício. Para a amostra de EAEP, a quantidade de cálcio se destaca, assim como foi apontado nos resultados de FRX e DRX.

A análise termogravimétrica foi executada segundo a NBR 5753 (ABNT, 2016g), a qual é apresentada nas Figuras 3.6a, 3.6b e 3.6c para as amostras de solo S1, S2 e para a amostra de EAEP, respectivamente.



Os registros da análise termogravimétrica são tradicionalmente divididos em quatro faixas de temperatura. As perdas de massa até 200 °C foram atribuídas à perda de água livre e de água adsorvida pelas partículas dos materiais (KUČERÍK *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2011). A faixa de temperatura entre 200 a 450 °C descreve a decomposição de matéria orgânica (PLANTE; FERNÁNDEZ; LEIFELD, 2009; TOKARSKI *et al.*, 2020). Na faixa de

temperatura de 390 a 650 °C, a perda de massa pode ser atribuída à desidroxilação de argilominerais como a Caulinita, embora a decomposição residual da matéria orgânica possa estar presente (ADENIYI *et al.*, 2020; AVET; SCRIVENER, 2020; ELHADJ; PERRIN, 2021; MAKÓ *et al.*, 2009; SERRA *et al.*, 2013; SIEWERT; KUČERÍK, 2015; TOKARSKI *et al.*, 2020).

Diante do exposto, a amostra de solo S1 apresentou dois picos de perda de massa, sendo o primeiro, na temperatura de 250 °C, correspondente à fase de decomposição de matéria orgânica, e o segundo, na temperatura de 480 °C, correspondente à perda de massa decorrente da decomposição e desidroxilação dos argilominerais, o que está em consonância com a elevada porcentagem de fração argila desse material. Para a amostra de solo S2, houve um pico na temperatura de 190 °C, devido à evaporação de água adsorvida, e um pico de alta intensidade na temperatura de 600 °C, devido à decomposição e desidroxilação dos argilominerais.

A perda de massa para a amostra de EAEP na faixa de temperatura de 100°C a 400°C representa a desidratação de C-S-H, C-A-H e Mg(OH)₂, a desidratação de Ca(OH)₂ representa a faixa de temperatura de 400°C a 500°C e a faixa de temperatura de 500°C a 1000°C representa a perda de CO₂ pela descarbonatação do CaCO₃ (BRAND *et al.*, 2020; MAHOUTIAN; GHOLEH; SHAO, 2014). A amostra deste estudo apresentou alterações mais significativas de massa nas duas primeiras regiões, sendo que a decomposição de Ca(OH)₂ corrobora os resultados dos ensaios de FRX e DRX, indicando a presença de compostos à base de cálcio.

3.3.4. Métodos

Utilizou-se neste estudo uma mistura de 80% de solo e 20% de EAEP, em relação à massa seca da mistura, para as amostras de solo S1 e S2. Esta dosagem foi obtida através de um estudo de planejamento experimental em rede simplex-centróide composto por três componentes (solo, EAEP e cinza volante), o qual foi realizado a fim de maximizar as propriedades mecânicas de resistência à compressão simples (RCS), CBR (*California Bearing Ratio*) e módulo de resiliência (MR) das misturas solo-EAEP identificadas como ótimas.

Para se determinar a dosagem que otimizou as propriedades, foram realizadas sete misturas, com as amostras de solo variando de 80 a 95%, a amostra de EAEP variando de 5 a 20% e a amostra de cinza volante variando de 0 a 15%. Os resultados das propriedades

analisadas foram inseridos no *software* Minitab 18, visando à realização da análise dos resultados através de superfícies de resposta e, posteriormente, à realização da otimização através da função desejabilidade, a qual apontou a mistura contendo 80% de solo e 20% de EAEP como sendo a que fornecia os melhores resultados, para ambas amostras de solo, portanto sendo adotada para essa pesquisa.

3.3.4.1. Preparação e moldagem dos corpos de prova

As curvas de compactação das amostras de solos e das misturas solo-EAEP foram determinadas na energia de compactação do Proctor Normal, visando as determinações dos pesos específicos aparentes secos máximos (γ_{dmax}) e dos teores de umidade ótimo (w_{ot}), conforme recomendações da NBR 7182 (ABNT, 2016f).

Para a determinação das propriedades mecânicas RCS, índice mini-CBR e MR, além da expansão mini-CBR de cada amostra de solo e de sua correspondente mistura ótima, foram moldados, no teor de umidade ótimo, três corpos de prova, os quais foram submetidos aos seguintes procedimentos de cura:

- Cura 1: cura convencional, selada em filme de PVC, em câmara úmida por 28 dias, acrescida de 7, 14 e 28 dias de cura não selada em câmara de carbonatação acelerada;
- Cura 2: cura prévia da EAEP em câmara úmida por 7, 14 e 28 dias em câmara de carbonatação acelerada. Posteriormente, foi realizada a compactação dos corpos de prova e, por fim, realizada a cura selada em câmara úmida por 28 dias;
- Cura 3: cura convencional, selada em filme de PVC, em câmara úmida por 35 dias (28 dias + 7 dias), 42 dias (28 dias + 14 dias) e 56 dias (28 dias + 28 dias);
- Cura 4: cura convencional, selada em filme de PVC, em câmara úmida por 28 dias, acrescida de 7, 14 e 28 dias de cura não selada no ambiente natural, sendo os corpos de prova protegidos da chuva.

Foi utilizada uma simbologia do tipo “a-b”, em que a letra “a” representa o processo de cura e a letra “b” representa o tempo de cura total realizado nas análises.

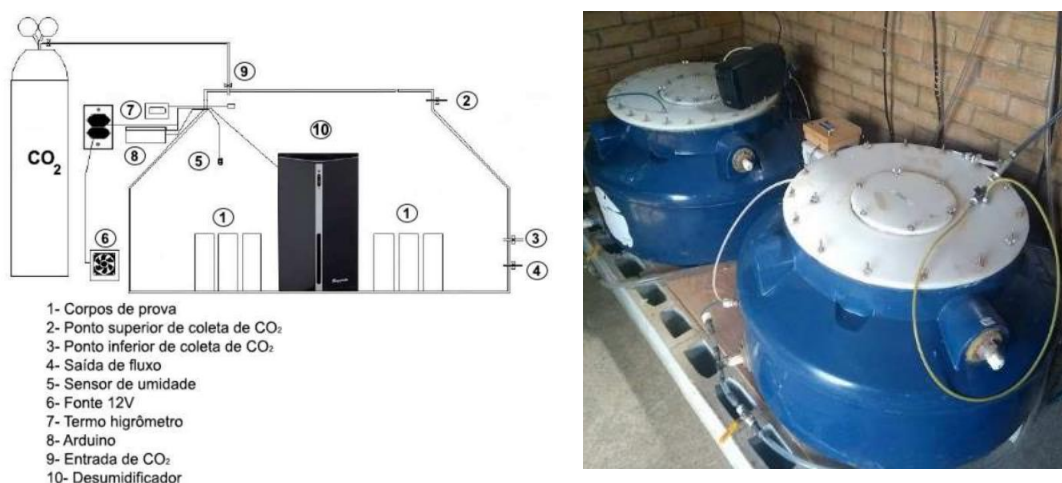
Os corpos de prova produzidos para a determinação da RCS e do MR foram confeccionados em moldes cilíndricos de modo que suas dimensões ao final do processo de compactação possuísem diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, as quais também foram utilizadas por outros autores para pesquisas envolvendo carbonatação (DENELEE *et al.*, 2021; HOSSEN; GALLANT; ASHRAF, 2020; LI *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2020) e estão de acordo com a norma técnica D5102 (ASTM, 2009).

Para o ensaio de determinação do índice mini-CBR e da expansão mini-CBR, os corpos de prova foram moldados em moldes cilíndricos a fim de que ficassem com o diâmetro e a altura de 50 mm, após a compactação, conforme recomendado pela norma técnica ME 254 (DNIT, 1997). A fim de avaliar a influência do tempo de cura nos quatro processos previamente citados, foram adotados tempos de cura de 28 dias em câmara úmida, além de outros 7, 14 ou 28 dias em câmara de carbonatação acelerada, em câmara úmida ou em ambiente natural. Os ensaios para a determinação da RCS, índice mini-CBR, expansão mini-CBR e MR foram realizados em triplicata.

3.3.4.2. Ensaio de carbonatação acelerada

Para a realização da carbonatação acelerada das misturas compactadas submetidas ao processo de cura 1 e da EAEP moída submetida ao processo de cura 2, foi utilizada uma câmara de carbonatação acelerada (Figura 3.7) desenvolvida na pesquisa de Martins *et al.* (2018). Um sistema *Arduino* controlou sensores de umidade e de temperatura, além de possuir um desumidificador. A umidade relativa do ar dentro da câmara variou entre 65% e 80%.

Figura 3.7: Croqui e imagem das câmaras de carbonatação acelerada. Fonte: MARTINS *et al.* (2018).



A saturação de CO₂ dentro do ambiente da câmara foi realizada manualmente, por fluxos intercalados diários, até atingir 100% de concentração de CO₂. Essa metodologia de aplicação de CO₂ foi utilizada por outros autores (CASTELLOTE *et al.*, 2004; KIRCHHEIM; RHEINHEIMER; DAL MOLIN, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2019). A temperatura dentro do ambiente da câmara de carbonatação acelerada variou na faixa de 20 a 25°C.

3.3.4.3. Determinação das propriedades mecânicas e de expansão

3.3.4.3.1. Resistência à compressão simples (RCS)

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado em corpos de prova das amostras de solos em sua condição natural e das misturas ótimas analisadas, de acordo com a norma técnica NBR 12025 (ABNT, 2012f). Após a compactação dos corpos de prova, os mesmos seguiram os procedimentos descritos nos processos de cura já citados.

3.3.4.3.2. Índice mini-CBR e expansão mini-CBR

O ensaio para a determinação dos valores de índice mini-CBR e da expansão mini-CBR das amostras de solos na condição natural e das misturas ótimas analisadas foi realizado segundo a norma técnica ME 254 (DNER, 1997). Após a compactação dos corpos de prova, os mesmos seguiram os procedimentos descritos nos processos de cura já citados, ressaltando-se que, para este ensaio, as curas são realizadas com o corpo de prova dentro do molde, o que altera o processo de carbonatação. Após esse período, os corpos de prova foram imersos em

água por 20 horas para avaliação da expansão. Terminado o período de expansão, os corpos de prova foram retirados da imersão, deixados em repouso por uma hora e 15 minutos, a fim de realizar a dissipação do excesso de poropressão gerado pela imersão, e submetidos ao carregamento na prensa para a determinação do seu índice mini-CBR.

3.3.4.3.3. Módulo de resiliência (MR)

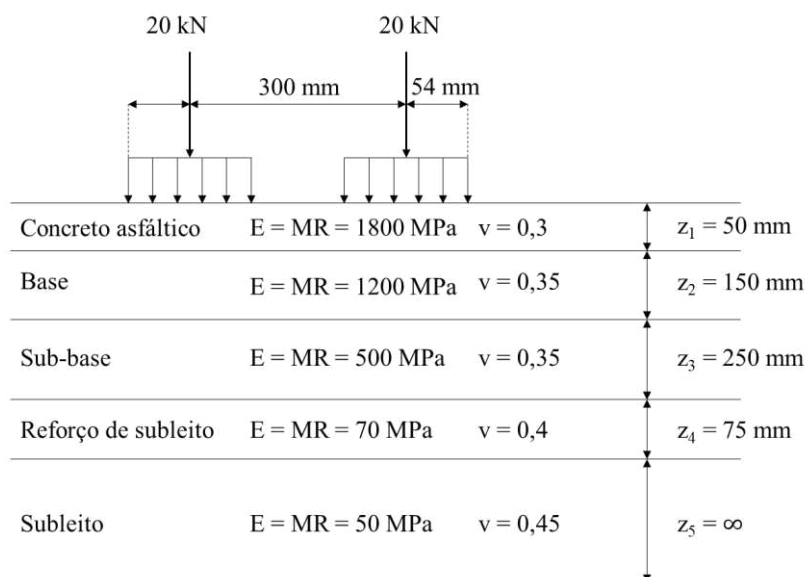
O ensaio de MR foi realizado conforme a norma técnica ME 134 (DNIT, 2018), utilizando os pares de tensões sugeridos para amostras de solos a serem utilizadas na composição de camada de subleito, sendo que o pulso do carregamento teve duração de 0,1 segundo e o período de repouso teve duração de 0,9 segundo, totalizando um ciclo de 1 segundo.

O modelo composto [Equação (3.3)] proposto por Pezo *et al.* (1992) foi utilizado para realizar a regressão dos dados de MR, para as amostras de solo S1 e S2 e para as suas respectivas misturas com EAEP. O modelo composto não depende do conhecimento prévio quanto ao comportamento predominante do material, se granular ou argiloso, sendo capaz de avaliar o valor do MR com maior precisão do que os modelos que dependem apenas de σ_3 ou de σ_d (MEDINA; MOTTA, 2015).

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (3.3)$$

Com o propósito de realizar a comparação entre os valores de MR entre os procedimentos de cura, em um determinado estado de tensões, foi adotado o pavimento asfáltico utilizado por Nega e Nikraz (2017), o qual é representado na Figura 3.8. Os estados de tensões escolhidos foram representativos das camadas de base, sub-base e reforço do subleito, os quais foram determinados no ponto médio de cada camada analisada através do *software* AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), considerando o pavimento de Nega e Nikraz (2017). A consideração para a escolha do ponto médio de cada camada para obtenção dos estados de tensões está de acordo com o critério de ruptura por afundamento por trilhas de rodas (AASHTO, 2020; HUANG, 2004; ISLAM; TAREFDER, 2020).

Figura 3.8: Pavimento utilizado para determinação do estado de tensões em cada camada [adaptado de Nega e Nikraz (2017)].



O carregamento utilizado para o cálculo das tensões foi o eixo padrão rodoviário de 80 kN (8,2 tf) utilizado para projeto de pavimentos asfálticos no Brasil, conforme DNIT (2006), o qual é representado na Figura 3.8 pelo seu semi-eixo. A pressão de inflação dos pneus foi considerada como 560 kPa e o raio da área de contato de 10,79 cm. A aderência entre as camadas não foi considerada, a qual resultaria em transferência de tensões cisalhantes entre as camadas aderidas. O módulo de elasticidade das camadas foi adotado como o MR linear das camadas. As espessuras, as massas específicas aparentes, o MR e o coeficiente de Poisson de cada camada foram inseridos no *software* AEMC para determinação dos estados de tensões no ponto médio de cada uma dessas camadas (Tabela 3.5).

Tabela 3.5: Tensões atuantes devido ao eixo padrão nas camadas estruturais do pavimento de Nega e Nikraz (2017).

Camada estrutural	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)
Base	0,030	0,160
Sub-base	0,010	0,090
Reforço de subleito	0,009	0,037

Utilizando o estado de tensões determinado através do *software* AEMC para cada camada, o valor de MR para cada mistura solo-EAEP, submetida a um determinado processo de cura, em relação à uma camada específica, foi calculado, conforme a Equação (3.3).

3.3.4.4. Determinação da frente de carbonatação

Em todos os quatro processos de cura utilizados, dos três corpos de prova de RCS, um foi selecionado para, após a ruptura, ser cortado ao meio através de um plano axial. A superfície exposta do interior do corpo de prova foi submetida à aspersão de solução de fenolftaleína (1% em etanol). A fenolftaleína ($C_{20}H_{14}O_4$) é um indicador incolor, o qual tem a cor alterada de acordo com o valor do pH (roxo, sob pH maior que 9, e incolor, sob pH abaixo de 9), permitindo revelar uma região não carbonatada e uma região carbonatada nos corpos de prova, respectivamente (DENELEE *et al.*, 2021).

3.3.4.5. Medida dos valores de pH

Um segundo corpo de prova correspondente ao ensaio de RCS foi escolhido para a medição do valor médio de pH, considerando os quatro métodos de cura utilizados. Os corpos de prova escolhidos foram então seccionados em 5 discos de 20mm de altura, sendo o disco central pulverizado e utilizado para a medição do pH através de um pHmetro, similar ao que foi realizado por Xu *et al.* (2020). Foram utilizadas 10 gramas do material e adicionados 50 ml de água destilada, e em seguida o conjunto foi submetido à agitação por 15 minutos e deixado em repouso por 30 minutos. Finalmente, o sobrenadante foi utilizado para a determinação do valor do pH.

3.3.4.6. Análises químicas, mineralógicas e microestruturais

Do disco central dos corpos de prova utilizados na medição do pH, foram também coletadas amostras para a realização das análises de difração de raios-X (DRX), sendo realizadas medidas teta-2teta na faixa de 5 a 80 graus, utilizando passo de 0,05 graus, com 1 segundo por passo. O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios-X, da marca Brucker, modelo D8 DISCOVER.

Para a realização da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram extraídos fragmentos dos corpos de prova, próximos à região central. O equipamento utilizado foi um Microscópio Eletrônico de Varredura, da marca JEOL, modelo JSM-6010LA.

O ensaio de determinação de óxido de cal livre foi realizado nas misturas submetidas aos 4 processos de cura estudados nesta pesquisa, considerando os tempos de cura de 7 e 28 dias

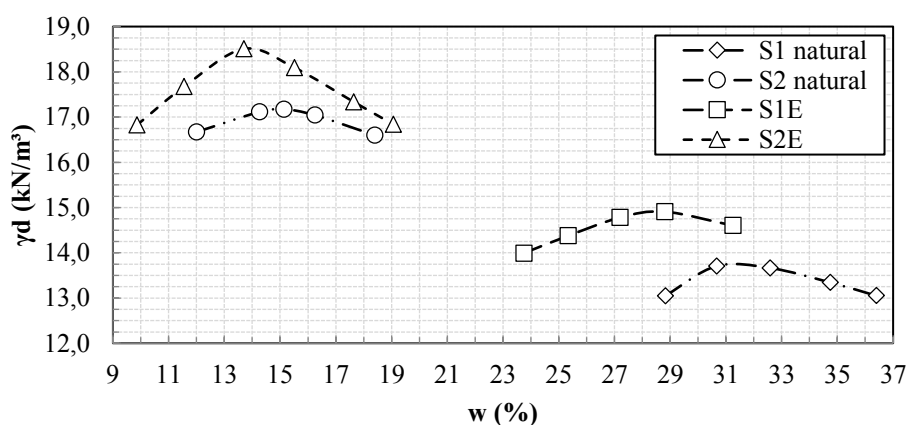
além dos 28 dias em câmara úmida comum a todos os processos. Esse ensaio foi realizado com uma porção de material extraído do disco central do mesmo corpo de prova utilizado para o ensaio de DRX.

3.4. Resultados

3.4.1. Ensaio de compactação

As curvas de compactação das amostras dos solos S1 e S2, bem como das misturas destes com 20% em massa de EAEP (misturas ótimas), são apresentadas na Figura 3.9.

Figura 3.9: Curvas de compactação das amostras de solos (S1 e S2) e de suas misturas com EAEP (S1E e S2E).



Observou-se que a adição de EAEP às amostras de solos gerou um aumento de peso específico aparente seco máximo e diminuição do teor de umidade ótimo. Segundo Zumrawi e Babikir (2017), a diminuição do teor de umidade com a adição de EAEP ocorre devido às trocas catiônicas entre os íons de cálcio provenientes da EAEP e os íons presentes na dupla camada difusa das partículas dos solos. De acordo com Aldeeky e Al Hattamleh (2017), essa redução é devida a uma hidratação prévia dos óxidos de cálcio presentes na EAEP, gerando o composto hidróxido de cálcio, o que implica em menor demanda de água na mistura para alcançar seu peso específico aparente seco máximo.

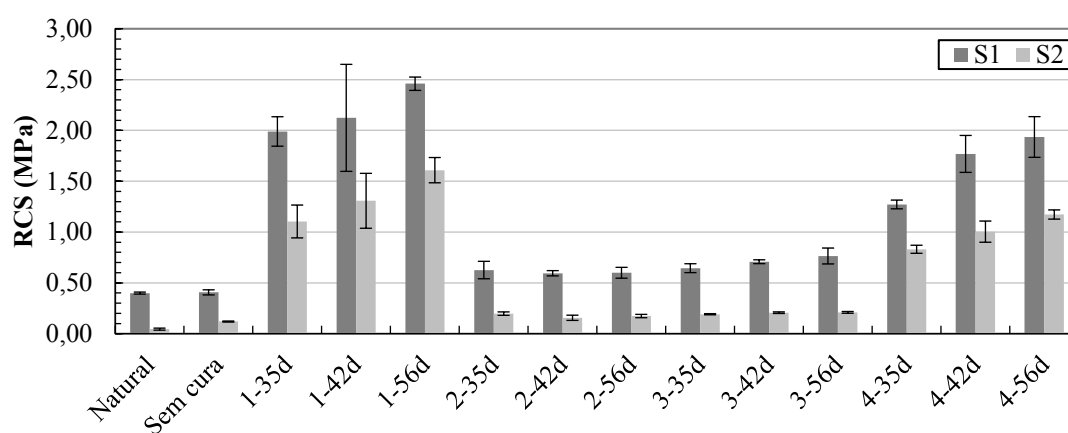
Resultados de aumento do peso específico aparente seco máximo com adição de EAEP também foram encontrados na literatura técnica, devido à maior massa específica real da EAEP que substitui as partículas de solo (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; BRAND *et al.*, 2020; OLUWASOLA *et al.*, 2020; SEBBAR *et al.*, 2020). Em amostras

de solos arenosos, Al-Homidy *et al.* (2017) atribuem o aumento de peso específico aparente seco máximo à melhor graduação proporcionada pela presença de grãos finos presentes da EAEP, que preenchem os vazios deixados pelos grãos maiores do material granular.

3.4.2. Ensaio de resistência à compressão simples

Os resultados dos ensaios de RCS dos quatro processos de cura, para as amostras de solos S1 e S2 e para suas misturas com EAEP, são apresentados na Figura 3.10.

Figura 3.10: Resistência à compressão simples (RCS) das misturas em função do tipo e do tempo de cura.



Observou-se que, para as misturas das amostras de solo S1 e S2, a tendência de comportamento foi bastante semelhante. O processo de cura 1 induziu um aumento de RCS com o tempo, alcançando o valor de 2,46 MPa e 1,61 MPa ao final do processo, para as misturas das amostras de solo S1 e S2, respectivamente. A mesma tendência foi observada nos processos de cura 3 e 4, alcançando os valores de 0,76 MPa e 1,94 MPa, para a mistura da amostra de solo S1, e 0,21 MPa e 1,17 MPa, para a mistura da amostra de solo S2. No processo de cura 2, houve um decréscimo no valor de RCS de 35 para 42 dias, que posteriormente aumentou até os 56 dias. Os corpos de prova das misturas de ambas as amostras de solos que não passaram por nenhum processo de cura apresentaram um aumento muito pequeno quando comparados com as amostras de solos na condição natural.

Os corpos de prova confeccionados sob os processos de cura 1 e 4 foram os que apresentaram os maiores valores de RCS, com destaque para o primeiro. Em ambos os processos de cura, os corpos de prova foram expostos a ambientes com a presença de CO₂,

sendo que, no ambiente do processo de cura 1, a concentração de CO₂ dentro da câmara era de aproximadamente 100%, enquanto que, no ambiente natural, a concentração de CO₂ é de aproximadamente 0,04% segundo Sáez Del Bosque *et al.* (2020).

A alta concentração de CO₂ no ambiente favorece a sua dissolução na água, gerando o ácido carbônico, o qual, em contato com o hidróxido de cálcio, forma o carbonato de cálcio, responsável por promover o preenchimento dos poros e aumentar o peso específico aparente seco, a rigidez e a resistência (DENELEE *et al.*, 2021; JORAT *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2021; PARK *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2020). Os ensaios de MEV e DRX corroboram esses resultados, mostrando que houve hidratação de óxido de cálcio e posteriormente carbonatação do hidróxido de cálcio, que evoluiu com o tempo. Além disso, também pode ter ocorrido a carbonatação de compostos hidratados formados durante os 28 dias de cura anterior em câmara úmida.

O processo de cura convencional em câmara úmida (cura 3) mostrou um aumento menor ao longo do tempo quando comparado ao aumento promovido pelos processos de cura 1 e 4. O aumento no valor de RCS para o processo de cura 3, para as amostras de solo S1 e S2, está relacionado à formação de compostos cimentícios, como os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), sílico-aluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H), os quais geram uma estrutura mais densa do que a estrutura da amostra de solo na sua condição natural (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; AMINI; GHASEMI, 2019; WU *et al.*, 2019), mas precisam de tempo para se desenvolver.

Deneele *et al.* (2021) observaram que misturas de solo-cal submetidas a processos de cura semelhantes aos processos 1 e 3 alcançaram valores de RCS muito próximos, sendo que as misturas carbonatadas alcançaram o valor máximo em 56 dias e as misturas submetidas à cura em câmara úmida alcançaram valor semelhante somente aos 180 dias de cura. Adicionalmente, a formação de etringita, verificada nas análises morfológicas, pode ter minimizado o aumento de resistência gerado pela formação dos compostos cimentícios, pois ela reduz a resistência e aumenta a expansão (GU *et al.*, 2022; JEBLI *et al.*, 2021; KAWABATA *et al.*, 2021; PAUL *et al.*, 2022; THIEBAUT *et al.*, 2018).

Os resultados de RCS para o processo de cura 2 foram semelhantes aos resultados obtidos pelo processo de cura 3. A carbonatação prévia da amostra de EAEP reduziu consideravelmente

a quantidade de hidróxido de cálcio e de óxido de cálcio livre, aumentando sua estabilidade (SONG *et al.*, 2021) e, portanto, diminuindo o potencial de formação de compostos cimentícios.

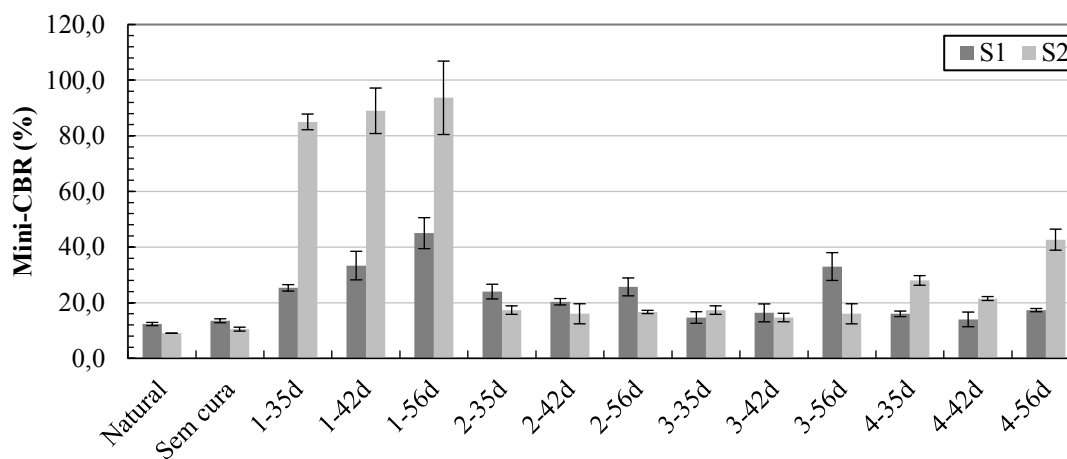
Adicionalmente, as amostras de EAEP submetidas à cura em câmara de carbonatação acelerada estavam com teores de umidade abaixo de 1%. Não houve, portanto, a possibilidade de uma intensa hidratação de óxido de cálcio e de dissolução do CO₂ para a formação do ácido carbônico, componentes necessários para a ocorrência de carbonatação, a não ser por esse baixo valor de umidade e da umidade absorvida do ambiente da câmara de carbonatação acelerada.

Aliado a isso, os dados obtidos pelas análises de MEV e DRX mostraram que os compostos químicos ao final dos processos de cura 2 e 3 foram bastante semelhantes, confirmando a semelhança na ordem de grandeza dos resultados de RCS, diferindo apenas pela presença de partículas de EAEP com superfície carbonatada no processo de cura 2.

3.4.3. Ensaio de índice mini-CBR e expansão mini-CBR

Os resultados do índice mini-CBR, em função do tipo e do tempo de cura para as misturas das amostras de solo S1 e S2, são apresentados na Figura 3.11.

Figura 3.11: Índice mini-CBR das misturas em função do tipo e do tempo de cura.



Observou-se que o processo de cura 1 apresentou um aumento no valor do índice mini-CBR com o tempo para as misturas das amostras de solo S1 e S2, alcançando 45% e 94%, respectivamente. Para os outros processos de cura, houve uma diminuição no valor do índice mini-CBR até os 42 dias e depois um aumento até os 56 dias, exceto para o processo de cura 3

na mistura com a amostra de solo S1, que apresentou a tendência de aumento dessa propriedade com o tempo de cura. As misturas que não passaram por nenhum processo de cura apresentaram uma variação muito pequena no valor de índice mini-CBR quando comparadas às amostras de solo na sua condição natural, apresentando o mesmo comportamento para a propriedade de RCS.

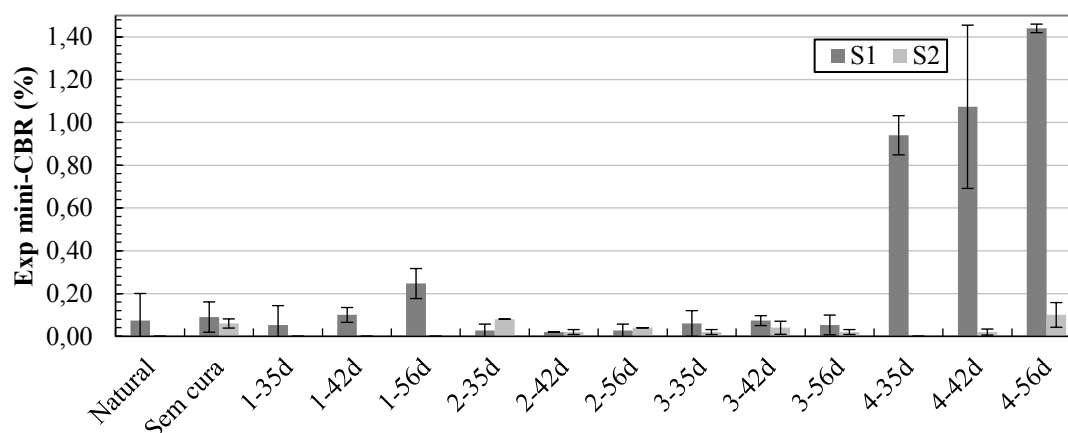
Nos processos de cura 1 e 4, para as misturas contendo as amostras de solo S1 e S2, os ensaios de MEV e DRX mostraram que houve carbonatação de hidróxidos de cálcio, gerando carbonato de cálcio, o qual é o principal responsável pelo aumento nos valores do índice mini-CBR, quando comparadas às amostras de solos na condição natural. Os ensaios de MEV e DRX das misturas das amostras de solos mostraram que a carbonatação no processo de cura 4 ocorreu mais lentamente com o tempo devido à baixa concentração de CO₂ no ambiente natural, e, portanto, que o ganho de resistência exige um período de tempo maior para ocorrer.

Bhengu e Allopi (2017), Ikeagwuani; Obeta e Agunwamba (2019), Correia *et al.* (2020) e Hamza; Zumrawi e Mohamed (2021) reportaram o aumento dos valores de índice CBR com o aumento do tempo de cura em câmara úmida, devido à formação de estruturas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sílico-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H). Apesar de o ensaio realizado neste estudo ser executado com cilindros de dimensões menores, a metodologia do ensaio é semelhante. A mesma tendência apontada pelos autores citados foi observada para as misturas das amostras de solo S1 e S2.

Para as misturas das amostras de solo S1 e S2, o processo de cura 2 apresentou resultados de índice mini-CBR semelhantes aos do processo de cura 3. Essa semelhança na ordem de grandeza dos valores também foi observada na RCS.

Os resultados da expansão mini-CBR, em função do tipo e do tempo de cura para as misturas das amostras de solo S1 e S2, são apresentados na Figura 3.12.

Figura 3.12: Expansão mini-CBR das misturas em função do tipo e do tempo de cura.



Os valores de expansão mini-CBR da mistura da amostra de solo S1 no processo de cura 1 aumentaram com o tempo. Esse aumento ocorreu possivelmente devido à formação de hidróxido de cálcio, sendo relatado que a expansão volumétrica do óxido de cálcio é de cerca de 90% (BRAND *et al.*, 2020; LAM; LE; JARITNGAM, 2018; LI *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2019). Alguns autores também apontaram para uma expansão volumétrica, decorrente da formação de carbonato de cálcio, de aproximadamente 11,7% (CUI *et al.*, 2015; MORANDEAU; THIÉRY; DANGLA, 2014; XU *et al.*, 2020). Segundo Xu *et al.* (2020), no processo de carbonatação do hidróxido de cálcio, o potencial expansivo de solos argilosos é recuperado, o que está de acordo com os dados obtidos, pois apenas as misturas contendo a amostra de solo S1 sofreram aumento na expansibilidade devido ao processo de carbonatação, seja em câmara de carbonatação acelerada (processo de cura 1) ou no ambiente natural (processo de cura 4).

Uma possível explicação da alta expansibilidade observada na mistura da amostra de solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 4, foi de que a carbonatação nesse processo demorou para ocorrer e, portanto, não há a mesma quantidade de carbonatos formados através do processo de cura 1. Conseqüentemente, a estrutura da mistura submetida ao processo de cura 4 se encontrou com maior porosidade e mais propensa à expansibilidade.

Os valores de expansão mini-CBR para os processos de cura 2 e 3 apresentaram uma variação muito baixa, havendo diminuição para a mistura da amostra de solo S1. Parsaei *et al.*

(2021), em seu estudo sobre misturas entre amostras de solos argilosos e EAEP, relataram que a diminuição da expansão com a adição da EAEP é devida à ocorrência da troca catiônica entre os íons presentes nos dois materiais, que gera floculação das partículas, alterando sua estrutura. Para a mistura da amostra de solo S2, submetida aos processos de cura 2 e 3, houve um aumento nos valores da expansão mini-CBR, embora sejam considerados valores muito baixos (<0,1%).

3.4.4. Ensaios de módulo de resiliência

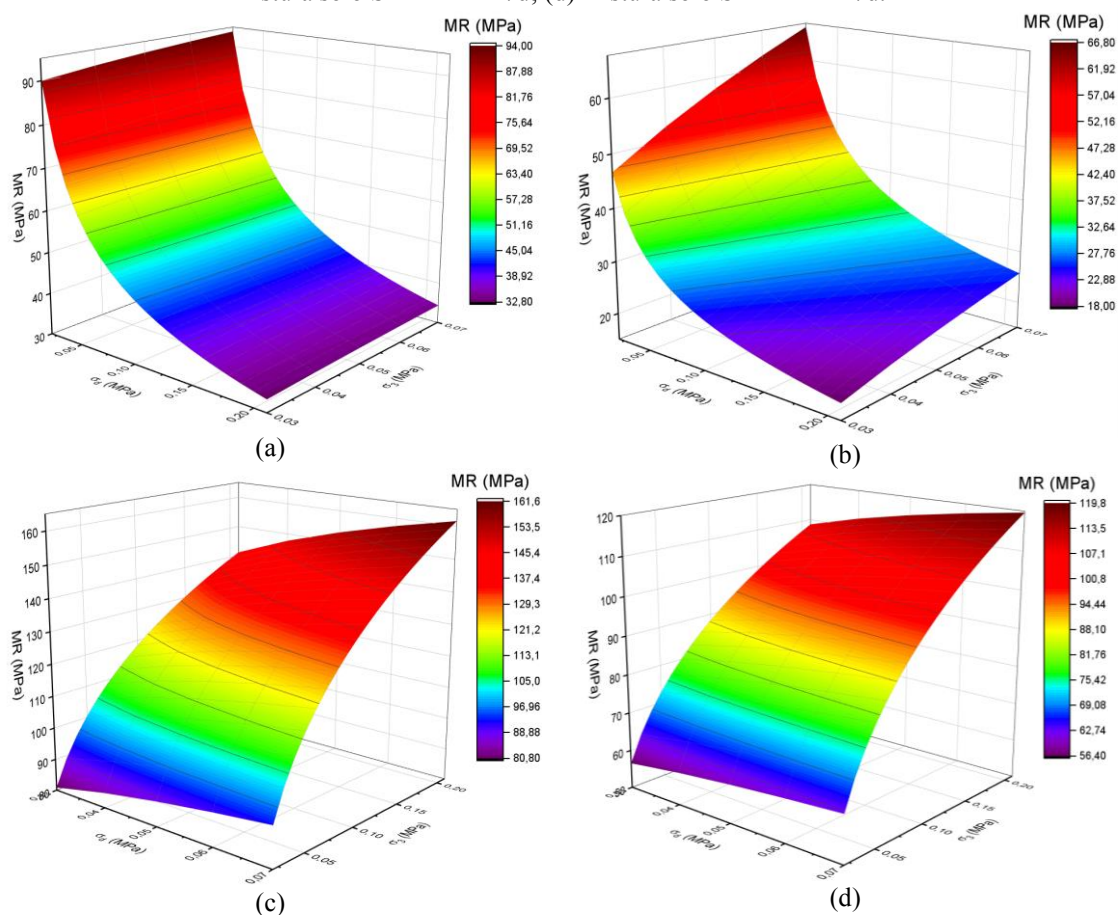
Os coeficientes da regressão não-linear múltipla que caracterizaram o modelo composto e o coeficiente de determinação (R^2) para as misturas solo-EAEP com relação aos diferentes processos de cura analisados, bem como das amostras de solo na condição natural, são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Coeficientes de regressão e coeficientes de determinação do modelo composto para as misturas solo-resíduos analisadas.

Cura	Amostra de solo S1				Amostra de solo S2			
	k1	k2	k3	R ²	k1	k2	k3	R ²
Natural	20,128	0,050	-0,427	0,971	42,214	0,423	-0,405	0,959
Sem cura	15,103	0,025	-0,519	0,894	67,125	0,403	-0,273	0,827
1-35d	357,441	0,160	0,237	0,712	249,629	0,113	0,278	0,588
1-42d	445,338	0,171	0,278	0,748	455,029	0,137	0,383	0,734
1-56d	570,144	0,341	0,089	0,752	108,577	0,169	-0,265	0,633
2-35d	136,892	0,085	0,061	0,508	32,079	0,234	-0,383	0,540
2-42d	68,945	0,036	-0,121	0,644	42,625	0,277	-0,321	0,646
2-56d	93,363	0,113	-0,192	0,662	50,459	0,249	-0,204	0,531
3-35d	116,118	0,038	0,051	0,462	49,556	0,232	-0,136	0,411
3-42d	103,388	0,094	0,074	0,891	48,904	0,234	-0,196	0,596
3-56d	145,344	0,220	-0,047	0,577	35,614	0,257	-0,424	0,703
4-35d	728,697	0,325	0,270	0,934	460,303	0,191	0,238	0,904
4-42d	1190,959	0,279	0,539	0,877	315,396	0,306	-0,120	0,607
4-56d	500,961	0,258	0,162	0,819	398,060	0,228	0,168	0,906

De forma a ilustrar os modelos matemáticos apresentados, as Figuras 3.13a, 3.13b, 3.13c e 3.13d apresentam os gráficos da variação do MR com as tensões confinante e desvio para as amostras de solo S1 e S2, na condição natural, e para as misturas solo S1-EAEP e solo S2-EAEP submetidas ao processo de cura 1, aos 35 dias de cura.

Figura 3.13: Gráficos do modelo composto para: (a) amostra de solo S1; (b) amostra de solo S2; (c) mistura solo S1-EAEP 1-7d; (d) mistura solo S2-EAEP 1-7d.



De posse das tensões calculadas para as camadas estruturais referentes ao pavimento asfáltico extraído do estudo de Nega e Nikraz (2017), apresentadas na Tabela 3.5, e dos modelos matemáticos obtidos pelos ensaios de MR para as misturas solo-EAEP analisadas sob os 4 diferentes processos de cura, foram determinados os valores de MR de cada condição, considerando as tensões atuantes no ponto médio das camadas de reforço de subleito (Figura 3.14), sub-base (Figura 3.15) e base (Figura 3.16).

Figura 3.14: Resultados de MR para a camada de reforço de subleito.

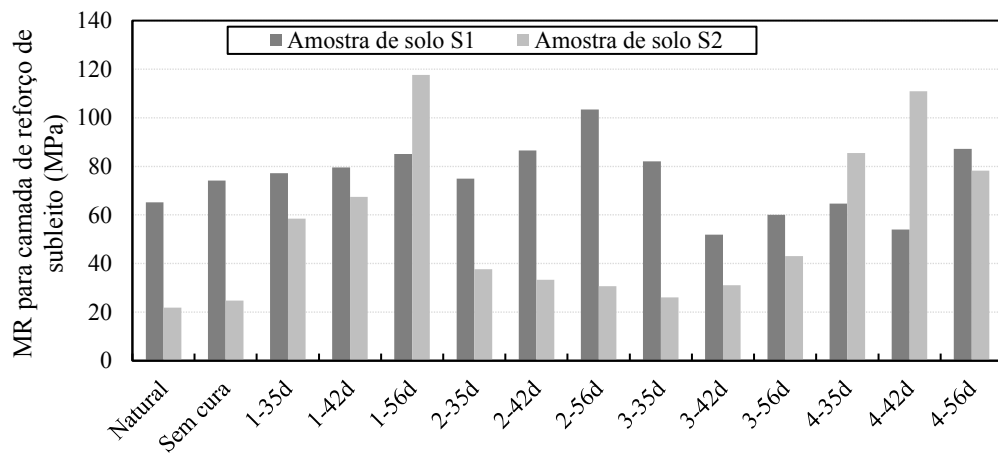


Figura 3.15: Resultados de MR para a camada de sub-base.

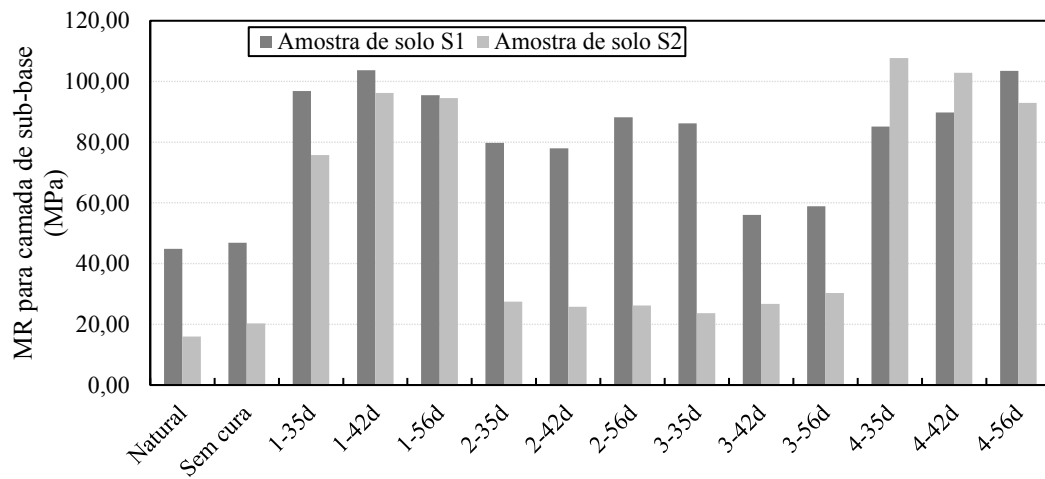
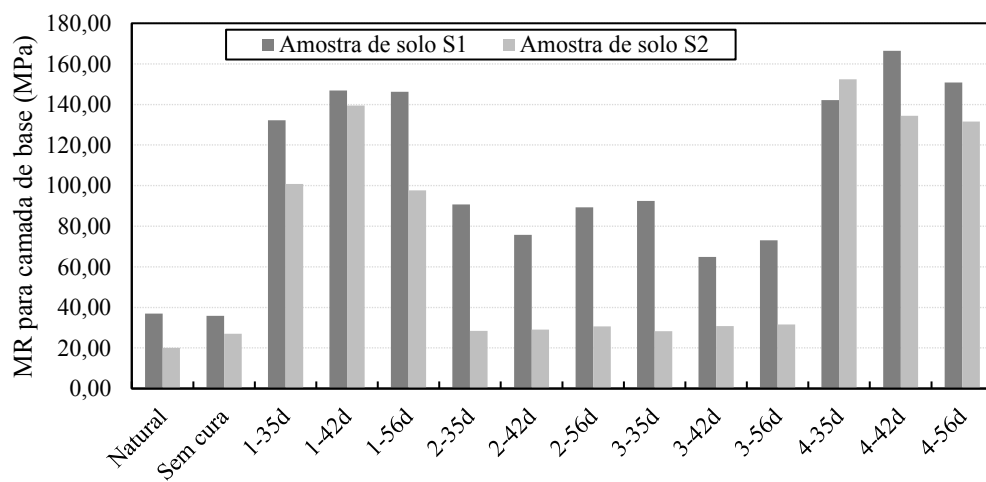


Figura 3.16: Resultados de MR para a camada de base.



Observou-se que, em todos os processos de cura e considerando as três camadas do pavimento estudado, o valor do MR das misturas foi maior quando comparado ao das amostras de solo S1 e S2 em seu estado natural, exceto para as misturas solo S1-EAEP submetida aos processos de cura 3 e 4.

Para as duas amostras de solo S1 e S2, observou-se que o processo de cura 1 e o processo de cura 4 foram os que apresentaram os maiores valores, exceto para a mistura solo S1-EAEP, considerando a camada de reforço de subleito. Esse aumento nos valores de MR está relacionado principalmente com a formação de carbonato de cálcio, que é responsável por promover o preenchimento dos poros, aumentando a resistência e a rigidez da mistura (DENELE *et al.*, 2021; JORAT *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2021; PARK *et al.*, 2020; VITALE *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2020), e de forma secundária com a formação de compostos cimentícios (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; AMINI; GHASEMI, 2019; WU *et al.*, 2019).

As misturas solo S1-EAEP submetidas ao processo de cura 2 apresentaram valores de MR elevados para a camada de reforço de subleito, apresentando a tendência de diminuição à medida que aumentaram as tensões para cálculo do MR, conforme observado através das outras análises para as camadas de sub-base e base. Esse comportamento pode estar relacionado a um melhor intertravamento entre as partículas da amostra de solo S1 e as partículas carbonatadas de EAEP em baixas tensões. À medida que houve o aumento no estado de tensões, esse intertravamento possivelmente se desfez, devido à baixa carbonatação ocorrida na amostra de EAEP, a qual contava apenas com cerca de 1% de teor de umidade e da umidade relativa do ar para ocorrer.

Para as misturas solo S2-EAEP submetidas ao processo de cura 2, observou-se que não houve ganho significativo de rigidez em relação à amostra de solo natural e à mistura sem cura, não havendo esse intertravamento, o que possivelmente está relacionado à diferença de granulometria entre as amostras de solos. O ganho de rigidez devido a esse processo de cura está relacionado com a formação de compostos cimentícios observados nas análises de microscopia, mas que em contrapartida é minimizado pela formação de etringita.

As misturas solo-EAEP submetidas ao processo de cura 3 também mostraram o mesmo comportamento que o processo de cura 2, sendo que maiores aumentos nos valores de MR

foram encontrados para as misturas com a amostra de solo S1, o que possivelmente está relacionado com a maior porcentagem de partículas de argila, as quais são as responsáveis por trocas catiônicas e pela liberação de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), responsáveis pela formação dos compostos cimentícios. O aumento nos valores de MR estão de acordo com a formação desses compostos, mostrados nas análises microestruturais, o que também é minimizado pela geração de etringita.

Assim como observado nas análises de RCS e mini-CBR, os corpos de prova das misturas de ambas as amostras de solo que não passaram por processos de cura apresentaram um aumento muito pequeno no MR, o que indicou que não houve melhoria através da alteração da granulometria das amostras de solo apenas com a inserção da EAEP.

Bhuvaneshwari; Robinson e Gandhi (2019) estudaram o efeito da cal empregada na estabilização de uma amostra de solo sobre o módulo de resiliência e atribuíram um aumento no valor dessa propriedade às trocas catiônicas entre os íons Ca^{2+} e as partículas de argila presentes no solo para idades de até 3 dias de cura selada em câmara úmida, enquanto que o aumento de MR em longo prazo foi atribuído à formação de compostos pozolânicos, semelhante ao processo de cura 3 deste trabalho.

3.4.5. Determinação da frente de carbonatação

A evolução da profundidade de carbonatação com o tempo para as misturas das amostras de solo S1 e S2, sob a condição de cura 1, é apresentada nas Figura 3.17 e Figura 3.18, respectivamente.

Figura 3.17: Frente de carbonatação para a mistura com solo S1 sob condição de cura 1: (a) momento da troca entre as câmaras; (b) aos 35 dias de cura.



Figura 3.18: Frente de carbonatação para a mistura com solo S2 sob condição de cura 1: (a) momento da troca entre as câmaras; (b) aos 35 dias de cura.



Observou-se que, no momento entre a troca dos corpos de prova da câmara úmida para a câmara de carbonatação, os corpos de prova das misturas das amostras de solo S1 e S2 não apresentaram sinal de carbonatação, pois as superfícies dos corpos de prova se apresentaram na cor roxo, ou seja, com pH acima de 9. Aos 35 dias de cura na câmara de carbonatação, foi observado que, nas misturas das amostras de solo S1 e S2, os corpos de prova estavam completamente carbonatados (incolor). Esses resultados estão de acordo com os resultados encontrados na literatura técnica (DENELE *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2020).

Os corpos de prova referentes aos processos de cura 2 e 3 não foram apresentados, pois não houve indícios de carbonatação dos mesmos, sendo que as superfícies destes possuíam a mesma coloração dos corpos de prova apresentados na Figura 3.17a e na Figura 3.18a, respectivamente, para as misturas com as amostras de solo S1 e S2.

As evoluções da profundidade de carbonatação com o tempo, para as misturas das amostras de solo S1 e S2 sob a condição de cura 4, são apresentadas nas Figuras 3.19 e 3.20, respectivamente.

Figura 3.19: Frente de carbonatação para a mistura com solo S1 sob condição de cura 4: (a) aos 35 dias de cura; (b) aos 42 dias de cura; (c) aos 56 dias de cura.

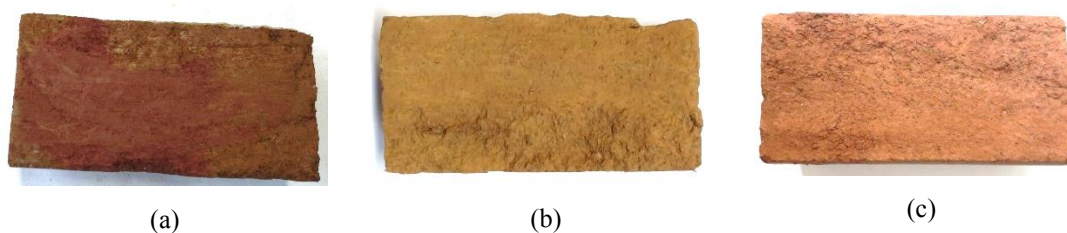
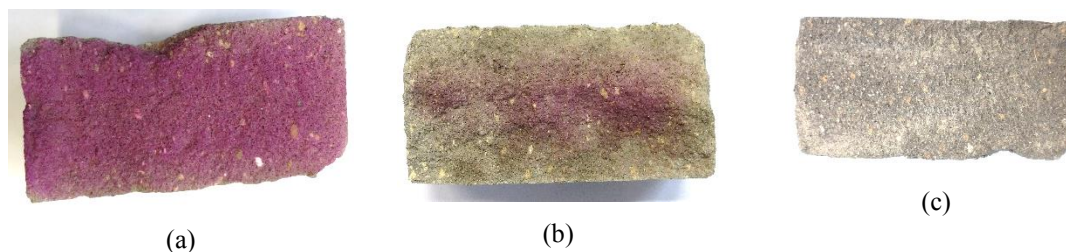


Figura 3.20: Frente de carbonatação para a mistura com solo S2 sob condição de cura 4: (a) aos 35 dias de cura; (b) aos 42 dias de cura; (c) aos 56 dias de cura.

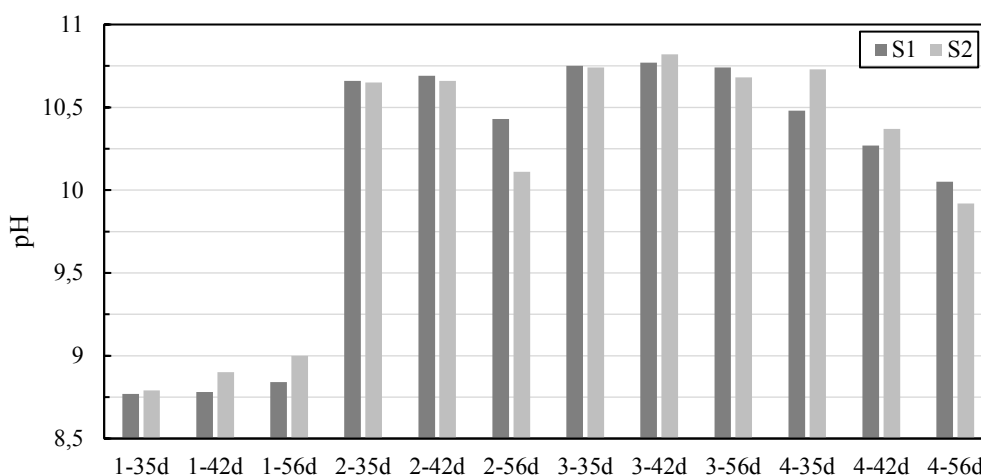


A carbonatação nos corpos de prova submetidos ao processo de cura 4 ocorreu gradualmente e com uma taxa mais lenta que a carbonatação verificada no processo de cura 1, sendo que a frente de carbonatação avançou com o tempo para as misturas analisadas. Para a mistura solo S1-EAEP, a carbonatação de todo o corpo de prova ocorreu entre 35 e 42 dias, e para a mistura solo S2-EAEP, ocorreu entre 42 e 56 dias, sendo possível ver claramente a profundidade de carbonatação no corpo de prova com 42 dias de cura. A maior velocidade de carbonatação observada no processo de cura 1, quando comparada ao processo de cura 4, esteve de acordo com a literatura técnica, pois a taxa de carbonatação depende da facilidade da difusão de CO_2 no material, que está intimamente relacionada com a concentração de CO_2 no ambiente (DENELE *et al.*, 2021).

3.4.6. Determinação dos valores de pH

As medidas dos valores de pH, em função do tipo e do tempo de cura para as misturas das amostras de solo S1 e S2, são apresentadas na Figura 3.21.

Figura 3.21: Valores de pH das misturas em função do tipo e do tempo de cura.



Os corpos de prova submetidos ao processo de cura 1 apresentaram valores de pH abaixo de 9, o que comprova a superfície incolor obtida através da aspersão de fenolftaleína, ou seja, esses corpos de prova se apresentaram completamente carbonatados. Resultados similares foram obtidos por outros autores que atribuíram esses baixos valores de pH à transformação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e de C-S-H em CaCO_3 (LI *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2020).

Os corpos de prova das misturas solo S1-EAEP e solo S2-EAEP, submetidos ao processo de cura 3, apresentaram uma leve diminuição nos valores de pH com o tempo. A mesma constatação, em mistura solo-cal, foi observada por Zhang *et al.* (2020), que atribuíram esse comportamento às reações que ocorrem entre os íons hidróxidos (OH^-) e os minerais do solo para formar novos minerais, como o aluminato de cálcio hidratado (C-A-H).

No processo de cura 2, houve diminuição do pH aos 56 dias de cura, a qual possivelmente ocorreu devido à dissolução do carbonato de cálcio formado pela carbonatação prévia da amostra de EAEP, gerando ácido carbônico, o qual é responsável por diminuir o pH (PETRÓ; PIVEL; COIMBRA, 2016).

O processo de cura 4 favoreceu a diminuição do pH ao longo do tempo, mas de forma mais lenta que o processo de cura 1, assim como observado na aspersão de fenolftaleína, pois a cura é realizada em contato com a concentração de CO_2 no ambiente natural que, segundo Sáez Del Bosque *et al.* (2020), é de aproximadamente 0,04%. Deneele *et al.* (2021) observaram, em misturas solo-cal, os mesmos resultados obtidos entre os processos de cura 1 e 4.

3.4.7. Análises químicas, mineralógicas e microestruturais

As micrografias para as misturas da amostra de solo S1-EAEP e da amostra de solo S2-EAEP, submetidas ao processo de cura 1, são apresentadas nas Figuras 3.22 e 3.23, respectivamente. Observou-se o desenvolvimento de cristais de CaCO_3 , em grande quantidade, revestindo as partículas das misturas. Os cristais de CaCO_3 melhoraram a estabilidade do esqueleto sólido devido ao preenchimento dos vazios entre as partículas da mistura, além de fornecer um aumento no peso específico aparente seco, na rigidez e na resistência (DENELE *et al.*, 2021; HAAS; RITTER, 2019; JORAT *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2021; PARK *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2020).

Além do desenvolvimento de carbonato de cálcio, houve também o desenvolvimento de estruturas de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e/ou aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H) possivelmente formados devido às reações químicas entre o óxido de cálcio presente na EAEP e os componentes sílica e alumina presentes nas amostras de solo S1 e S2 durante a cura de 28 dias em câmara úmida. Os compostos cimentícios C-S-H e C-A-H recobrem a superfície das partículas das misturas, preenchendo os poros e fortalecendo a aglomeração entre as partículas, aumentando assim a resistência do material (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; AMINI; GHASEMI, 2019; WU *et al.*, 2019). Essas constatações confirmam os resultados encontrados através das análises de RCS, índice mini-CBR e MR.

Os compostos cimentícios C-S-H e C-A-H foram identificados somente aos 7 dias de cura em câmara de carbonatação acelerada. Aos 28 dias de cura, houve predomínio de carbonato de cálcio, mostrando que os compostos cimentícios possivelmente tenham sofrido o processo de carbonatação.

Figura 3.22: Micrografias da mistura solo S1-EAEP obtida por MEV no processo de cura 1: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.

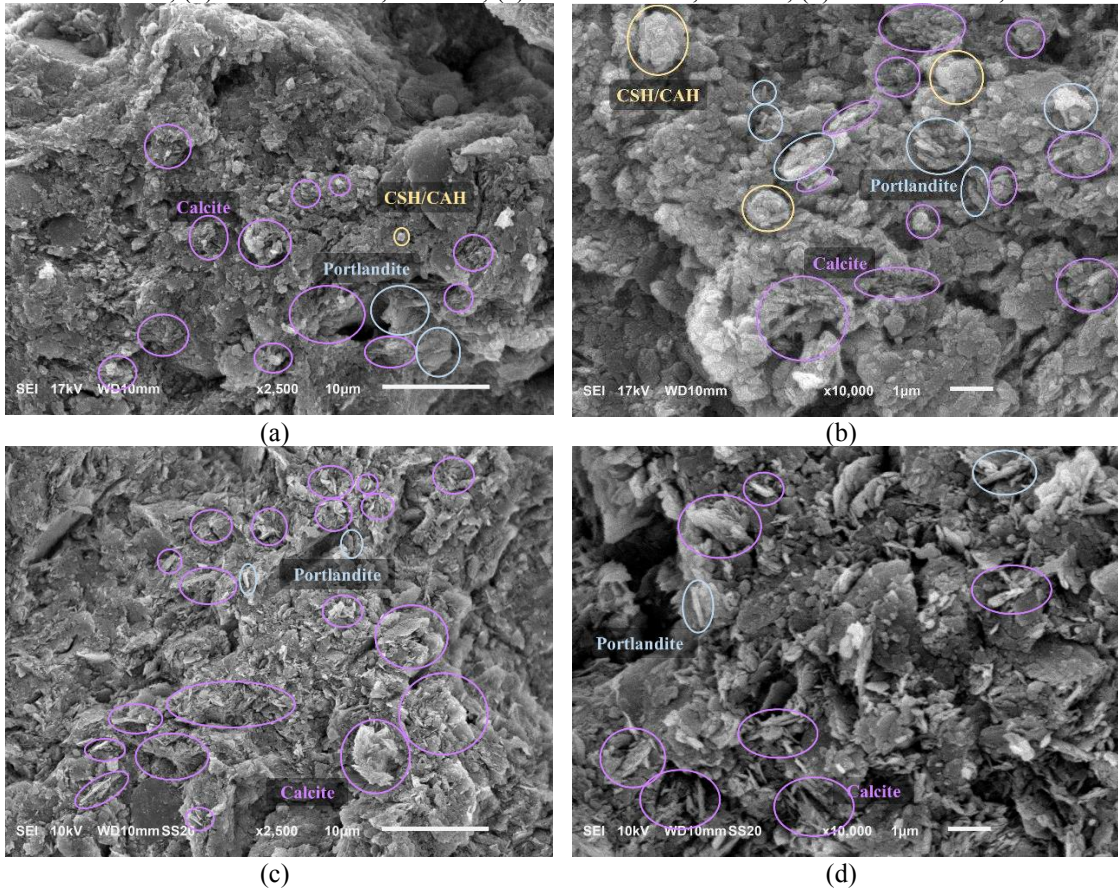
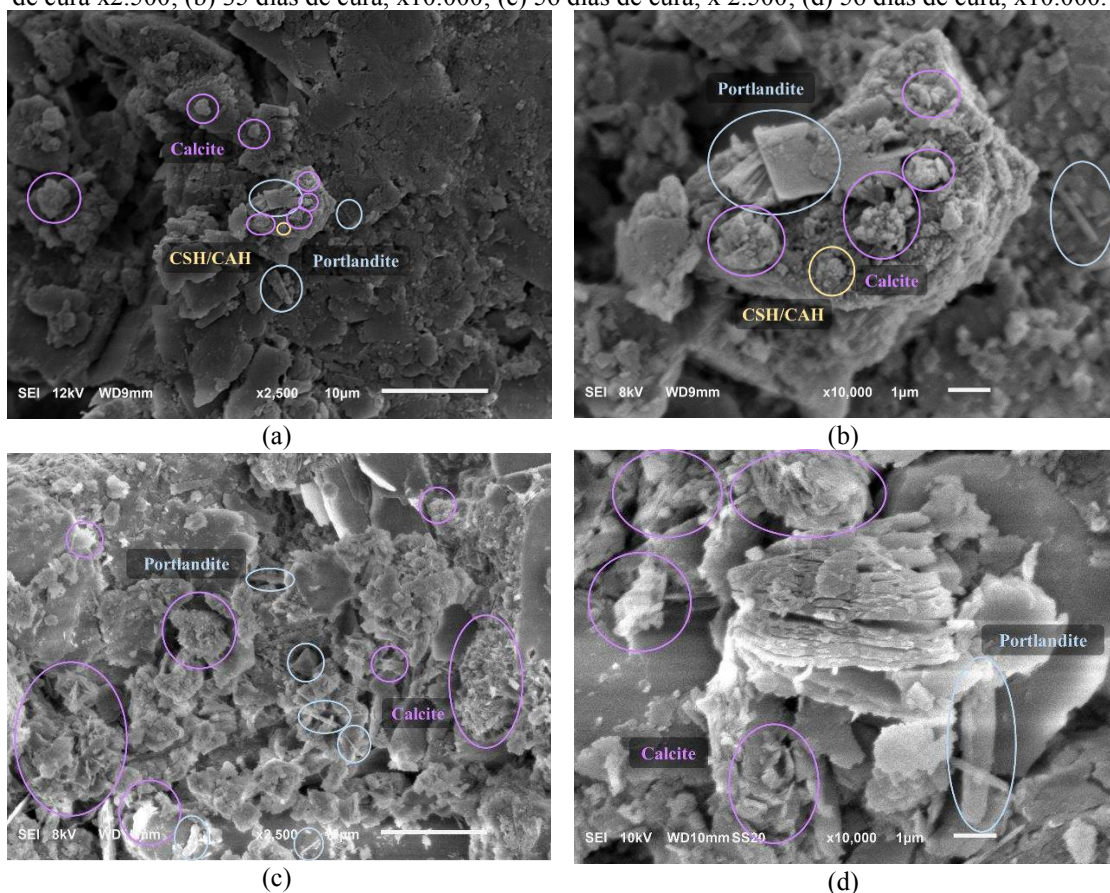


Figura 3.23: Micrografias da mistura solo S2-EAEP obtida por MEV no processo de cura 1: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.



A fim de complementar a análise de MEV, foram realizadas as análises mineralógicas através de DRX para as misturas das amostras de solo S1 e S2, as quais são apresentadas nas Figuras 3.24 e 3.25, respectivamente. Observou-se que, assim como observado nas análises de MEV, foi formado o carbonato de cálcio, verificado principalmente pelo pico próximo de 30° . Mesmo com a formação de carbonato de cálcio, foi observada a presença de hidróxido de cálcio que pode vir a se carbonatar, mostrando que a melhoria das propriedades mecânicas pode ocorrer mesmo após 56 dias de cura para ambas as misturas da amostra de solo S1-EAEP e da amostra de solo S2-EAEP.

Figura 3.24: Difratogramas da mistura solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 1, por DRX: 35 dias de cura, 42 dias de cura e 56 dias de cura.

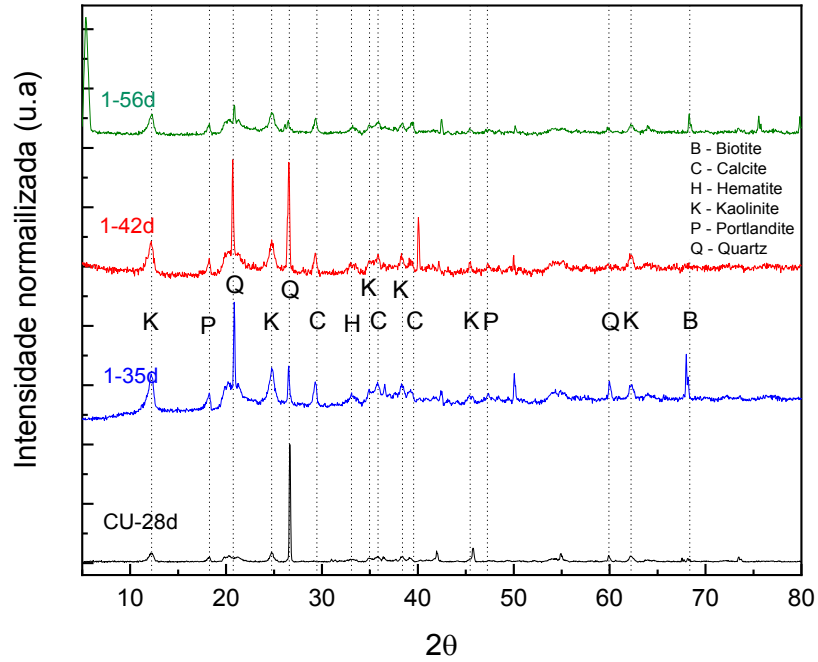
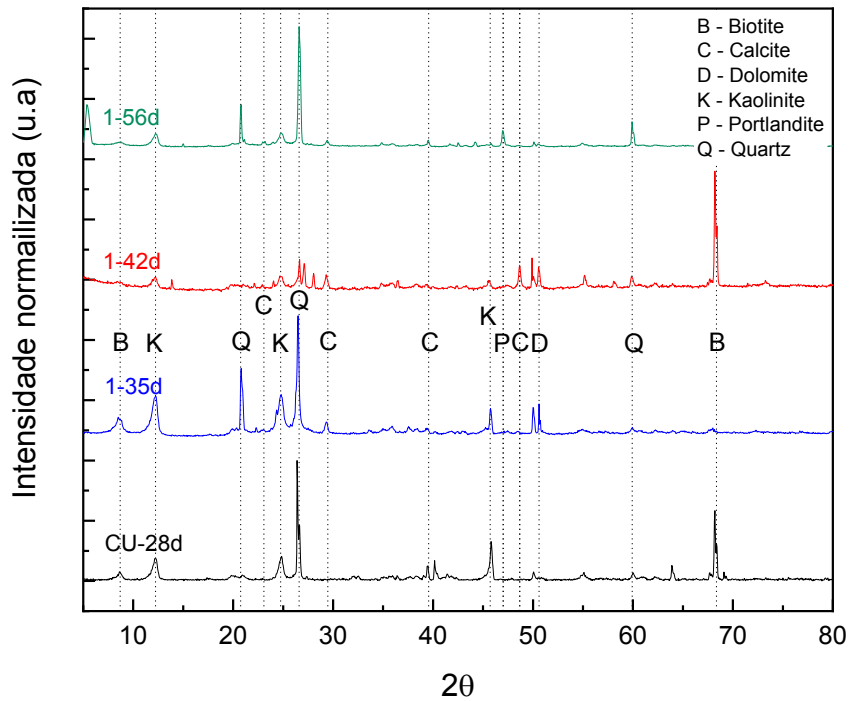
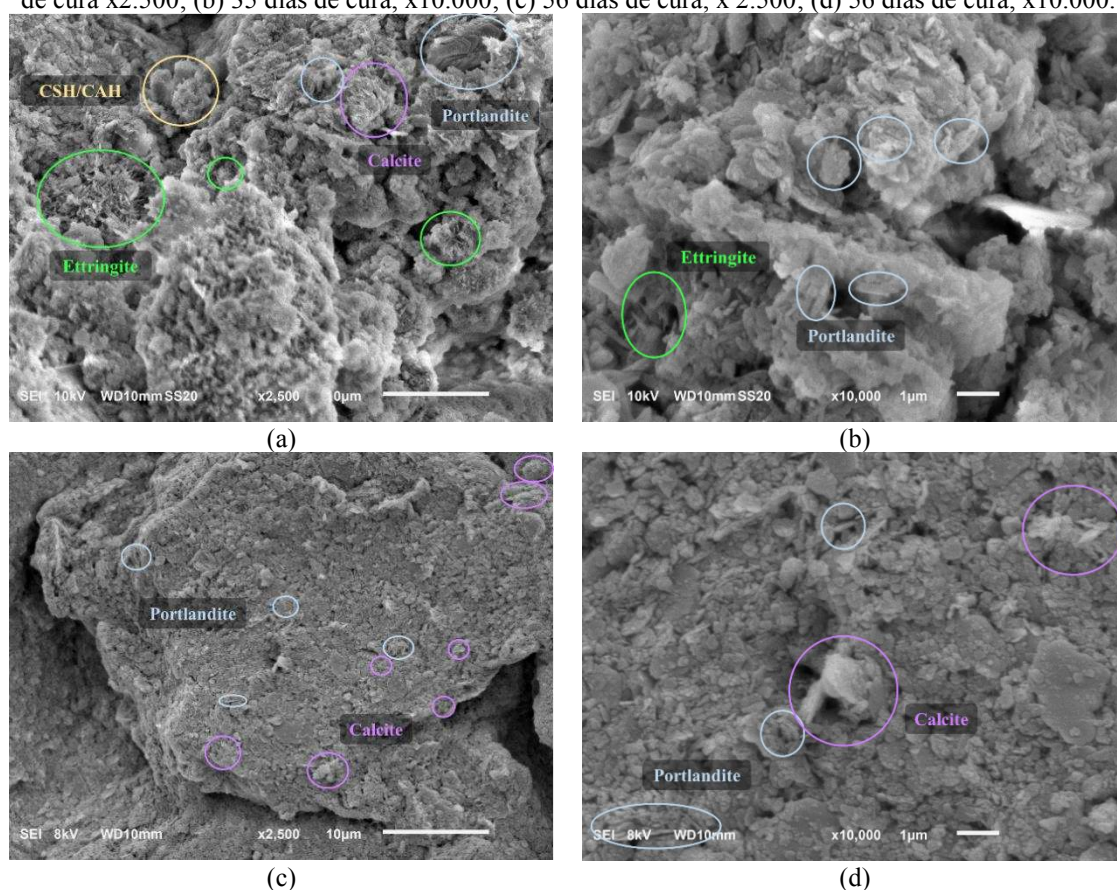


Figura 3.25: Difratogramas da mistura solo S2-EAEP, submetida ao processo de cura 1, por DRX: 35 dias de cura, 42 dias de cura e 56 dias de cura.



Nas Figuras 3.26 e 3.27, são apresentadas as micrografias para as misturas da amostra de solo S1-EAEP e da amostra de solo S2-EAEP, submetidas ao processo de cura 2, respectivamente.

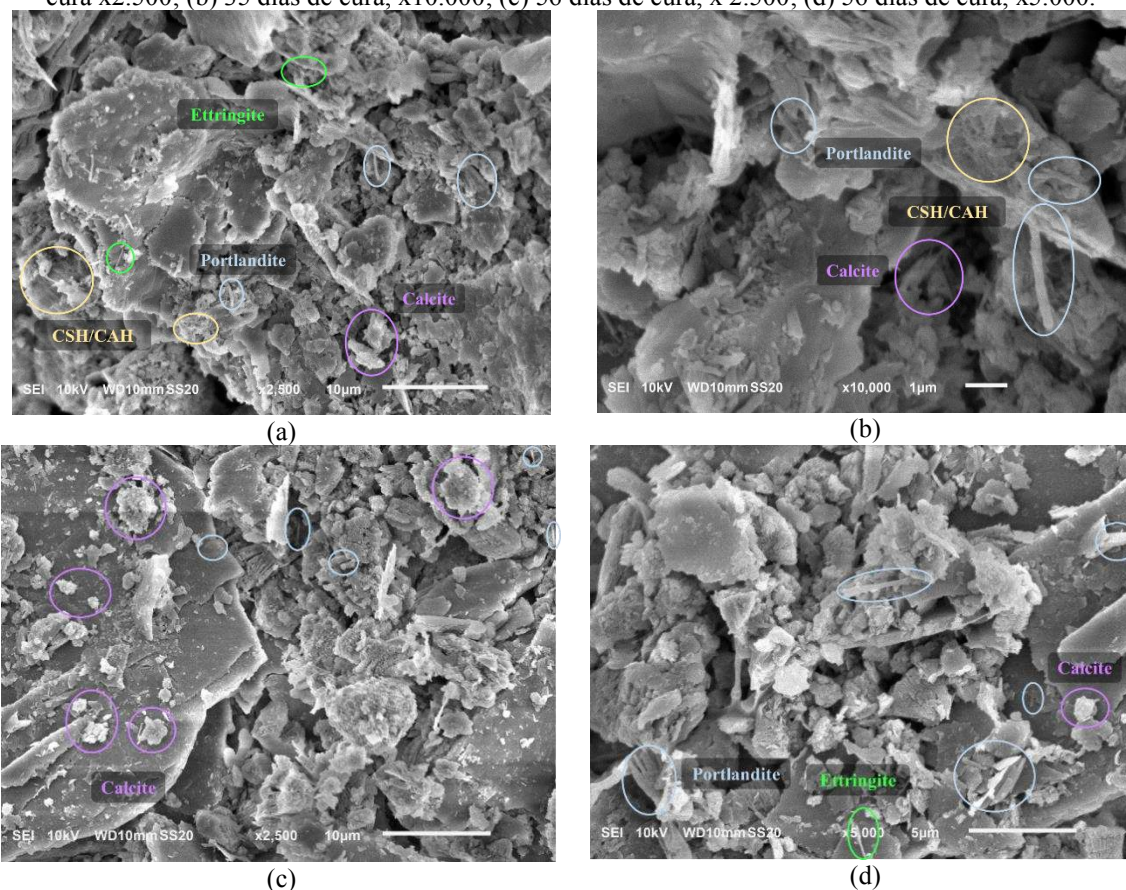
Figura 3.26: Micrografias da mistura solo S1-EAEP obtida por MEV no processo de cura 2: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.



As misturas das duas amostras de solo S1 e S2 com EAEP apresentaram, aos 35 dias de cura, a formação de carbonato de cálcio devido ao processo de carbonatação acelerada na amostra de EAEP, sendo a presença desse composto identificada revestindo partículas soltas de EAEP, o que, aliado com o baixo aumento de resistência e rigidez comparado com os outros processos de cura submetidos à presença de CO_2 , mostrou que a carbonatação prévia da EAEP não apresentou o mesmo efeito da carbonatação aplicada às misturas. O hidróxido de cálcio também foi identificado, o qual foi formado devido à hidratação do óxido de cálcio. Os compostos C-S-H e C-A-H também foram observados, mas em pequena quantidade. Apesar da formação de carbonato de cálcio, C-S-H e C-A-H, os quais são compostos que tendem a aumentar a resistência e a rigidez dos solos, etringita também foi formada, a qual está associada

à redução dessas propriedades e ao aumento de expansão (GU *et al.*, 2022; JEBLI *et al.*, 2021; KAWABATA *et al.*, 2021; PAUL *et al.*, 2022; THIEBAUT *et al.*, 2018).

Figura 3.27: Micrografias da mistura solo S2-EAEP obtida por MEV no processo de cura 2: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x5.000.



Nas Figuras 3.28 e 3.29, são apresentados os difratogramas das misturas da amostra de solo S1-EAEP e da amostra de solo S2-EAEP, respectivamente, submetidas ao processo de cura 2. O hidróxido de cálcio foi observado nas duas misturas solo-EAEP, corroborando os resultados dos ensaios de MEV. Além desses compostos, foi observado um pequeno pico de carbonato de cálcio, próximo aos 30° , formado na carbonatação prévia da amostra de EAEP.

Figura 3.28: Difratoograma da mistura solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 2, por DRX.

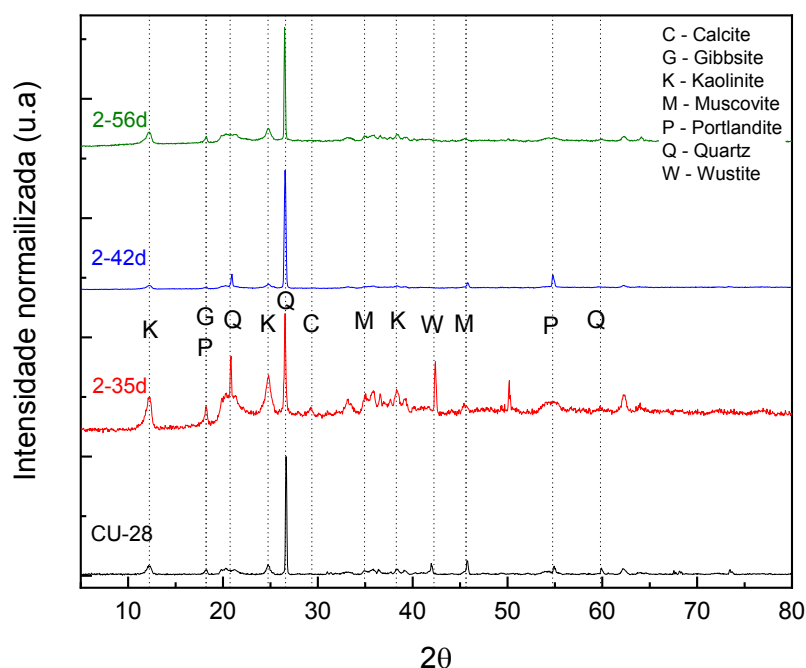
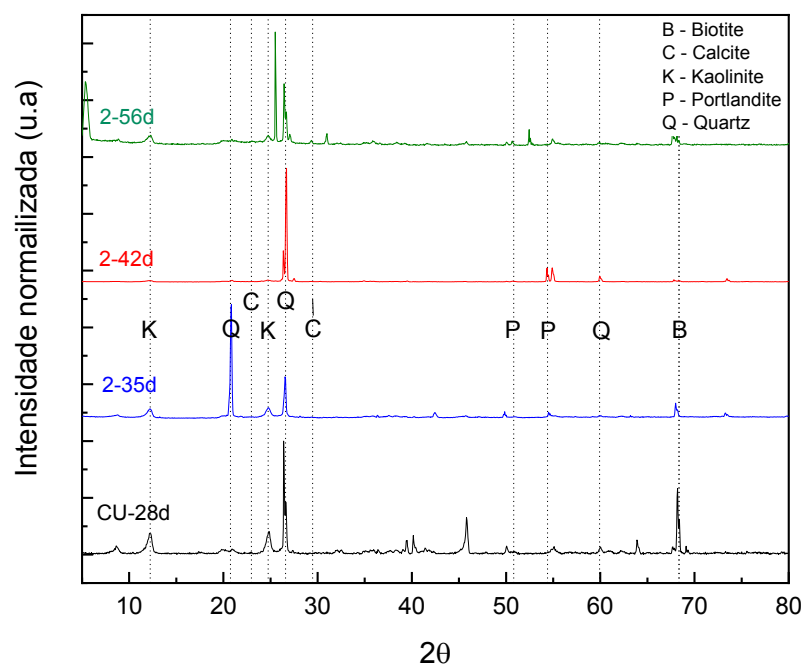


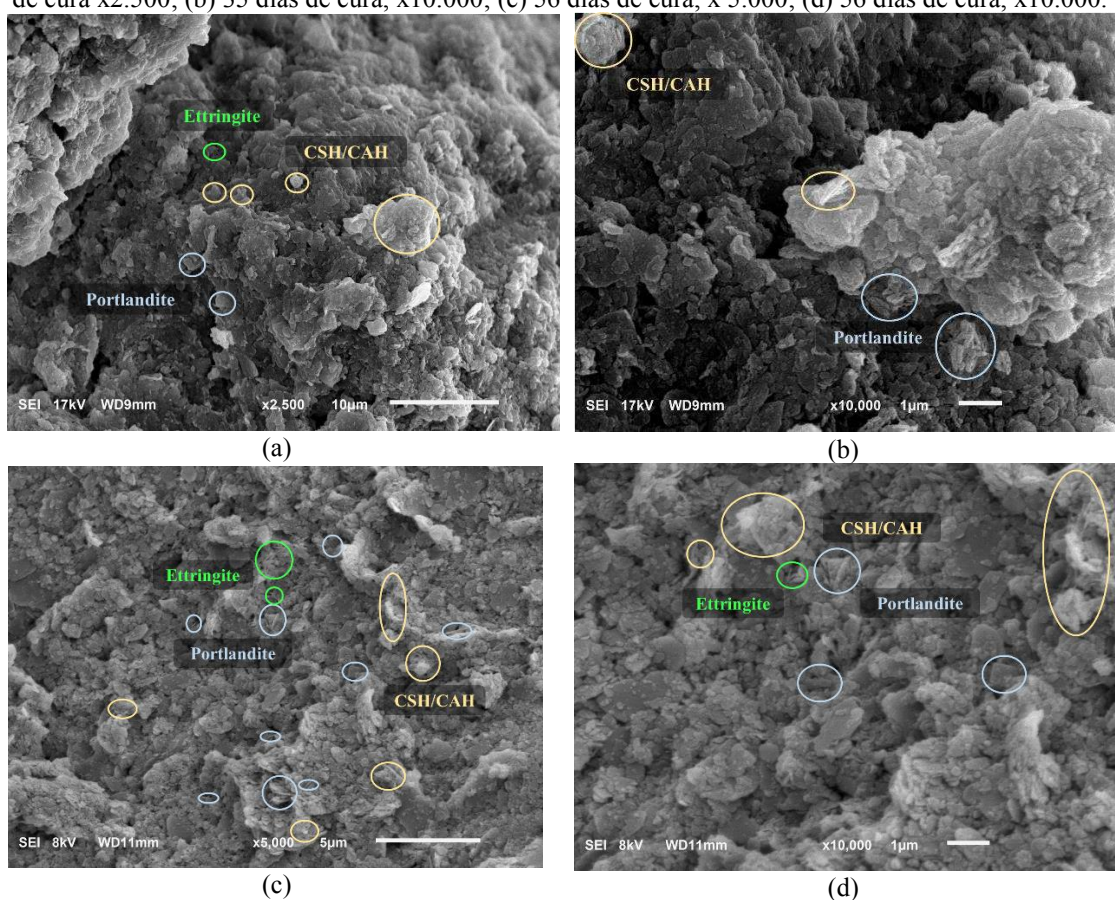
Figura 3.29: Difratoograma da mistura solo S2-EAEP, submetida ao processo de cura 2, por DRX.



Os compostos cimentícios C-S-H, C-A-H e C-A-S-H foram observados nas micrografias das misturas solo-EAEP, para as amostras de solo S1 (Figura 3.30) e S2 (Figura 3.31), submetidas ao processo de cura 3. Assim como no processo de cura 2, observou-se a presença de hidróxido de cálcio, não sendo observada a formação de CaCO_3 . Os compostos cimentícios

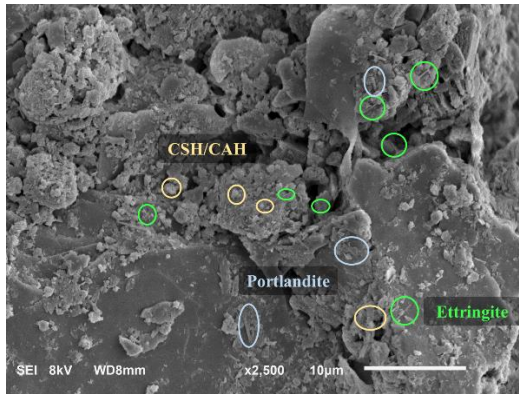
C-S-H, C-A-S-H e C-A-H geraram uma estrutura mais densa do que a estrutura do solo na sua condição natural, aumentando a resistência do material, como demonstrado a partir dos resultados de RCS, índice mini-CBR e MR. Estruturas semelhantes desses compostos também foram encontradas por outros autores para misturas entre amostras de solos e EAEP (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; AMINI; GHASEMI, 2019; WU *et al.*, 2019).

Figura 3.30: Micrografias da mistura solo S1-EAEP obtida por MEV no processo de cura 3: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 5.000; (d) 56 dias de cura, x10.000.

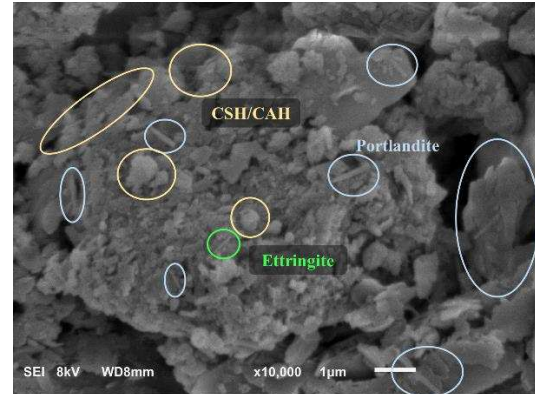


Os difratogramas das misturas solo-EAEP são apresentados nas Figuras 3.32 e 3.33, para as misturas solo S1-EAEP e solo S2-EAEP, respectivamente. Observou-se que não houve indícios de cristais de carbonato de cálcio nas análises de MEV e de DRX, pois não houve contato do material com o CO_2 diretamente. Entretanto, verificou-se a presença de hidróxido de cálcio, que é produto da hidratação do óxido de cálcio, o qual foi observado na análise de DRX da amostra de EAEP. Essa ausência de carbonato de cálcio está de acordo com as análises de aspersão de fenolftaleína e de pH.

Figura 3.31: Micrografias da mistura solo S2-EAEP obtida por MEV no processo de cura 3: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 5.000; (d) 56 dias de cura, x10.000.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.32: Difratoograma da mistura solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 3, por DRX.

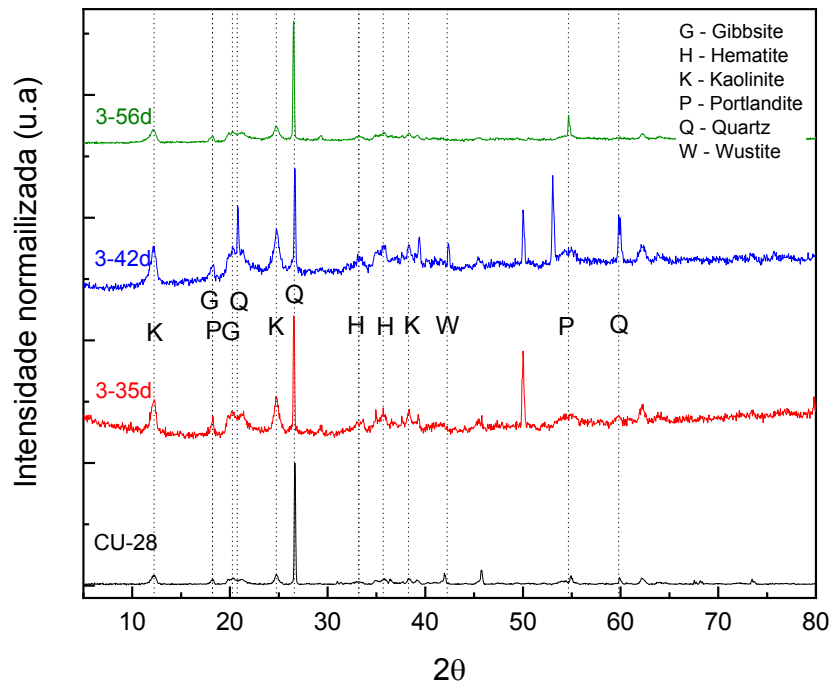
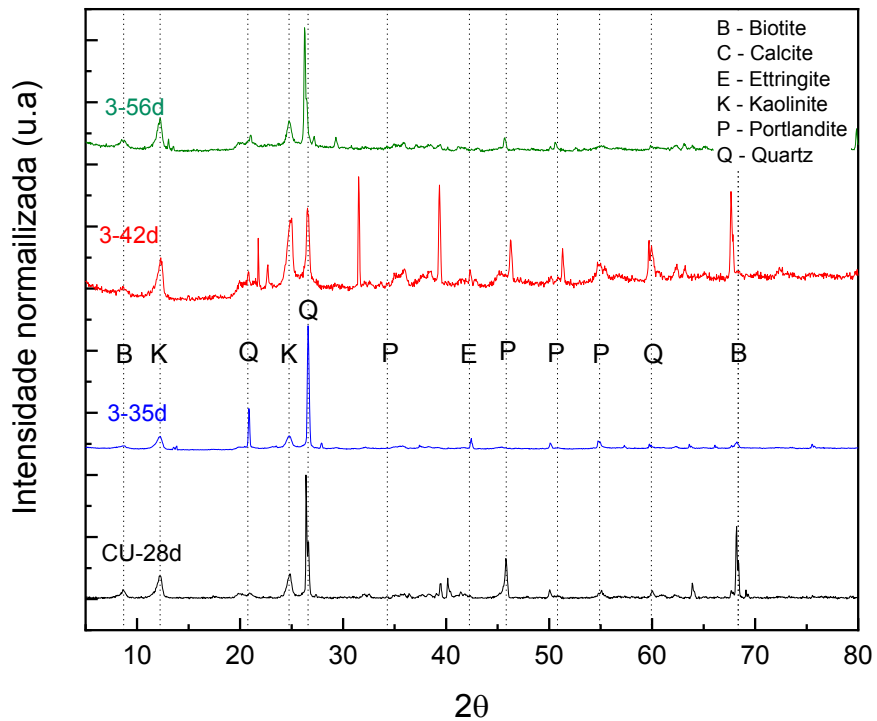
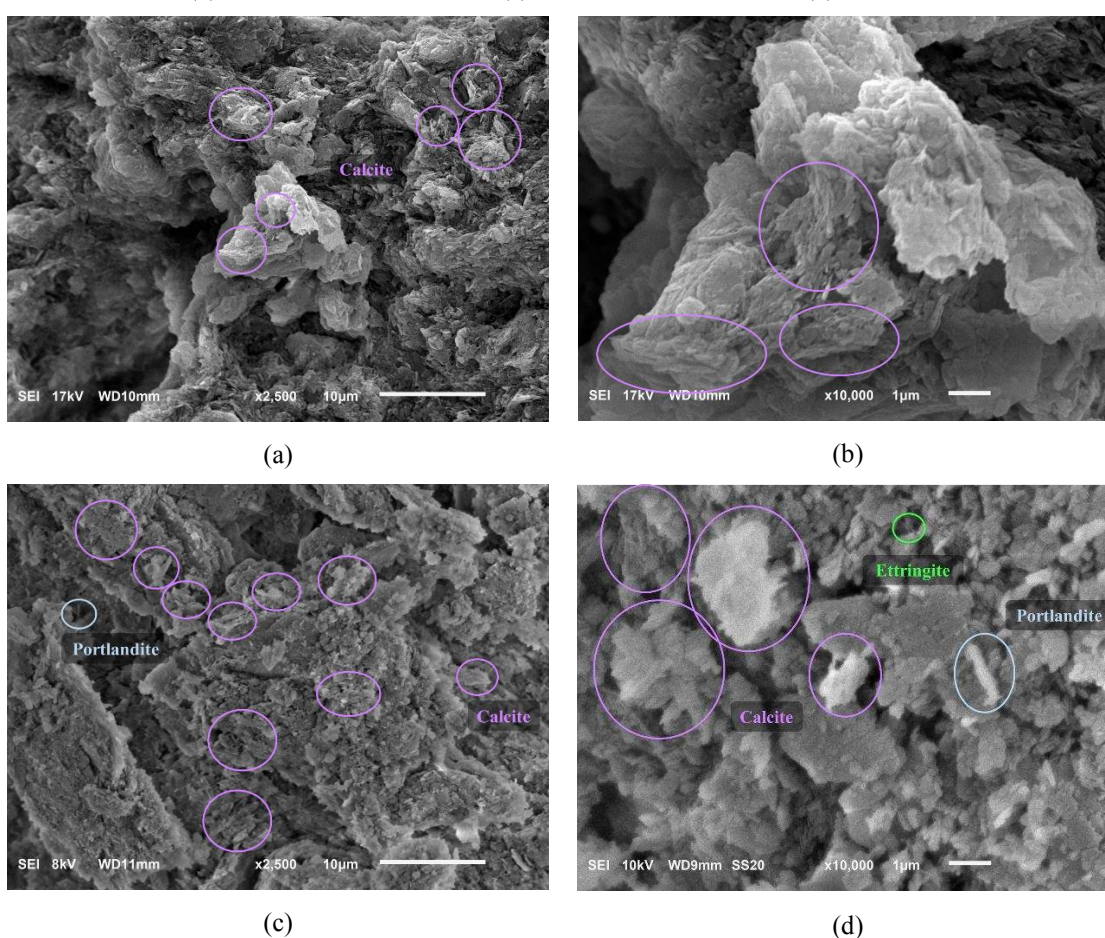


Figura 3.33: Difratoograma da mistura solo S2-EAEP, submetida ao processo de cura 3, por DRX.



São apresentadas, nas Figuras 3.34 e 3.35, as imagens de MEV das misturas da amostra de solo S1-EAEP e da amostra de solo S2-EAEP, submetidas ao processo de cura 4, nas quais foram identificados carbonato de cálcio, hidróxido de cálcio e etringita para a mistura da amostra de solo S1-EAEP. Na mistura da amostra de solo S2-EAEP, foi identificada, além desses compostos, uma estrutura de C-S-H e/ou C-A-H com formato fibrilar, da mesma forma que no processo de cura 3.

Figura 3.34: Micrografias da mistura solo S1-EAEP obtida por MEV no processo de cura 4: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.



Nas Figuras 3.36 e 3.37, são apresentados os difratogramas obtidos por DRX das misturas da amostra de solo S1-EAEP e da amostra de solo S2-EAEP, respectivamente, submetidas ao processo de cura 4. Observou-se a evolução do progresso da carbonatação ao longo da cura ao ar. Comparando com o processo de cura 1, verificou-se que o número de picos de hidróxido de cálcio para o processo de cura 4 foi maior, o que corrobora os dados de que a carbonatação

ocorreu mais lentamente neste último processo de cura devido à menor concentração de CO_2 no ambiente natural em comparação com o ambiente da câmara de carbonatação acelerada.

Figura 3.35: Micrografias da mistura solo S2-EAEP obtida por MEV no processo de cura 4: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.

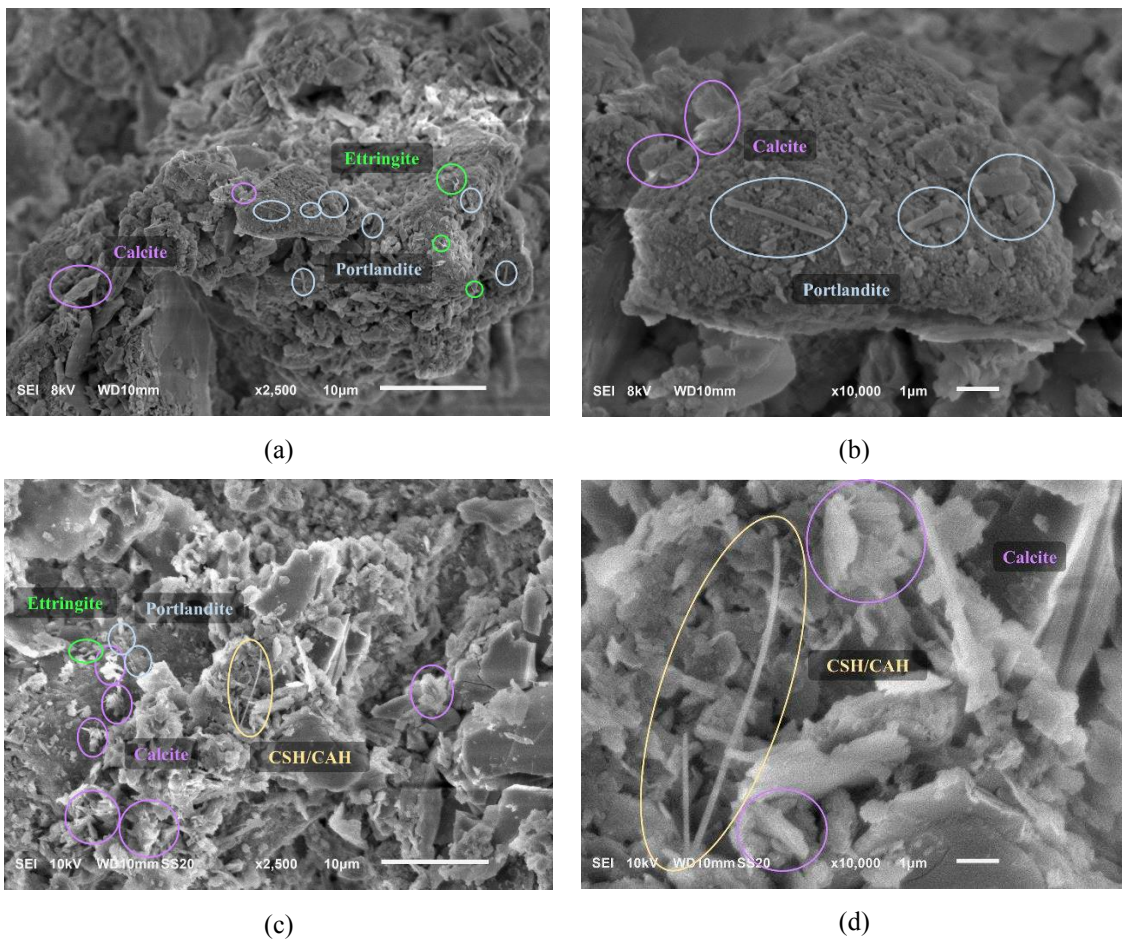


Figura 3.36: Difratoograma da mistura solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 4, por DRX.

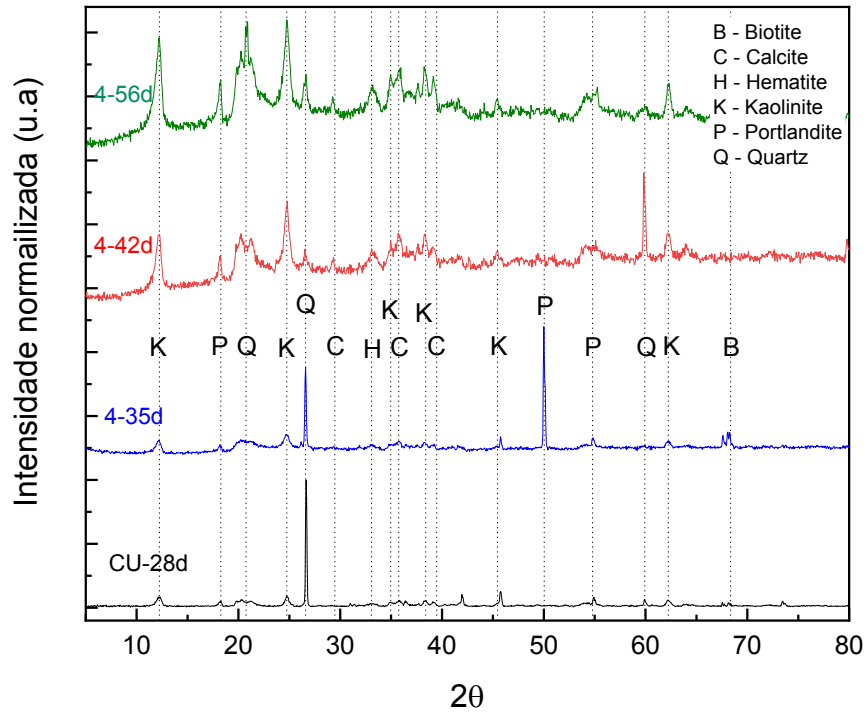
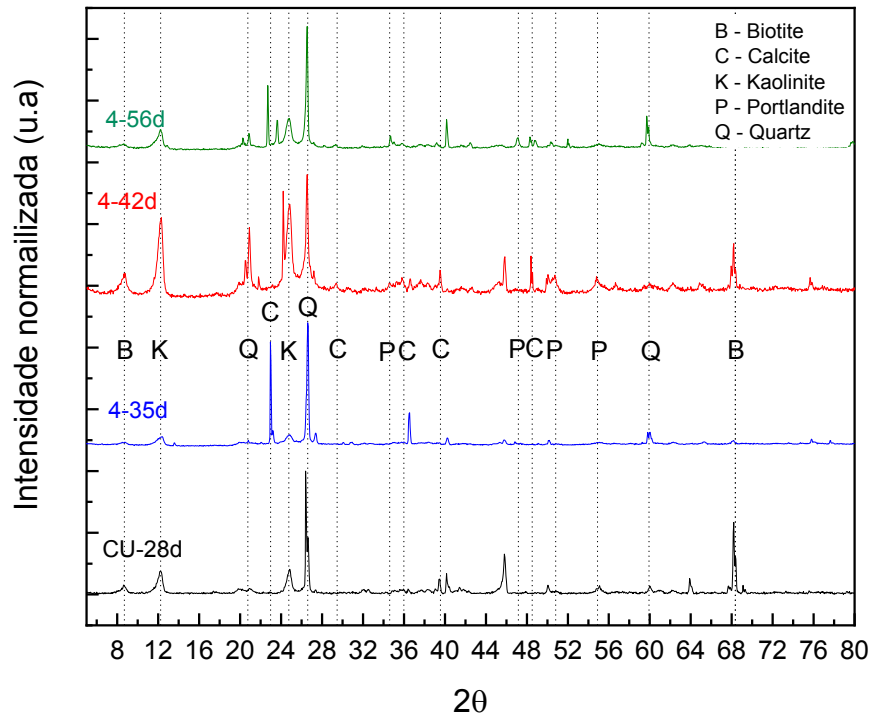


Figura 3.37: Difratoograma da mistura solo S2-EAEP, submetida ao processo de cura 4, por DRX.

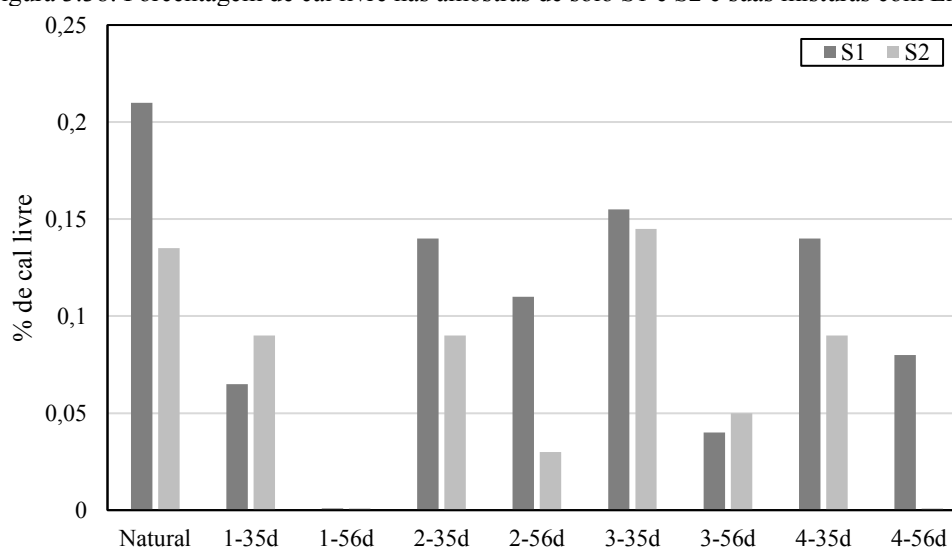


Diante dos resultados apresentados, constatou-se que a melhoria de resistência e rigidez das misturas solo-EAEP, ocorrida nos processos de cura 2 e 3, foi devido à formação de compostos cimentícios, sendo que a etringita minimiza esse melhoramento.

Nos processos de cura 1 e 4, os quais promovem uma exposição ao CO₂, houve uma melhoria significativa da resistência e da rigidez das misturas devido principalmente à formação de carbonato de cálcio, o qual foi formado tanto pela carbonatação do hidróxido de cálcio quanto pela carbonatação de compostos cimentícios (DENELEE *et al.*, 2021; VITALE *et al.*, 2021; ZHA *et al.*, 2021). Segundo Xu *et al.* (2020), no processo de carbonatação do hidróxido de cálcio, o potencial expansivo de solos argilosos é recuperado. A presença de etringita nas misturas solo-EAEP submetidas ao processo de cura 4 pode ter sido o motivo pelo qual a mistura apresentou um aumento de expansibilidade, principalmente na amostra de solo S1 (GU *et al.*, 2022; JEBLI *et al.*, 2021; KAWABATA *et al.*, 2021; PAUL *et al.*, 2022; THIEBAUT *et al.*, 2018), aliado ao desenvolvimento da hidratação do óxido de cálcio (BRAND *et al.*, 2020; LAM; LE; JARITNGAM, 2018; LI *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2019) e da carbonatação do hidróxido de cálcio (CUI *et al.*, 2015; MORANDEAU; THIÉRY; DANGLA, 2014; XU *et al.*, 2020).

A Figura 3.38 apresenta os resultados do ensaio de óxidos de cal livre para as amostras de solo S1 e S2 e suas misturas com EAEP.

Figura 3.38: Porcentagem de cal livre nas amostras de solo S1 e S2 e suas misturas com EAEP.



Observou-se que os teores de cal livre disponíveis nas amostras dos solos e na amostra de EAEP moída (0,74%) diminuíram com a utilização de todos os processos de cura utilizados. Isso mostrou que o processo inicial de cura selada em câmara úmida por 28 dias foi capaz de utilizar parte dessa quantidade de CaO livre para a formação de compostos cimentícios, como foi observado nos ensaios de MEV, estando de acordo com a literatura técnica (BANDIPALLY; CHERIAN; ARNEPALLI, 2018). O processo de cura 3 apresentou uma evolução da formação dessas estruturas ao longo do tempo de cura.

Nos processos de cura 1 e 4, a diminuição da porcentagem de cal livre ocorreu devido tanto à formação de compostos cimentícios, nos primeiros 28 dias de cura selada em câmara úmida, quanto à sua transformação em hidróxido de cálcio e posterior carbonatação nos processos de cura em câmara de carbonatação acelerada e em exposição ao ar, respectivamente.

3.5. Conclusões

Neste estudo, os efeitos de 3 processos de cura envolvendo carbonatação de misturas de amostras de solos e EAEP foram avaliados sob a perspectiva de análises de comportamento mecânico (RCS, índice mini-CBR e MR) e de expansibilidade (expansão mini-CBR). Análises químicas, mineralógicas e microestruturais também foram realizadas a fim de complementar e explicar as alterações nas propriedades avaliadas.

Este estudo mostrou que a carbonatação de misturas das amostras de solo-EAEP gerou mudanças em sua estrutura e em suas propriedades. O processo de cura selada em câmara úmida apresentou uma melhoria pequena nos valores das propriedades mecânicas e de expansibilidade com o aumento do tempo de cura, devido à formação de compostos cimentícios. Um comportamento distinto foi observado nos corpos de provas das misturas das amostras de solo-EAEP submetidos aos processos de cura 1 e 4, que, no geral, mostraram melhorias significativas nos valores das propriedades mecânicas e de expansibilidade, com destaque para as misturas submetidas ao processo de cura 1. Essas melhorias ocorreram devido à transformação de hidróxido de cálcio e de compostos cimentícios em carbonato de cálcio, o que foi constatado através de análises químicas, mineralógicas e microestruturais.

A carbonatação das misturas das amostras de solo-EAEP posteriormente à cura selada em câmara úmida (processos de cura 1 e 4) mostrou que há uma maior variação de pH para uma maior concentração de CO₂ no ambiente.

Esses resultados experimentais devem ser comparados com resultados de campo de solos estabilizados com EAEP, visando verificar o desenvolvimento de cristais de carbonato de cálcio.

Os resultados encontrados mostraram que o processo de cura dos corpos de prova tem grande influência nas propriedades mecânicas das misturas solo-EAEP. O processo de carbonatação, observado nas misturas submetidas aos processos de cura ao ar (cura 4) e de cura em câmara de carbonatação acelerada (cura 1), teve um grande impacto na variação das propriedades mecânicas analisadas, promovendo um aumento considerável na resistência e na rigidez das misturas solo-EAEP, com destaque para o processo de cura em câmara de carbonatação acelerada (cura 1). A presença de hidróxido de cálcio em 56 dias de cura nesses dois processos, observado no ensaio de DRX, mostrou que, mesmo após essa idade, as propriedades de resistência e rigidez das misturas tendem a aumentar. O processo de carbonatação, portanto, não se mostrou deletério, como no caso de concretos, aumentando a resistência e rigidez das misturas solo-EAEP, o que garante a durabilidade dessas misturas ao longo dos anos.

REFERÊNCIAS

- AASHTO. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice**. 3rd ed. [Washington D.C.]: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020. 978-1-56051-748-1.
- ADENIYI, F. I.; OGUNDIRAN, M. B.; HEMALATHA, T.; HANUMANTRAI, B. B. Characterization of raw and thermally treated Nigerian kaolinite-containing clays using instrumental techniques. **SN Applied Sciences**, 2, n. 5, p. 821, 2020/04/05 2020.
- AKINWUMI, I. J. P. P. C. E. Soil modification by the application of steel slag. 58, n. 4, p. 371-377, 2014.
- 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, n. 1, p. 46676, 2017/04/28 2017.
- ALDEEKY, H.; AL HATTAMLEH, O. Experimental study on the utilization of fine steel slag on stabilizing high plastic subgrade soil. **Advances in Civil Engineering**, 2017, 2017.
- AL-HOMIDY, A. A.; AL-AMOUDI, O.; MASLEHUDDIN, M.; SALEH, T. A. Stabilisation of dune sand using electric arc furnace dust. **International Journal of Pavement Engineering**, 18, n. 6, p. 513-520, 2017.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 145-91**: Standard Specification for Classification of Soils and Soil Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes Washington, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2487-17**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Pensilvânia ASTM International, 2017.
- 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, p. 409-420, 2019/10/30/ 2019.
- AMIRI, S. T.; NAZIR, R.; DEHGHANBANADAKI, A. Experimental study of geotechnical characteristics of crushed glass mixed with kaolinite soil. **International Journal**, 14, n. 45, p. 170-176, 2018.
- APITHANYASAI, S.; SUPAKATA, N.; PAPONG, S. The potential of industrial waste: using foundry sand with fly ash and electric arc furnace slag for geopolymer brick production. **Heliyon**, 6, n. 3, p. e03697, 2020.

ARRIBAS, I.; SANTAMARIA, A.; RUIZ, E.; ORTEGA-LOPEZ, V. *et al.* Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. **Construction and Building Materials**, 90, p. 68-79, 2015.

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, 2012b. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12024 – MB 3361**. Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos - procedimento. Rio de Janeiro, 2012g, 10p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**. Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014, 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.

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

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, 2016e, 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 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, 2016f, 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 NM 13**. Cimento Portland Análise química – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2012d, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 15**. Cimento Portland Análise química – Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012e, 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 18**. Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012c, 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 NBR NM 51**. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001, 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253**. Solo-cimento: dosagem para emprego como camada de pavimento: procedimento. Rio de Janeiro, 2012a. 3 p.

ASTM. (2009). “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures.” **ASTM D5102**, West Conshohocken, PA.

AUTELITANO, F.; GIULIANI, F. Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties. **Construction and Building Materials**, 113, p. 280-289, 2016.

AVET, F.; SCRIVENER, K., 2020, Singapore. **Simple and Reliable Quantification of Kaolinite in Clay Using an Oven and a Balance**. Springer Singapore. 147-156.

BALAGUERA, C. A. C.; BOTERO, M. A. G. Characterization of steel slag for the production of chemically bonded phosphate ceramics (CBPC). **Construction and Building Materials**, 241, p. 118138, 2020.

BANDIPALLY, S.; CHERIAN, C.; ARNEPALLI, D. N. Characterization of Lime-Treated Bentonite Using Thermogravimetric Analysis for Assessing its Short-Term Strength Behaviour. **Indian Geotechnical Journal**, 48, n. 3, p. 393-404, 2018/09/01 2018.

BANK, W. **From Waste to Resource - Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean**. 2019. (From Waste to Resource - Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean.

BEAUCOUR, A. L.; PLIYA, P.; FALESCHINI, F.; NJINWOUA, R. *et al.* Influence of elevated temperature on properties of radiation shielding concrete with electric arc furnace slag as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, 256, p. 119385, 2020/09/30/ 2020.

BHENGU, P.; ALLOPI, D. Influence of Lime on Lime Soil Stabilization on Natural Occurring Acidic Soil Engineering Properties. **American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, Sciences**, 30, n. 1, p. 57-69, 2017.

BHUVANESHWARI, S.; ROBINSON, R.; GANDHI, S. Resilient modulus of lime treated expansive soil. **Geotechnical Geological Engineering**, 37, n. 1, p. 305-315, 2019.

BORGES MARINHO, A. L.; MOL SANTOS, C. M.; CARVALHO, J. M. F. d.; MENDES, J. C. *et al.* Ladle furnace slag as binder for cement-based composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 29, n. 11, p. 04017207, 2017.

BRAND, A. S.; SINGHVI, P.; FANIJO, E. O.; TUTUMLUER, E. Stabilization of a Clayey Soil with Ladle Metallurgy Furnace Slag Fines. **Materials**, 13, n. 19, p. 4251, 2020.

CASTAGNOTTO, E.; LOCARDI, F.; SLIMANI, S.; PEDDIS, D. *et al.* Characterization of the Caput Mortuum purple hematite pigment and synthesis of a modern analogue. **Dyes and Pigments**, 185, p. 108881, 2021/02/01/ 2021.

CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X. *et al.* Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement concrete research**, 34, n. 9, p. 1633-1644, 2004.

ČEŠNOVAR, M.; TRAVEN, K.; HORVAT, B.; DUCMAN, V. The potential of ladle slag and electric arc furnace slag use in synthesizing alkali activated materials; the influence of curing on mechanical properties. **Materials**, 12, n. 7, p. 1173, 2019.

CHAKRABORTY, S.; NAIR, S. Impact of curing time on moisture-induced damage in lime-treated soils. **International Journal of Pavement Engineering**, 21, n. 2, p. 215-227, 2020/01/28 2020.

CORREIA, N. d. S.; PORTELINHA, F. H. M.; MENDES, I. S.; DA SILVA, J. W. B. Lime treatment of a diesel-contaminated coarse-grained soil for reuse in geotechnical applications. **International Journal of Geo-Engineering**, 11, n. 1, p. 8, 2020/06/30 2020.

CUI, H.; TANG, W.; LIU, W.; DONG, Z. *et al.* Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. **Construction and Building Materials**, 93, p. 522-527, 2015/09/15/ 2015.

DE WINDT, L.; DENELEE, D.; MAUBEC, N. Kinetics of lime/bentonite pozzolanic reactions at 20 and 50°C: Batch tests and modeling. **Cement and Concrete Research**, 59, p. 34-42, 2014/05/01/ 2014.

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

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-CLA 259**: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996.

DIAS, A. R. d. O.; AMANCIO, F. A.; SOUSA, I. L. X. d.; LUCAS, S. O. *et al.* Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. **Matéria (Rio de Janeiro)**, 25, 2020.

DINIZ, D. H.; CARVALHO, J. M. F. d.; 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**, 29, n. 9, p. 04017118, 2017.

ELHADJ, M. S. Y.; PERRIN, F. X. Influencing parameters of mechanochemical intercalation of kaolinite with urea. **Applied Clay Science**, 213, p. 106250, 2021/11/01/ 2021.

EVANGELISTA, B. L.; ROSADO, L. P.; PENTEADO, C. S. G. Life cycle assessment of concrete paving blocks using electric arc furnace slag as natural coarse aggregate substitute. **Journal of Cleaner Production**, 178, p. 176-185, 2018/03/20/ 2018.

FALESCHINI, F.; BRUNELLI, K.; ZANINI, M. A.; DABALA, M. *et al.* Electric arc furnace slag as coarse recycled aggregate for concrete production. **Journal of Sustainable Metallurgy**, 2, n. 1, p. 44-50, 2016.

FERREIRA, V. J.; VILAPLANA, A. S.-D.-G.; GARCÍA-ARMINGOL, T.; ARANDA-USÓN, A. *et al.* Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment. **Journal of Cleaner Production**, 130, p. 175-186, 2016.

GRAFFITTI, D. F. Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica. 2002.

GU, Y.; DANGLA, P.; MARTIN, R.-P.; OMIKRINE METALSSI, O. *et al.* Modeling the sulfate attack induced expansion of cementitious materials based on interface-controlled crystal growth mechanisms. **Cement and Concrete Research**, 152, p. 106676, 2022/02/01/ 2022.

GUO, J.; BAO, Y.; WANG, M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. **Waste Management**, 78, p. 318-330, 2018/08/01/ 2018.

HAAS, S.; RITTER, H.-J. Soil improvement with quicklime—long-time behaviour and carbonation. **Road Materials and Pavement Design**, 20, n. 8, p. 1941-1951, 2019.

HAMZA, O. S. M.; ZUMRAWI, M. M. E.; MOHAMED, A. E. M. Effect of Pozzolana and Lime on Expansive Soil Properties. **FES Journal of Engineering Sciences**, 9, n. 3, p. 94-101, 02/22 2021.

HO, L. S.; NAKARAI, K.; OGAWA, Y.; SASAKI, T. *et al.* Effect of internal water content on carbonation progress in cement-treated sand and effect of carbonation on compressive strength. 85, p. 9-21, 2018.

HO, L. S.; NAKARAI, K.; OGAWA, Y.; SASAKI, T. *et al.* Strength development of cement-treated soils: effects of water content, carbonation, and pozzolanic reaction under drying curing condition. 134, p. 703-712, 2017.

HOSSEN, S. K. B.; GALLANT, A. P.; ASHRAF, W. Elemental Testing of Carbonated Silty Sand Treated with Lime. *In: Geo-Congress 2020*, 2020. p. 562-571.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2004. 0136552757.

IAB. Relatório de sustentabilidade. **Instituto Aço Brasil**, 2018.

IKEAGWUANI, C. C.; OBETA, I. N.; AGUNWAMBA, J. C. Stabilization of black cotton soil subgrade using sawdust ash and lime. **Soils and Foundations**, 59, n. 1, p. 162-175, 2019/02/01/ 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320**. Partice Size Analysis - Laser Diffraction Methods, the International Organization for Standardization, 2020.

ISLAM, M. R.; TAREFDER, R. A. **Pavement Design: Materials, Analysis, and Highways**. McGraw-Hill Education, 2020. 1260458911.

ISMAIL, A. I. M.; AWAD, S. A.; MWAIFY, M. A. G. The Utilization of Electric Arc Furnace Slag in Soil Improvement. **Geotechnical and Geological Engineering**, 37, n. 1, p. 401-411, 2019/01/01 2019.

JEBLI, M.; JAMIN, F.; PELISSOU, C.; LHOPITAL, E. *et al.* Characterization of the expansion due to the delayed ettringite formation at the cement paste-aggregate interface. **Construction and Building Materials**, 289, p. 122979, 2021/06/28/ 2021.

JORAT, M. E.; GODDARD, M. A.; MANNING, P.; LAU, H. K. *et al.* Passive CO₂ removal in urban soils: Evidence from brownfield sites. **Science of The Total Environment**, 703, p. 135573, 2020/02/10/ 2020.

KAWABATA, Y.; UEDA, N.; MIURA, T.; MULTON, S. The influence of restraint on the expansion of concrete due to delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Composites**, 121, p. 104062, 2021/08/01/ 2021.

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, p. 320-330, 2015.

KUČERÍK, J.; SVATOŇ, K.; MALÝ, S.; BRTNICKÝ, M. *et al.* Determination of soil properties using thermogravimetry under laboratory conditions. 71, n. 3, p. 415-419, 2020.

LAM, M. N.-T.; JARITNGAM, S.; LE, D.-H. Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, 154, p. 482-495, 2017/11/15/ 2017.

LAM, M. N.-T.; LE, D.-H.; JARITNGAM, S. Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash. **Construction and Building Materials**, 191, p. 912-922, 2018/12/10/ 2018.

LEE, J.-Y.; CHOI, J.-S.; YUAN, T.-F.; YOON, Y.-S. *et al.* Comparing properties of concrete containing electric arc furnace slag and granulated blast furnace slag. **Materials**, 12, n. 9, p. 1371, 2019.

LEE, Y.-J.; KIM, H.-G.; KIM, M.-J.; KIM, D.-H. *et al.* Bond performance of reinforced concrete beams with electric arc furnace slag aggregates. **Construction and Building Materials**, 244, p. 118366, 2020/05/30/ 2020.

LI, C.-C.; LIN, C.-M.; CHANG, Y.-E.; CHANG, W.-T. *et al.* Stabilization and Crystal Characterization of Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Modified with Ladle Furnace Slag and Alumina. **Metals**, 10, n. 4, p. 501, 2020.

LI, M.; WANG, Q.; YANG, J.; GUO, X. *et al.* Strength and Mechanism of Carbonated Solidified Clay with Steel Slag Curing Agent. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 25, n. 3, p. 805-821, 2021/03/01 2021.

LI, Y.; QIAO, C.; NI, W. Green concrete with ground granulated blast-furnace slag activated by desulfurization gypsum and electric arc furnace reducing slag. **Journal of Cleaner Production**, 269, p. 122212, 2020/10/01/ 2020.

LIU, C.; DUPONT-NIVET, G.; WANG, W.; DENG, C. Magnetic response to pedogenesis in aerobic soils of different weathering degree. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 567, p. 110240, 2021/04/01/ 2021.

LOPES, E. C.; DA SILVA, T. O.; PITANGA, H. N.; PEDROTI, L. G. *et al.* Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. **International Journal of Pavement Engineering**, p. 1-12, 2021.

LOPES, M. M. S.; ALVARENGA, R. d. C. S. S. A.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L. *et al.* Influence of the incorporation of granite waste on the hiding power and abrasion resistance of soil pigment-based paints. **Construction and Building Materials**, 205, p. 463-474, 2019/04/30/ 2019.

MAHMUDI, M.; ALTUN, S.; ESKISAR, T. Experimental and Numerical Evaluation of Clay Soils Stabilized with Electric Arc Furnace (EAF) Slag. **Advances in Sustainable Construction Resource Management**, 144, p. 73, 2021.

MAHOUTIAN, M.; GHOULEH, Z.; SHAO, Y. Carbon dioxide activated ladle slag binder. **Construction and Building Materials**, 66, p. 214-221, 2014/09/15/ 2014.

MAKÓ, É.; KRISTÓF, J.; HORVÁTH, E.; VÁGVÖLGYI, V. Kaolinite–urea complexes obtained by mechanochemical and aqueous suspension techniques—A comparative study. **Journal of Colloid and Interface Science**, 330, n. 2, p. 367-373, 2009/02/15/ 2009.

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

MANSO, J. M.; POLANCO, J. A.; LOSANEZ, M.; GONZALEZ, J. J. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. **Cement and concrete composites**, 28, n. 6, p. 528-534, 2006.

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

MATHIAN, M.; BUENO, G. T.; BALAN, E.; FRITSCH, E. *et al.* Kaolinite dating from Acrisol and Ferralsol: A new key to understanding the landscape evolution in NW Amazonia (Brazil). **Geoderma**, 370, p. 114354, 2020/07/01/ 2020.

MEDINA, J.; MOTTA, L. **Mecânica dos pavimentos**. Ed. Interciência: 2015.

Ministério do Trabalho. (2011). **Norma Regulamentadora 25**.

MOHAMMED, M. A.; MOHD YUNUS, N. Z.; HEZMI, M. A.; ABANG HASBOLLAH, D. Z. *et al.* Ground improvement and its role in carbon dioxide reduction: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, 28, n. 8, p. 8968-8988, 2021/02/01 2021.

MONOSI, S.; RUELLO, M. L.; SANI, D. Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. **Cement and concrete composites**, 66, p. 66-72, 2016.

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**, 56, p. 153-170, 2014/02/01/ 2014.

MORSI, S. M.; EMIRA, H. S.; EL-SAWY, S. M.; MOHSEN, R. M. *et al.* Synthesis and characterization of kaolinite/polyaniline nanocomposites and investigating their anticorrosive performance in chlorinated rubber/alkyd coatings. 40, n. 7, p. 2777-2789, 2019.

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

NETINGER, I.; JELČIĆ RUKAVINA, M.; SERDAR, M.; BJEGOVIĆ, D. J. T. v. T. G. STEEL SLAG AS A VALUABLE MATERIAL FOR CONCRETE PRODUCTION. 21, n. 5, 2014.

NIKOLIĆ, I.; ĐUROVIĆ, D.; MARKOVIĆ, S.; VESELINOVIĆ, L. *et al.* Alkali activated slag cement doped with Zn-rich electric arc furnace dust. **Journal of Materials Research and Technology**, 9, n. 6, p. 12783-12794, 2020/11/01/ 2020.

OLIVEIRA, J. d. A.; RIBEIRO, J. C. L.; PEDROTI, L. G.; FARIA, C. S. d. *et al.* Durability of concrete after fire through accelerated carbonation tests. **Materials Research**, 22, 2019.

OLUWASOLA, E.; AFOLAYAN, A.; POPOOPA, M.; AFOLABI, A. Effect of Steel Slag on Engineering Properties of Lateritic Soil. **American Journal of Engineering Research**, 9, n. 6, p. 20-27, 2020.

OZTURK, M.; AKGOL, O.; SEVIM, U. K.; KARAASLAN, M. *et al.* Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag. **Construction and Building Materials**, 165, p. 58-63, 2018/03/20/ 2018.

PADMARAJ, D.; ARNEPALLI, D. N. The durability of cementitious phases in lime stabilisation: A critical review. *In*: Indian Geotechnical Conference, 2018, Bengaluru. Indian Institute of Science, December p. 5.

PADMARAJ, D.; ARNEPALLI, D. N., 2021, Singapore. **Durability of Cementitious Phases in Lime Stabilization: A Critical Review**. Springer Singapore. 483-491.

PAN, S.-Y.; CHIANG, P.-C.; CHEN, Y.-H.; CHEN, C.-D. *et al.* Systematic Approach to Determination of Maximum Achievable Capture Capacity via Leaching and Carbonation Processes for Alkaline Steelmaking Wastes in a Rotating Packed Bed. **Environmental Science & Technology**, 47, n. 23, p. 13677-13685, 2013/12/03 2013.

PARK, S.-S.; LE, T.-T.; NONG, Z.; MOON, H.-D. *et al.* Chemically Induced Calcium Carbonate Precipitation for Improving Strength of Sand. 32, n. 9, p. 04020238, 2020.

PARSAEI, M.; VAKILI, A. H.; SALIMI, M.; FARHADI, M. S. *et al.* Effect of electric arc and ladle furnace slags on the strength and swelling behavior of cement-stabilized expansive clay. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2021/06/10 2021.

PAUL, A.; RASHIDI, M.; KIM, J.-Y.; JACOBS, L. J. *et al.* The impact of sulfate- and sulfide-bearing sand on delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Composites**, 125, p. 104323, 2022/01/01/ 2022.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. J. A. c. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.

PENTEADO, C. S. G.; EVANGELISTA, B. L.; FERREIRA, G. C. d. S.; BORGES, P. H. A. *et al.* Use of electric arc furnace slag for producing concrete paving blocks. **Ambiente Construído**, 19, n. 2, p. 21-32, 2019.

PETRÓ, S. M.; PIVEL, M. A. G.; COIMBRA, J. C. Implicações da dissolução de carbonato de cálcio pelágico para reconstruções paleoceanográficas do Quaternário. **Quaternary Environmental Geosciences**, 7, n. 1-2, 2016.

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**, University of Texas, 1992.

PLANTE, A. F.; FERNÁNDEZ, J. M.; LEIFELD, J. Application of thermal analysis techniques in soil science. **Geoderma**, 153, n. 1-2, p. 1-10, 2009.

POMAKHINA, E.; DENELEE, D.; GAILLOT, A.-C.; PARIS, M. *et al.* ²⁹Si solid state NMR investigation of pozzolanic reaction occurring in lime-treated Ca-bentonite. **Cement and Concrete Research**, 42, n. 4, p. 626-632, 2012/04/01/ 2012.

POMARO, B.; GRAMEGNA, F.; CHERUBINI, R.; DE NADAL, V. *et al.* Gamma-ray shielding properties of heavyweight concrete with Electric Arc Furnace slag as aggregate: an experimental and numerical study. **Construction and Building Materials**, 200, p. 188-197, 2019.

QASRAWI, H. Hardened Properties of Green Self-Consolidating Concrete Made with Steel Slag Coarse Aggregates under Hot Conditions. **Materials Journal**, 117, n. 1, 2020.

RANDHAWA, K.; CHAUHAN, R., 2021, **Investigating Strength Behaviour of Pond Ash as a Construction fill material**. IOP Publishing. 012085.

SÁEZ DEL BOSQUE, I. F.; VAN DEN HEEDE, P.; DE BELIE, N.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I. *et al.* Carbonation of concrete with construction and demolition waste based recycled aggregates and cement with recycled content. **Construction and Building Materials**, 234, p. 117336, 2020/02/20/ 2020.

SANTAMARIA, A.; FALESCHINI, F.; GIACOMELLO, G.; BRUNELLI, K. *et al.* Dimensional stability of electric arc furnace slag in civil engineering applications. **Journal of Cleaner Production**, 205, p. 599-609, 2018/12/20/ 2018.

SANTAMARÍA, A.; GARCÍA-LLONA, A.; REVILLA-CUESTA, V.; PIÑERO, I. *et al.* Bending tests on building beams containing electric arc furnace slag and alternative binders and manufactured with energy-saving placement techniques. **Structures**, 32, p. 1921-1933, 2021/08/01/ 2021.

SANTAMARÍA, A.; ORTEGA-LÓPEZ, V.; SKAF, M.; CHICA, J. A. *et al.* The study of properties and behavior of self compacting concrete containing Electric Arc Furnace Slag (EAFS) as aggregate. **Ain Shams Engineering Journal**, 11, n. 1, p. 231-243, 2020/03/01/ 2020.

SEBBAR, N.; LAHMILI, A.; BAHI, L.; OUADIF, L., 2020, **Treatment of clay soils with steel slag, in road engineering**. EDP Sciences. 02017.

SERRA, M. F.; CONCONI, M. S.; SUÁREZ, G.; AGIETTI, E. *et al.* Firing transformations of an argentinean calcareous commercial clay. 59, p. 254-261, 2013.

SHAHSAVANI, S.; VAKILI, A. H.; MOKHBERI, M. Effects of freeze-thaw cycles on the characteristics of the expansive soils treated by nanosilica and Electric Arc Furnace (EAF) slag. **Cold Regions Science and Technology**, 182, p. 103216, 2021/02/01/ 2021.

SHEEN, Y.-N.; LE, D.-H.; LAM, M. N.-T. Performance of Self-compacting Concrete with Stainless Steel Slag Versus Fly Ash as Fillers: A Comparative Study. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, 2021.

SIEWERT, C.; KUČERÍK, J. Practical applications of thermogravimetry in soil science. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 120, n. 1, p. 471-480, 2015/04/01 2015.

SILVA, H. C.; MELO, F. P. J.-. CARBONATAÇÃO DO CONCRETO: Análise comparativa da profundidade de carbonatação em concretos com agregados convencionais e reciclados. 2020.

SKAF, M.; PASQUINI, E.; REVILLA-CUESTA, V.; ORTEGA-LÓPEZ, V. Performance and Durability of Porous Asphalt Mixtures Manufactured Exclusively with Electric Steel Slags. **Materials**, 12, n. 20, p. 3306, 2019.

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 and Recycling**, 173, p. 105740, 2021/10/01/ 2021.

SOSA, I.; THOMAS, C.; POLANCO, J. A.; SETIÉN, J. *et al.* High Performance Self-Compacting Concrete with Electric Arc Furnace Slag Aggregate and Cupola Slag Powder. **Applied Sciences**, 10, n. 3, p. 773, 2020.

TAMAYO, P.; PACHECO, J.; THOMAS, C.; DE BRITO, J. *et al.* Mechanical and Durability Properties of Concrete with Coarse Recycled Aggregate Produced with Electric Arc Furnace Slag Concrete. **Applied Sciences**, 10, n. 1, p. 216, 2020.

THIEBAUT, Y.; MULTON, S.; SELIER, A.; LACARRIÈRE, L. *et al.* Effects of stress on concrete expansion due to delayed ettringite formation. **Construction and Building Materials**, 183, p. 626-641, 2018/09/20/ 2018.

TOKARSKI, D.; WIESMEIER, M.; DOLEŽALOVÁ WEISSMANNOVÁ, H.; KALBITZ, K. *et al.* Linking thermogravimetric data with soil organic carbon fractions. **Geoderma**, 362, p. 114124, 2020/03/15/ 2020.

TRAVEN, K.; ČEŠNOVAR, M.; DUCMAN, V. Particle size manipulation as an influential parameter in the development of mechanical properties in electric arc furnace slag-based AAM. **Ceramics International**, 45, n. 17, p. 22632-22641, 2019.

VARGA, G. J. E. The structure of kaolinite and metakaolinite. 59, n. 1, p. 6-9, 2007.

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, n. 3, p. 2687-2700, 2021.

WANG, D.; ZHU, J.; HE, F. J. C.; MATERIALS, B. CO₂ carbonation-induced improvement in strength and microstructure of reactive MgO-CaO-fly ash-solidified soils. 229, p. 116914, 2019.

WANG, L.; HAN, J.; YIN, X.; LIU, S. Effect of moisture content and shearing speed on shear zone structure in fine-grained soils at large displacement. **Arabian Journal of Geosciences**, 13, n. 6, p. 247, 2020/03/05 2020.

WANG, Y.; LU, S.; REN, T.; LI, B. Bound water content of air-dry soils measured by thermal analysis. **Soil Science Society of America Journal**, 75, n. 2, p. 481-487, 2011.

World Bank, 2019. **What a waste: a global review of solid waste management**. Urban Development Series. USA.

WU, J.; LIU, Q.; DENG, Y.; YU, X. *et al.* Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways. **Soils Foundations**, 59, n. 4, p. 955-965, 2019.

XU, L.; ZHA, F.; LIU, C.; KANG, B. *et al.* Experimental investigation on carbonation behavior in lime-stabilized expansive soil. 2020, 2020.

YEIH, W.; CHANG, J. J. The influences of cement type and curing condition on properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag as aggregates. **Construction and Building Materials**, 197, p. 813-820, 2019.

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**, 154, p. 23-33, 2017.

ZHA, F.; LIU, C.; KANG, B.; XU, L. *et al.* Effect of Carbonation on the Leachability of Solidified/Stabilized Lead-Contaminated Expansive Soil. **Advances in Civil Engineering**, 2021, p. 8880818, 2021/02/11 2021.

ZHANG, N.; WU, L.; LIU, X.; ZHANG, Y. Structural characteristics and cementitious behavior of basic oxygen furnace slag mud and electric arc furnace slag. **Construction and Building Materials**, 219, p. 11-18, 2019/09/20/ 2019.

ZHANG, Y.; DANIELS, J. L.; CETIN, B.; BAUCOM, I. K. Effect of Temperature on pH, Conductivity, and Strength of Lime-Stabilized Soil. 32, n. 3, p. 04019380, 2020.

ZHOU, Y.; PAN, L.; TANG, Q.; ZHANG, Y. *et al.* Evaluation of Carbonation Effects on Cement-Solidified Contaminated Soil Used in Road Subgrade. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2018, p. 5271324, 2018/02/04 2018.

ZIAEE, S. A.; BEHNIA, K. Evaluating the effect of electric arc furnace steel slag on dynamic and static mechanical behavior of warm mix asphalt mixtures. **Journal of Cleaner Production**, 274, p. 123092, 2020/11/20/ 2020.

ZUMRAWI, M. M.; BABIKIR, A. A.-A. A. Laboratory Study of Steel Slag Used for Stabilizing Expansive Soil. **University Of Khartoum Engineering Journal**, 6, n. 2, 2017.

4. ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO COMPOSTO POR UMA CAMADA DE SOLO ESTABILIZADO COM EAEP

Resumo: Diante do rápido crescimento populacional e da industrialização, a mitigação dos efeitos danosos causados pela emissão de CO₂ torna-se um tema de destaque a ser estudado. Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo realizar uma análise estrutural avaliando a influência da carbonatação de misturas solo-EAEP (Escória de Aciaria Elétrica Primária) utilizadas na camada de subleito de um pavimento asfáltico, visando obter um maior conhecimento sobre a durabilidade dessas misturas em longo prazo sob o efeito da carbonatação. Para isso, foram realizados ensaios de módulo de resiliência (MR) nas misturas solo-EAEP submetidas a dois processos de cura: i) cura em câmara úmida por 28 dias seguida de cura em câmara de carbonatação acelerada por mais 7, 14 e 28 dias e ii) cura somente em câmara úmida por 35, 42 e 56 dias. A análise estrutural foi realizada através do *software* AEMC, uma sub-rotina do *software* MeDiNa, sendo avaliadas: i) a deflexão no topo da camada de revestimento asfáltico (U_z), que indica a soma da contribuição de todas as camadas do pavimento para o surgimento do afundamento plástico nas trilhas de roda, ii) a deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico (ϵ_t), que indica a susceptibilidade ao trincamento por fadiga e iii) a deformação vertical no topo da camada de subleito (ϵ_v), que também está relacionada com a formação do afundamento plástico nas trilhas de roda. As análises estruturais foram realizadas com diversas estruturas de pavimento asfáltico, sendo que, para a primeira alternativa, foi adotado o pavimento dimensionado empiricamente pelo método convencional. O processo de cura por carbonatação aumentou os valores de MR, devido à formação de carbonato de cálcio, observado nas análises de DRX e MEV, o que proporcionou uma redução da deflexão e das deformações analisadas, minimizando os efeitos da formação de afundamento nas trilhas de roda e de trincamento por fadiga, resultando em um pavimento asfáltico mais durável.

Palavras-chave: Análise mecânica. Carbonatação acelerada. Durabilidade de solos estabilizados. Escória de aciaria elétrica primária (EAEP).

Abstract: Faced with rapid population growth and industrialization, the mitigation of the harmful effects caused by CO₂ emissions becomes a prominent topic to be studied. This research aimed to carry out a structural analysis evaluating the influence of carbonation of soil-electric arc furnace slag (EAFS) mixtures, used in the subgrade layer of a asphalt pavement, in order to obtain greater knowledge about the long-term durability of these mixtures under the effect of carbonation. For this, resilient modulus (RM) tests were carried out on the soil-EAFS mixtures submitted to two curing processes: i) curing in a wet chamber for 28 days followed by curing in an accelerated carbonation chamber for another 7, 14 and 28 days and ii) cure only in a wet chamber for 35, 42 and 56 days. The structural analysis was performed using the AEMC software, a subroutine of the MeDiNa software, being evaluated: i) the deflection at the top of the asphalt layer (U_z), which indicates the sum of the contribution of all pavement layers to the appearance of rutting, ii) the horizontal tensile strain in the lower fiber of the asphalt layer (ϵ_t), which indicates the susceptibility to fatigue cracking and iii) the vertical deformation at the top of the subgrade layer (ϵ_v), which is also related to the formation of rutting. The structural analyzes were carried out with several flexible pavement structures, and for the first alternative, the flexible pavement empirically dimensioned by the conventional method was adopted. The carbonation curing process increased the MR values, due to the formation of calcium carbonate, observed in the XRD and SEM analyses, which provided a reduction in the deflection and strains analyzed, minimizing the effects of the formation of rutting and fatigue cracking, resulting in a more durable asphalt pavement.

Key-words: Mechanistic analysis. Accelerated carbonation. Durability of stabilized soils. Electric arc furnace slag (EAFS).

4.1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional mundial, aliado à urbanização e à industrialização, especialmente em regiões metropolitanas, tem fomentado um crescimento considerável nas atividades de construção. Projetos de infraestrutura de transportes, sobretudo os relacionados à pavimentação de estradas, são atividades de construção contínuas nas áreas urbanas para atender às necessidades da população em crescimento (YAGHOUBI *et al.*, 2021). Devido a limitações espaciais e, conseqüentemente, a alinhamentos de estradas pré-determinados, pode ser necessário que os pavimentos sejam construídos sobre solos de baixa capacidade de suporte, os quais podem gerar, em longo prazo, patologias no pavimento, como o trincamento por fadiga e o afundamento plástico nas trilhas de roda.

A emissão de CO₂ liberada globalmente por diferentes setores industriais, como as indústrias de construção, tem aumentado rapidamente, adicionando mais gases de efeito estufa ao meio ambiente e impactando negativamente as mudanças climáticas. Diante disso, capturar e sequestrar CO₂ tornou-se uma necessidade vital para compensar a emissão desse gás e prevenir conseqüências adversas do aquecimento global (HAY; KASHWANI; CELIK, 2021).

Tradicionalmente, a fim de melhorar o desempenho de solos de baixa capacidade de suporte, cal e cimento têm sido utilizados como agentes estabilizadores (YAGHOUBI *et al.*, 2021). A estabilização com cal é um dos mais antigos métodos utilizados na estabilização de solos, a qual promove um aumento nas propriedades mecânicas desses materiais (BOZBEY *et al.*, 2018). Além disso, a estabilização do solo otimiza o uso de materiais locais, ajudando assim a construir estruturas confiáveis, minimizando a distância de transporte (GAJEWSKA; KRASZEWSKI; RAFALSKI, 2018).

Vários tipos de escórias obtidas dos diferentes processos de fabricação do aço já são utilizados como agentes estabilizadores de solos, incluindo a escória de alto forno (AFRASIABIAN *et al.*, 2019; BUDDHDEV; TIMANI, 2021; PHUMMIPHAN *et al.*, 2018; RONDÓN-QUINTANA; RUGE-CÁRDENAS; FARIAS, 2019), a escória de aciaria de forno básico à oxigênio (CIKMIT *et al.*, 2018; KANG *et al.*, 2019), a escória de aciaria elétrica primária (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; ISMAIL; AWAD; MWAIFY, 2019) e a escória de aciaria elétrica secundária (BRAND *et al.*, 2020; XU; YI, 2020). As escórias são subprodutos

parcialmente cristalinos dos processos siderúrgicos para a produção de aço em que os constituintes metálicos e não metálicos são separados do minério bruto (TRAVEN; ČEŠNOVAR; DUCMAN, 2019).

No âmbito da estabilização química de solos, a durabilidade corresponde à manutenção das propriedades de engenharia da mistura acima dos valores mínimos de projeto durante a vida útil da construção na qual foi empregada (VITALE *et al.*, 2021). Para os solos tratados quimicamente com materiais à base de cal, por exemplo, as diferentes causas de diminuição da durabilidade incluem variações sazonais de umidade (ciclos de umedecimento e secagem), chuva ácida, ciclos de congelamento e degelo, lixiviação de cálcio e carbonatação de hidróxido de cálcio e de compostos cimentícios (CHAKRABORTY; NAIR, 2020; PADMARAJ; ARNEPALLI, 2018; 2021; XU *et al.*, 2020). XU *et al.* (2020) ressaltam que a carbonatação é uma das propriedades chave para a avaliação da durabilidade de materiais à base de cal e cimento.

Os materiais à base de cal apresentam uma grande desvantagem em relação àqueles à base de cimento: endurecem muito lentamente por carbonatação, razão pela qual apresentam baixa resistência em curto prazo. Isso coloca sérias dificuldades para o desenvolvimento de campanhas experimentais, pois é necessário esperar vários meses ou mesmo anos para atingir uma carbonatação considerável de hidróxido de cálcio e, portanto, propriedades estáveis (SILVA *et al.*, 2021). Uma forma possível de obter esses resultados em curto prazo é usando o processo de carbonatação acelerada, isto é, curando esses materiais em um ambiente rico em CO₂ para que a carbonatação possa progredir mais rapidamente (ERGENÇ; FORT, 2018).

Bhuvaneshwari; Robinson e Gandhi (2019) estudaram a influência da adição de cal no módulo de resiliência de uma amostra de solo com predominância de partículas de tamanho argila, submetida a um processo de cura selada em câmara úmida por 3, 14 e 28 dias. Observou-se que, com o incremento do teor de cal, os valores de módulo de resiliência também aumentaram, sendo que esse aumento foi atribuído aos produtos de reações pozolânicas.

Nakarai e Yoshida (2015) estudaram um solo arenoso tratado com cimento, submetido a processos de cura selada em câmara úmida, cura ao ar e cura em carbonatação acelerada. Observou-se que a resistência e o módulo de elasticidade aumentaram significativamente para

os dois processos que envolveram a exposição ao ar. O aumento de resistência e módulo de elasticidade na câmara de carbonatação acelerada mostrou que, em longo prazo, o principal fator responsável por esse aumento é o processo de carbonatação.

Diante do exposto, o objetivo geral desta pesquisa foi realizar uma análise estrutural avaliando a influência da carbonatação acelerada de misturas solo-EAEP utilizadas na camada de subleito de um pavimento asfáltico, visando obter um maior conhecimento sobre a durabilidade de misturas solo-EAEP em longo prazo. Como objetivos específicos, relacionados ao objetivo geral, citam-se: i) avaliação da influência do MR nas análises estruturais realizadas; ii) interpretação dos resultados da análise estrutural com base nas características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais das misturas solo-EAEP.

4.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A escória de aciaria elétrica primária (EAEP), em particular, é produzida por um forno elétrico à arco no refinamento primário da produção do aço bruto. Nesse processo, uma corrente elétrica é usada para aquecer a cal e/ou a dolomita até o estado líquido. Ao longo do processo de fusão, a cal e a dolomita são combinadas com sucata não metálica para formar uma escória líquida, que flutua no topo do material fundido e posteriormente é separada e resfriada, formando a EAEP. A composição química da EAEP varia conforme o tipo de tratamento metalúrgico, as condições e os aditivos usados durante o processo de fabricação (EUROSLAG, 2019).

A despeito da perspectiva de seu aproveitamento, a utilização das escórias de aciaria pode enfrentar obstáculos devido ao seu potencial expansivo. A instabilidade volumétrica pode limitar a aplicabilidade das escórias de aciaria elétrica devido à presença de óxidos livres em sua composição, como o óxido de cálcio (CaO) (SANTAMARIA *et al.*, 2018). A expansibilidade é um efeito do processo de hidratação de óxidos de cálcio e de magnésio, os quais se transformam em hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, respectivamente, sendo que o volume dos hidróxidos é aproximadamente o dobro do volume dos óxidos. Os efeitos deletérios dessa expansão podem ser controlados caso a reação já tenha acontecido anteriormente, em um processo de cura do material (BRAND *et al.*, 2020; LAM; LE; JARITNGAM, 2018; LI *et al.*, 2020).

Observou-se através da literatura técnica que o teor de óxido de cálcio nas EAEPs utilizadas em pesquisas recentes variou entre 20 e 35% (BALAGUERA; BOTERO, 2020; DIAS *et al.*, 2020; ISMAIL; AWAD; MWAIFY, 2019; LI *et al.*, 2020; SHAHSAVANI; VAKILI; MOKHBERI, 2021; SOSA *et al.*, 2020; TRAVEN; ČEŠNOVAR; DUCMAN, 2019). No entanto, nem todas as escórias de aço sofrem expansão, e as composições químicas variadas excluem qualquer generalização de sua expansividade (NETINGER *et al.*, 2014; QASRAWI, 2020; SANTAMARÍA *et al.*, 2021).

O óxido de cálcio (CaO) promove múltiplas ações que alteram as propriedades de um solo. Inicialmente, a adição de CaO ao solo reduz o teor de umidade do solo devido à sua reação de hidratação [$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{calor}$]. Essa reação eleva o pH e o teor de íons Ca^{2+} da água intersticial do solo em razão da dissociação do hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$]. A partir disso, ocorre a troca catiônica entre os íons adsorvidos presentes na superfície das partículas de argila e os cátions de cálcio fornecidos pelo óxido de cálcio, resultando em uma dupla camada difusa de menor espessura, com menores forças de repulsão, gerando como consequência a floculação da fração argilosa do solo (DENELEE *et al.*, 2021).

Simultaneamente, valores elevados de pH induzem lentamente a dissolução de minerais, como sílica, alumina e feldspatos, os quais se combinam com cálcio e água, produzindo compostos cimentícios, como silicato de cálcio hidratado (C-S-H), silico-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) (CHITRAGAR; SHIVAYOGIMATH; MULANGI, 2021; DE WINDT; DENELEE; MAUBEC, 2014; DENELEE *et al.*, 2021; POMAKHINA *et al.*, 2012; VITALE *et al.*, 2021).

A carbonatação é um fenômeno que ocorre naturalmente em qualquer composto cimentício ou pozolânico quando em contato com o ar (DENELEE *et al.*, 2021). O processo da carbonatação ocorre da superfície do material para dentro, em cinco etapas: (i) difusão do CO_2 gasoso pelos poros do material; (ii) dissolução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na água, liberando íons Ca^{2+} e OH^- ; (iii) absorção e dissolução de CO_2 na água, formando ácido carbônico (H_2CO_3); (iv) dissociação do ácido carbônico em íons bicarbonato (HCO_3^-) e íons carbonato (CO_3^{2-}); (v) reação entre os íons Ca^{2+} e CO_3^{2-} formando CaCO_3 (CIZER *et al.*, 2012; MOOREHEAD, 1986; SILVA *et al.*, 2021; VAN BALEN; VAN GEMERT, 1994).

Destas, a etapa (iii) é a que controla a velocidade da carbonatação do material, pois é a mais lenta (CIZER, 2016). A difusividade do dióxido de carbono em um material sólido depende da abertura da estrutura porosa e, portanto, da presença de água nos poros. Na água, essa difusividade é aproximadamente 10.000 vezes menor que no ar, sendo a carbonatação retardada quando o teor de umidade do material aumenta (DENELEE *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2020).

Nos métodos mecanístico-empíricos de projeto de pavimentos asfálticos, os critérios de ruptura geralmente utilizados são o trincamento por fadiga (*fatigue cracking*) e o afundamento plástico nas trilhas de roda (*rutting*) (HUANG, 2004; LIN *et al.*, 2022; YARAHMADI; SHAFABAKHSH; ASAKEREH, 2022; ZAREI *et al.*, 2022).

O trincamento por fadiga de pavimentos asfálticos é baseado na deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico (HUANG, 2004). O desempenho em fadiga de misturas asfálticas pode ser afetado por uma série de fatores, como um projeto estrutural inadequado, cargas pesadas repetidas, drenagem e qualidade de construção ruins, flutuações na temperatura ambiente e rigidez do ligante asfáltico devido ao envelhecimento em temperaturas baixas e intermediárias. O trincamento por fadiga é um dos problemas mais comuns em pavimentos asfálticos e geralmente ocorre quando as estruturas do pavimento sofrem carregamentos repetidos, especificamente em temperaturas intermediárias na faixa de 10°C a 30°C (ABD DURAIID; AL-KHALID, 2022).

O afundamento plástico nas trilhas de roda (ATR) ocorre somente nos pavimentos asfálticos (HUANG, 2004), sendo um dos maiores problemas enfrentados por este tipo de pavimento (DU *et al.*, 2018). Essa patologia normalmente se estende por todas as camadas do pavimento (DOMINGOS; FAXINA, 2016; ISLAM; TAREFDER, 2020). A densidade de tráfego, a velocidade e as cargas dos veículos influenciam na geração do ATR do pavimento, assim como as condições climáticas. O desempenho do pavimento é fortemente dependente das propriedades do solo do subleito, sendo que pavimentos construídos sobre solos de baixa capacidade de suporte potencializam a formação do ATR, o que resulta em um rápido aumento da necessidade de manutenção (ALHARBI *et al.*, 2022; BILDIK; LAMAN, 2020). Portanto,

deve-se analisar a deflexão no topo do revestimento asfáltico e a deformação vertical visando obter informações detalhadas sobre a formação do ATR.

A fim de tornar os solos de baixa capacidade de suporte viáveis tecnicamente do ponto de vista da pavimentação, considerando seu comportamento resiliente, diversos estudos têm sido realizados avaliando a adição de cal (AL-MAHBASHI *et al.*, 2021; BHUVANESHWARI; ROBINSON; GANDHI, 2019; HAN; DONG; XU, 2021; IKEAGWUANI; NWONU, 2019; NWONU; IKEAGWUANI, 2021; VENKATESH *et al.*, 2021), de cimento (GAJEWSKA; KRASZEWSKI; RAFALSKI, 2018; GARCÍA; SALAMANCA, 2020; LU *et al.*, 2020; ZABIELSKA-ADAMSKA; WASIL; DOBRZYCKI, 2021) e de resíduos de diversos tipos a esses solos, tais como fibra de vidro reciclado (YAGHOUBI *et al.*, 2021), fibras de plástico (HAFEZ *et al.*, 2019; HASSAN; RASUL; SAMIN, 2021), resíduos de construção e demolição (LUKIANCHUKI *et al.*, 2021), resíduo de pó de mármore (ALNUNU; NALBANTOGLU, 2021), resíduo de carbetão de cálcio (NOOLU; MUDAVATH; PILLAI, 2021) e pó de forno de cimento (SALAHUDEEN *et al.*, 2022).

De acordo com Islam e Tarefder (2020), o módulo de resiliência é o parâmetro mais importante para o projeto de dimensionamento de um pavimento através dos métodos mecanístico-empíricos, o qual, segundo Santos *et al.* (2020), está diretamente associado a um dos principais mecanismos de ruptura recorrentes em pavimentos asfálticos brasileiros: o trincamento por fadiga.

No entanto, ainda não há na literatura técnica estudos que avaliaram os efeitos da carbonatação no comportamento resiliente de misturas de solo-EAEP e de seu consequente impacto na avaliação estrutural de um pavimento asfáltico, constituindo este o objetivo principal deste trabalho.

4.3. MATERIAIS E MÉTODOS

4.3.1. Materiais

4.3.1.1. Amostras de Solos

Para a realização desta pesquisa, foram utilizadas duas amostras de solos, designadas S1 e S2, nas quais predominam partículas de argila e areia, respectivamente, as quais foram

provenientes de jazidas de empréstimo localizadas no Município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil. A coleta e a preparação dessas amostras foram realizadas conforme as normas técnicas PRO 003 (DNER, 1994a) e NBR 6457 (ABNT, 2016a), respectivamente.

4.3.1.2. Amostra de escória de aciaria elétrica primária

A amostra bruta de escória de aciaria elétrica primária (EAEP) foi fornecida por uma empresa que atua no setor de fabricação de tubos metálicos, localizada na Região do Alto Paraopeba, Estado de Minas Gerais, Brasil. A coleta da amostra da EAEP seguiu as recomendações da norma técnica NBR 10007 (ABNT, 2004).

4.3.2. Caracterizações geotécnica e física

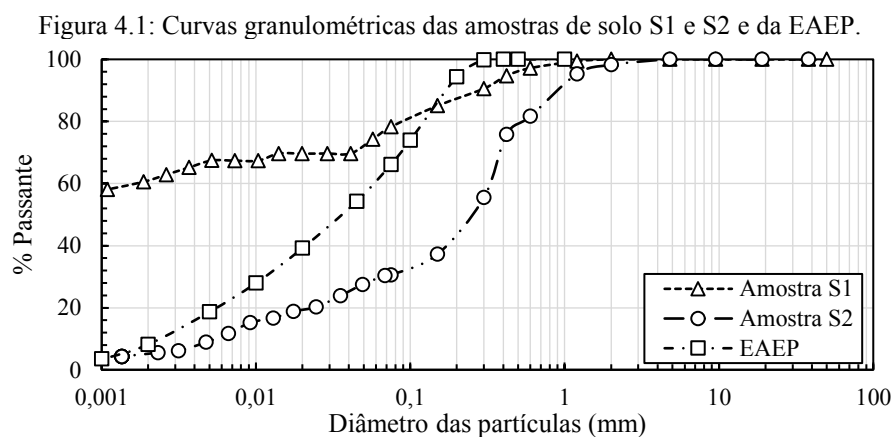
Com a finalidade de se realizar a caracterização geotécnica das amostras de solo supracitadas, foram realizados os seguintes ensaios de laboratório: i) Análise granulométrica conjunta, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016b); ii) Limite de liquidez (LL), segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016c); iii) Limite de plasticidade (LP), segundo a NBR 7180 (ABNT, 2016d); iv) Massa específica dos grãos do solo (ρ_s), segundo a NBR 6458 (ABNT, 2016e); e v) Compactação na energia do Proctor normal, segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016f), para fins de determinação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d,max}$) e da umidade ótima (w_{ot}) das amostras de solo compactadas. Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resumo dos resultados da caracterização e classificação geotécnicas das amostras de solo analisadas.

Parâmetro	S1	S2
% argila ($\phi < 0,002$ mm)	61	5
% silte ($0,002$ mm $< \phi < 0,06$ mm)	14	24
% areia ($0,06$ mm $< \phi < 2$ mm)	25	68
% pedregulho (2 mm $< \phi < 60$ mm)	0	3
LL (%)	78	36
LP (%)	43	18
IP (%)	35	18
ρ_s (g/cm ³)	2,869	2,657
$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	13,95	15,57
w_{ot} (%)	31,03	15,00
TRB	A-7-5 (20)	A-2-6 (1)
USC	MH	SC
MCT	LA'	NA'

A Figura 4.1 apresenta as curvas granulométricas das amostras de solo S1 e S2, as quais foram classificadas (Tabela 4.1) segundo a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado,

Tropical), de acordo com a CLA 259 (DNER, 1996a), e segundo os sistemas de classificação de solos TRB (*Transportation Research Board*), conforme a M 145-91 (AASHTO, 2017), e USC (*Unified Soil Classification*), conforme a D2487 (ASTM, 2017).



As curvas de distribuição granulométrica permitem concluir que a amostra de solo S1 possui um alto teor de partículas de tamanho argila, enquanto que, na amostra de solo S2, predominam as partículas de tamanho areia.

A fim de aumentar a superfície específica da EAEP, a amostra bruta foi moída em um moinho Los Angeles, utilizado para a determinação da abrasão em agregados graúdos, por um período de duas a três horas, sendo utilizada a porção passante na peneira de abertura 0,6 mm (peneira #30), tamanho semelhante ao que foi utilizado em estudos prévios (AKINWUMI, 2014; MAHMUDI; ALTUN; ESKISAR, 2021; MANSO *et al.*, 2013), a fim de alcançar valor próximo de 0,18 m²/g para a superfície específica, valor esse que foi utilizado para escória de aciaria no estudo de Sheen; Le e Lam (2021).

A redução e a preparação da amostra de EAEP moída foram realizadas conforme as normas técnicas PRO 199 (DNER, 1996b) e NBR 6457 (ABNT, 2016a), respectivamente.

A caracterização física da amostra de EAEP foi realizada conforme normas técnicas para cimento Portland adaptadas, a saber: i) finura por peneiramento, de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2012b); ii) superfície específica pelo método de Blaine, conforme a NBR 16372 (ABNT, 2015); iii) massa específica real, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017); e iv) distribuição granulométrica do material depois de passado na peneira de 0,6 mm (Figura 4.1),

determinada por difração a laser, conforme a norma ISO 13320 (ISO, 2020). Esses resultados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados da caracterização física da amostra de EAEP moída.

Ensaio	Resultado
Índice de finura por peneiramento	24,88%
Superfície específica	0,20 m ² /g
Massa específica real	3,7 g/cm ³

4.3.3. Caracterizações química, mineralógica e morfológica

As amostras de solos e de EAEP foram submetidas à análise de Fluorescência de Raios-X (FRX), sendo os resultados apresentados na Tabela 4.3, juntamente com o ensaio de perda ao fogo que foi realizado conforme a NBR NM 18 (ABNT, 2012c). A técnica de Difração de Raios-X (DRX) foi utilizada para a determinação das constituições mineralógicas das amostras dos materiais analisados, e para isso foram realizadas medidas teta-2teta na faixa de 5 a 80 graus, utilizando passo de 0,05 graus, com 1 segundo por passo. Os resultados da análise de DRX são apresentados nas Figuras 4.2a, 4.2b e 4.2c para as amostras de solo S1, S2 e EAEP, respectivamente.

Tabela 4.3: Composição química obtida por FRX e perda ao fogo das amostras de solos S1 e S2 e da EAEP.

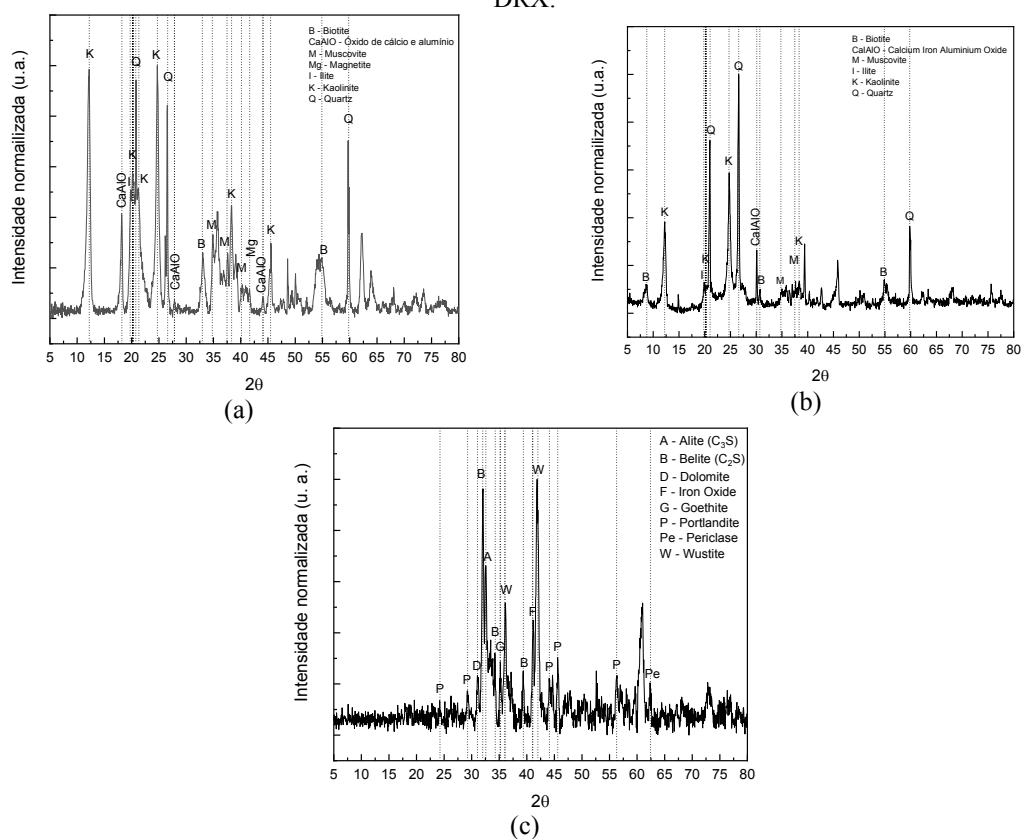
Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	PF* (%)
S1	27,11	24,52	12,47	0,02	1,28	0,07	1,55	1,53	0,04	0,27	11,49
S2	36,27	24,31	1,92	0,17	1,41	1,30	2,40	0,18	0,03	0,22	4,19
EAEP	21,35	5,17	24,50	33,15	1,01	0,30	0,00	0,64	0,18	0,32	0,19

*Perda ao fogo

Observou-se a predominância dos compostos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ para a amostra de solo S1, os quais também foram encontrados na amostra de solo S2. As amostras de solo são caulínicas, como a maioria dos solos brasileiros, portanto seus principais constituintes são a caulinita e o quartzo (LOPES *et al.*, 2019). Conseqüentemente, altos níveis de SiO₂ e Al₂O₃ foram observados. A presença de magnetita na amostra de solo S1 é o principal fator para sua coloração avermelhada (CASTAGNOTTO *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2021; MATHIAN *et al.*, 2020). A caulinita, presente na amostra de solo S2, é um silicato de alumínio hidratado que

pode se apresentar sob as cores branco, branco-acinzentado ou levemente colorido (VARGA, 2007). A coloração da amostra de solo S2 é branco-acinzentado com baixa pigmentação amarela, a qual também foi observada em solos argilosos com predominância do argilomineral caulinita estudados por outros autores (AMIRI; NAZIR; DEHGHANBANADAKI, 2018; MORSI *et al.*, 2019).

Figura 4.2: Difratogramas das amostras de solo S1(a), S2 (b) e da amostra de EAEP (c) obtidos por DRX.



Através do difratograma da amostra de EAEP, observou-se uma ampla gama de minerais constituintes do material. Os picos de alta intensidade de óxido de cálcio (*lime*) e óxido de ferro (*wustite*) confirmaram os resultados da análise por fluorescência de raios-X. A presença de óxido de cálcio e óxido de magnésio pode induzir problemas de expansão volumétrica devido ao processo de carbonatação quando em contato com ambiente aquoso (DENELE *et al.*, 2021), enquanto que a presença de óxidos de ferro garante elevadas dureza e massa específica para a escória de aciaria elétrica (ARRIBAS *et al.*, 2015).

Os compostos químicos e suas respectivas porcentagens presentes na amostra de EAEP estão em concordância com os encontrados na literatura técnica (BRAND *et al.*, 2020; ISMAIL; AWAD; MWAFY, 2019; LI *et al.*, 2020; ZIAEE; BEHNIA, 2020). O valor do índice de hidraulicidade $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO})$ foi de 1,49, classificando a EAEP como fortemente hidráulica (BORGES MARINHO *et al.*, 2017).

Para a amostra de EAEP, foram também realizados os ensaios de Cal livre, segundo a NBR NM 13 (ABNT, 2012d), e Resíduo insolúvel, de acordo com a NBR NM 15 (ABNT, 2012e), os quais apresentaram os valores de 0,74% e 7,94%, respectivamente. O resultado da cal livre obtido, que se encontra abaixo de 1%, habilita o material para utilização em obras rodoviárias (GRAFFITTI, 2002).

As caracterizações microestruturais das amostras de solos e da amostra de EAEP foram realizadas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons secundários. As imagens microestruturais da amostra de solo S1 mostraram que o solo apresentou granulação fina (Figura 4.13a) com predominância de grãos de diâmetros menores que $2\mu\text{m}$ e com forma lamelar (Figura 4.13b). A amostra de solo S2 apresentou grãos de tamanhos maiores do que 0,1 mm, sendo esses de forma cúbica (Figura 4.4a), e seus finos apresentaram formas lamelares e prismáticas (Figura 4.14b).

A amostra de solo S1 apresenta uma estrutura mais compacta, quando comparada à amostra de solo S2, resultado de sua granulometria mais fina e do efeito da agregação de suas partículas através dos óxidos de ferro e de alumínio (WU *et al.*, 2019). Através das micrografias da amostra de EAEP (Figura 4.5a e Figura 4.5b), observou-se a presença de partículas com textura rugosa, morfologia levemente irregular. Estas características morfológicas, quando em mistura com amostras de solo, podem aumentar o grau de interação entre as partículas presentes no sistema solo-EAEP, proporcionando uma melhora nas propriedades mecânicas (BORGES MARINHO *et al.*, 2017; LOPES *et al.*, 2021).

Figura 4.3: Micrografias da amostra de solo S1 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.

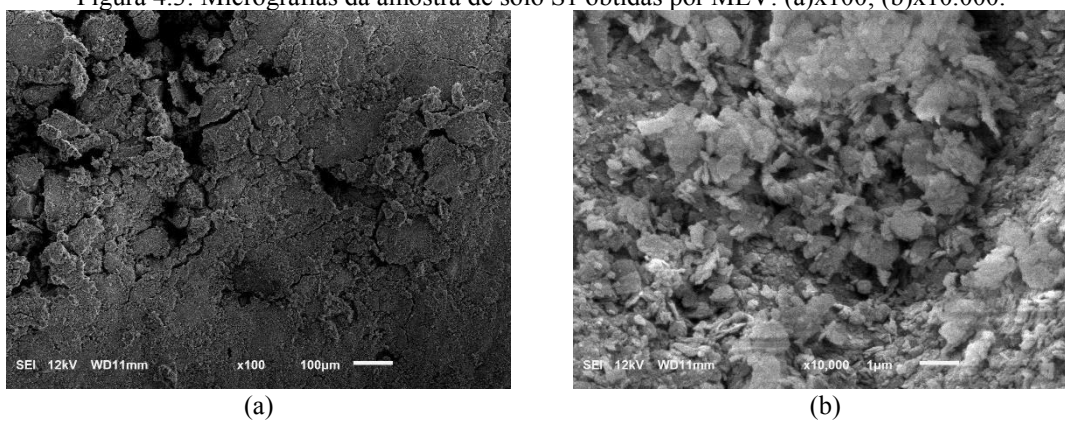


Figura 4.4: Micrografias da amostra de solo S2 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.

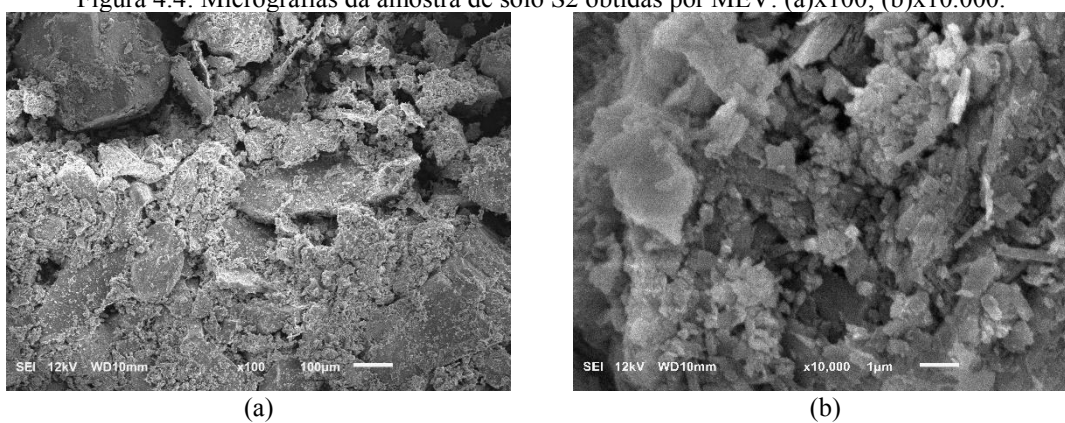
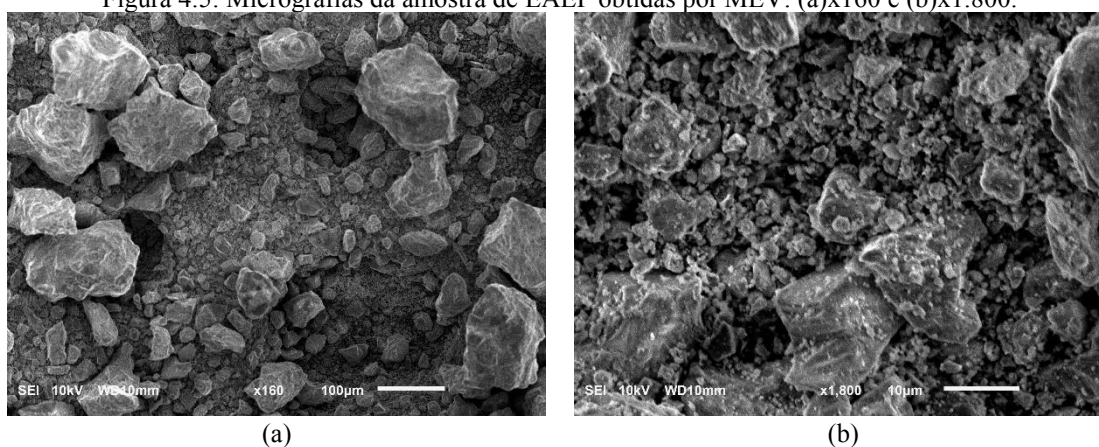


Figura 4.5: Micrografias da amostra de EAEP obtidas por MEV: (a)x160 e (b)x1.800.



O ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi realizado para se obter os elementos químicos presentes nas amostras de solos S1 e S2 e na amostra de EAEP (Tabela 4.4).

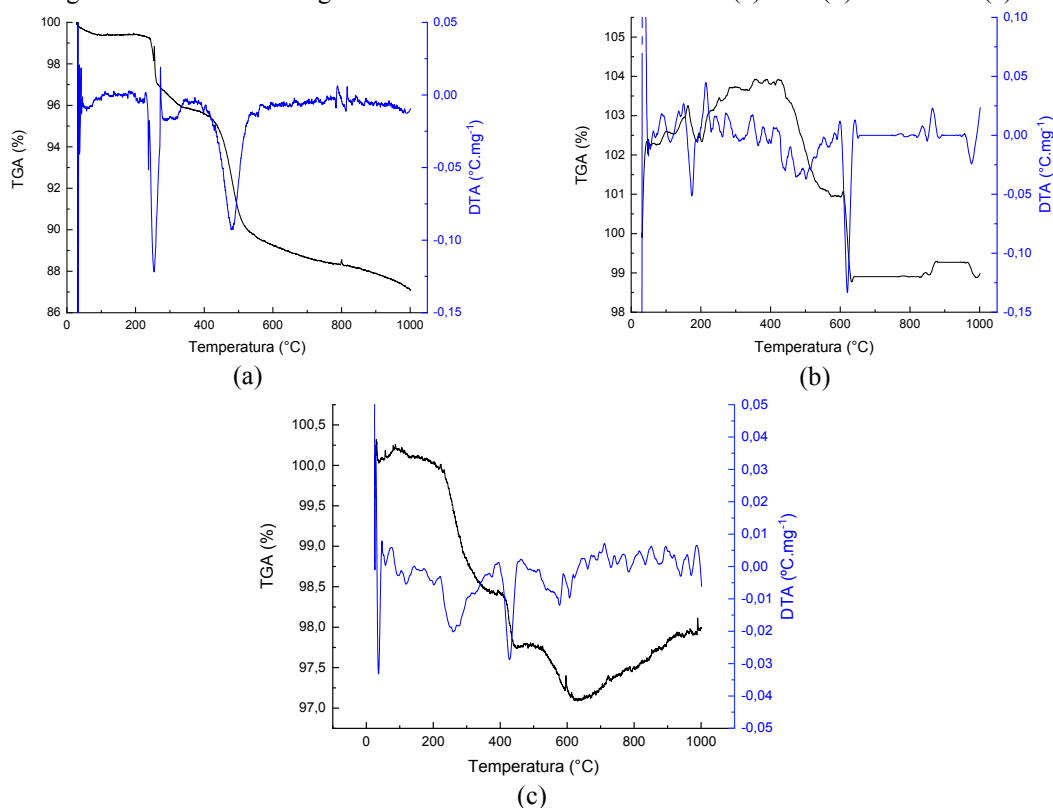
Tabela 4.4: Elementos químicos presentes nas amostras de solo S1 e S2 e de EAEP.

Fórmula química	% de massa		
	S1	S2	EAEP
C	9,39	9,94	3,51
O	39,89	41,58	35,17
Al	19,42	20,90	2,79
Si	16,07	23,77	5,80
Fe	15,22	-	-
Mg	-	0,82	2,65
K	-	3,00	0,03
Ca	-	-	29,57
Na	-	-	0,04
P	-	-	0,34
S	-	-	0,15
Mn	-	-	2,92

Os dados obtidos por EDS corroboraram os dados obtidos por FRX e DRX, mostrando que a amostra de solo S1 possui quantidade significativa de Ferro e que a amostra de solo S2 possui uma maior quantidade de Silício. Para a amostra de EAEP, a quantidade de cálcio se destaca, assim como foi apontado nos resultados de FRX e DRX.

As análises termogravimétricas foram executadas segundo a NBR 5753 (ABNT, 2016g), as quais são apresentadas nas Figuras 4.6a, 4.6b e 4.6c para as amostras de solo S1, S2 e para a amostra de EAEP, respectivamente.

Figura 4.6: Análise termogravimétrica das amostras de solos S1 (a) e S2 (b) e da EAEP (c).



Os registros da análise termogravimétrica são tradicionalmente divididos em quatro faixas de temperatura. As perdas de massa até 200 °C foram atribuídas à perda de água livre e de água adsorvida pelas partículas dos materiais (KUČERÍK *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2011). A faixa de temperatura de 200 a 450 °C descreve a decomposição de matéria orgânica (PLANTE; FERNÁNDEZ; LEIFELD, 2009; TOKARSKI *et al.*, 2020). Na faixa de temperatura de 390 a 650 °C, a perda de massa pode ser atribuída à desidroxilação de argilominerais como a Caulinita, embora a decomposição residual da matéria orgânica possa estar presente (ADENIYI *et al.*, 2020; AVET; SCRIVENER, 2020; ELHADJ; PERRIN, 2021; MAKÓ *et al.*, 2009; SERRA *et al.*, 2013; SIEWERT; KUČERÍK, 2015; TOKARSKI *et al.*, 2020).

Diante do exposto, a amostra de solo S1 apresentou dois picos de perda de massa, sendo o primeiro, na temperatura de 250 °C, correspondente à fase de decomposição de matéria orgânica, e o segundo, na temperatura de 480 °C, correspondente à perda de massa decorrente da decomposição e desidroxilação dos argilominerais, o que está em consonância com a elevada porcentagem de fração argila desse material. Para a amostra de solo S2, houve um pico na

temperatura de 190 °C, devido à evaporação de água adsorvida e um pico de alta intensidade na temperatura de 600 °C, devido à decomposição e desidroxilação dos argilominerais.

A perda de massa para a amostra de EAEP na faixa de temperatura de 100°C a 400°C representa a desidratação de C-S-H, C-A-H e Mg(OH)₂. A faixa de temperatura de 400°C a 500°C representa a desidratação de Ca(OH)₂, e a faixa de temperatura de 500°C a 1000°C representa a perda de CO₂ pela descarbonatação do CaCO₃ (BRAND *et al.*, 2020; MAHOUTIAN; GHOULEH; SHAO, 2014). A amostra deste estudo apresentou alterações mais significativas de massa nas duas primeiras regiões, sendo que a decomposição de Ca(OH)₂ corrobora os resultados dos ensaios de FRX e DRX, indicando a presença de compostos à base de cálcio.

4.3.4. Métodos

Utilizou-se neste estudo uma mistura de 80% de solo e 20% de EAEP, em relação à massa seca da mistura, para as amostras de solo S1 e S2. Essa dosagem foi obtida através de um estudo de planejamento experimental de misturas (DOE – *Design Of Experiments*), em rede simplex-centróide, composto por três componentes (solo, EAEP e cinza volante), visando a determinação das proporções de cada um desses componentes com a finalidade de maximizar as propriedades mecânicas resistência à compressão simples (RCS), índice CBR (*California Bearing Ratio*) e módulo de resiliência (MR).

Os resultados de cada mistura selecionada, através do planejamento experimental, foram inseridos no *software* Minitab 18 para que pudessem ser determinadas as superfícies de resposta e os correspondentes modelos matemáticos para cada propriedade, considerando que o material estivesse empregado na camada de reforço de subleito de um pavimento asfáltico. Posteriormente, foi utilizada a função Desejabilidade, através do mesmo *software*, para a determinação da dosagem ótima dos componentes, a qual resultou, para ambas as amostras de solo (S1 e S2), nas porcentagens de 80% de solo, 20% de EAEP e 0% de cinza volante, sendo, portanto, a dosagem utilizada nesta pesquisa.

4.3.4.1. Preparação e moldagem dos corpos de prova de MR

Para a determinação dos valores de MR de cada amostra de solo e de sua correspondente mistura com EAEP, foram moldados, no teor de umidade ótimo e na energia do Proctor normal, três corpos de prova, os quais foram submetidos a dois processos de cura diferentes, a saber:

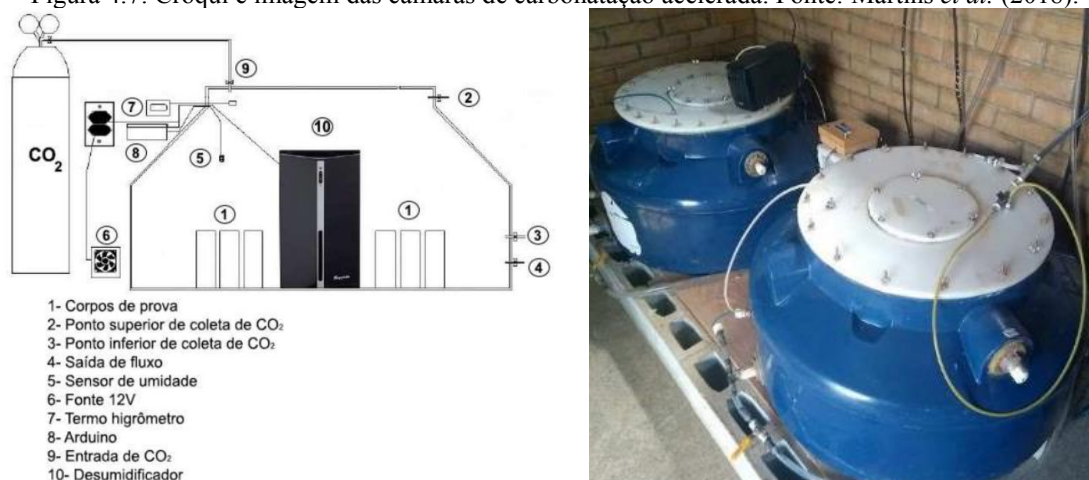
- Cura 1: cura convencional, selada em filme de PVC, em câmara úmida por 28 dias, acrescida de 7, 14 e 28 dias de cura não selada em câmara de carbonatação acelerada, totalizando 35, 42 e 56 dias;
- Cura 2: cura convencional, selada em filme de PVC, em câmara úmida por 35, 42 e 56 dias.
- Foram confeccionados também, corpos de prova das misturas ótimas não sendo submetidos à cura, os quais foram ensaiados logo após sua confecção.

Os corpos de prova produzidos para a determinação do MR foram confeccionados em moldes cilíndricos, de modo que suas dimensões ao final do processo de compactação possuísem diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, as quais também foram utilizadas por outros autores para pesquisas envolvendo carbonatação (DENELE *et al.*, 2021; HOSSEN; GALLANT; ASHRAF, 2020; LI *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2020). O procedimento de execução do ensaio foi realizado conforme a norma técnica ME 134 (DNIT, 2018).

4.3.4.2. Ensaio de carbonatação acelerada

Para a realização da carbonatação acelerada das misturas compactadas, visando o conhecimento do comportamento do material em longo prazo, foi utilizada uma câmara de carbonatação acelerada (Figura 4.7) desenvolvida na pesquisa de Martins *et al.* (2018). Um sistema *Arduíno* controla sensores de umidade e de temperatura, além de um desumidificador. A umidade relativa do ar dentro da câmara variou entre 65% e 80%.

Figura 4.7: Croqui e imagem das câmaras de carbonatação acelerada. Fonte: Martins *et al.* (2018).



A saturação de CO₂ dentro do ambiente da câmara é realizada manualmente, por meio de fluxos intercalados diários, até atingir 100% de concentração de CO₂. Essa metodologia de aplicação de CO₂ foi utilizada por outros autores (CASTELLOTE *et al.*, 2004; KIRCHHEIM; RHEINHEIMER; DAL MOLIN, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2019). A temperatura dentro do ambiente da câmara de carbonatação acelerada variou na faixa de 20 a 25°C.

4.3.4.3. Determinação do módulo de resiliência

Os ensaios de MR foram realizados em um equipamento triaxial de carregamento cíclico com estados de tensões correspondentes a amostras de solos para aplicação em subleito, conforme a norma técnica ME 134 (DNIT, 2018). Para a realização das análises estruturais, utilizou-se o MR médio de cada amostra de solo e sua respectiva mistura com EAEP considerando todas as condições de cura analisadas.

4.3.4.4. Pavimento de anteprojetado

Visando avaliar os efeitos do processo de cura sob carbonatação acelerada ocorrido em um subleito estabilizado quimicamente com EAEP sobre o projeto de um pavimento asfáltico, foi dimensionado, empiricamente, com auxílio dos valores de índice CBR das amostras de solo e de suas misturas com EAEP, um pavimento de anteprojetado com as seguintes premissas, também adotadas no estudo de Carvalho *et al.* (2020):

- Número de operações do eixo padrão de 80 kN: (N_{projeto}) de $1,6 \times 10^7$, para USACE (*United States Army Corps of Engineers*), e $5,0 \times 10^6$, para AASHTO

(*American Association of State Highway and Transportation Officials*), os quais foram utilizados no estudo de CARVALHO *et al.*(2020);

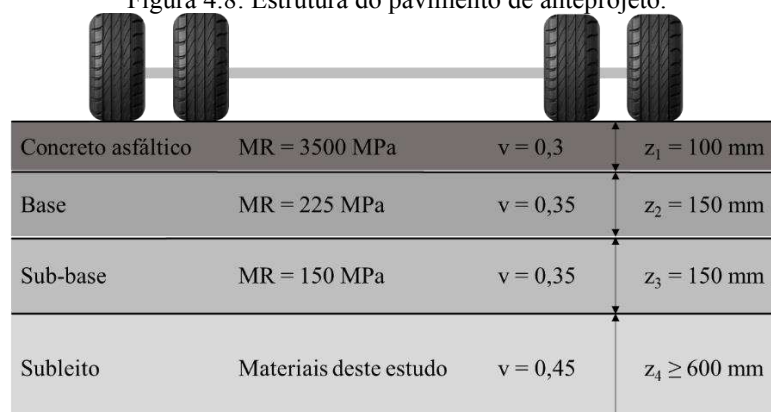
- Estrutura composta por 10 cm de revestimento em concreto asfáltico, função do $N_{projeto}$ da USACE (DNIT, 2016), por materiais de base e sub-base granulares e subleito, constituído dos próprios solos analisados nesta pesquisa. As características das camadas utilizadas na estrutura do pavimento asfáltico de anteprojeto são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Características dos materiais das camadas do pavimento de anteprojeto.

Parâmetro	Camada			
	Base	Sub-base	Subleito S1	Subleito S2
CBR (%)	> 80	> 20	11	8
Expansão (%)	< 0,5	< 1	0,93	0,26
Limite de Liquidez (%)	< 25	-	78	36
Índice de plasticidade (%)	< 6	-	35	18
Índice de grupo (IG)	0	0	20	1
Equivalente de areia (%)	> 30	-	-	-
k	1	1	-	-

De acordo com o dimensionamento proposto no manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006), e considerando tanto a amostra de solo S1 quanto a amostra de solo S2 no subleito, as espessuras das camadas do pavimento de anteprojeto são apresentadas na Figura 4.8. As duas amostras de solo forneceram o mesmo dimensionamento para o pavimento asfáltico.

Figura 4.8: Estrutura do pavimento de anteprojeto.



Concreto asfáltico	MR = 3500 MPa	$\nu = 0,3$	$z_1 = 100 \text{ mm}$
Base	MR = 225 MPa	$\nu = 0,35$	$z_2 = 150 \text{ mm}$
Sub-base	MR = 150 MPa	$\nu = 0,35$	$z_3 = 150 \text{ mm}$
Subleito	Materiais deste estudo	$\nu = 0,45$	$z_4 \geq 600 \text{ mm}$

4.3.4.5. Análise estrutural

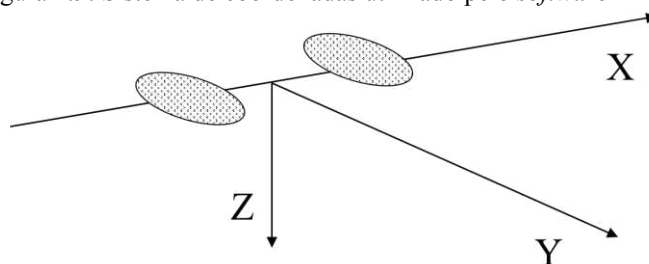
Após o dimensionamento empírico do pavimento de anteprojeto, as amostras de solo e suas misturas com EAEP submetidas aos dois processos de cura foram avaliadas através de uma

análise estrutural com respostas do tipo tensão-deformação, utilizando a estrutura inicialmente dimensionada empiricamente (Figura 4.8) e considerando os dois processos de cura aplicados às misturas solo-EAEP.

A análise estrutural foi realizada no *software* AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), que é uma sub-rotina do programa MeDiNa utilizado para o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, com rotinas para entrada de dados e apresentação de resultados (SANTOS *et al.*, 2020).

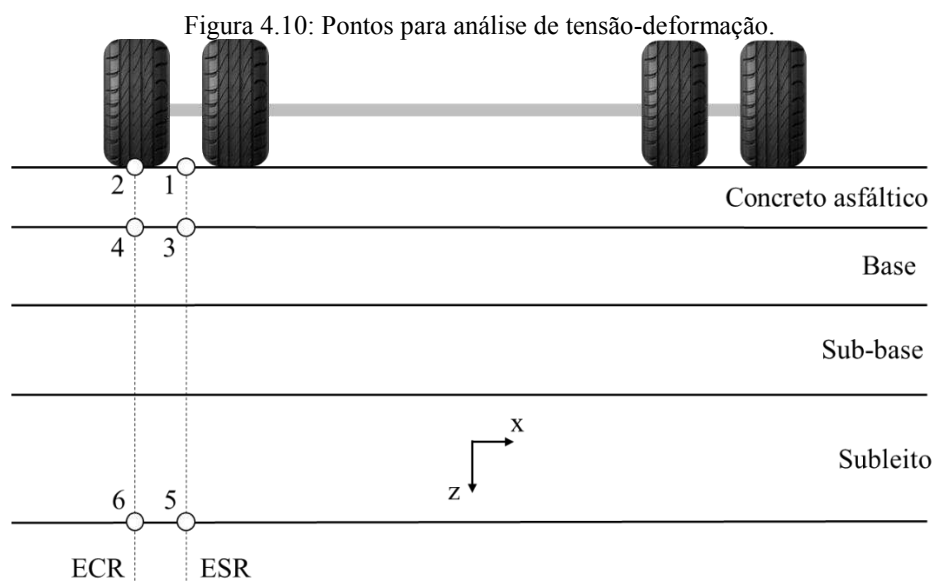
Visando avaliar os dois critérios de ruptura de pavimentos asfálticos mais utilizados atualmente, três análises foram realizadas: i) deflexão no topo da camada de revestimento asfáltico (U_z), que indica a soma da contribuição de todas as camadas do pavimento para o surgimento do afundamento plástico nas trilhas de roda; ii) deformação vertical no topo do subleito (ε_v), a qual indica a capacidade de carga e a contribuição desta camada no afundamento plástico nas trilhas de roda do solo de subleito; e iii) deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico (ε_t), que pode indicar a susceptibilidade ao trincamento por fadiga. Para que essas análises fossem realizadas de forma comparativa entre as amostras de solo e suas misturas submetidas aos dois processos de cura, apenas o subleito do pavimento de anteprojeto teve seu material alterado.

O carregamento utilizado para a análise estrutural foi o eixo padrão rodoviário de 80 kN (8,2 tf) utilizado para projeto de pavimentos asfálticos no Brasil, conforme DNIT (2006). O valor da distância entre as rodas do semi-eixo é de 324 mm, a pressão de inflação dos pneus considerada foi de 560 kPa e o raio da área de contato entre pneu e pavimento foi de 10,79 cm, calculado a partir da carga na roda e da pressão de inflação no pneu. O sistema de coordenadas X, Y e Z assumido no *software* AEMC é indicado na Figura 4.9.

Figura 4.9: Sistema de coordenadas utilizado pelo *software* AEMC.

Os parâmetros de entrada do *software* são o carregamento, as espessuras de cada camada estrutural do pavimento, a massa específica do material que a compõe, os valores de MR, linear ou não linear, os coeficientes de Poisson e a consideração de aderência entre as interfaces das camadas. Os valores de módulos de resiliência e de coeficiente de Poisson das camadas de revestimento asfáltico, base e sub-base foram adotados de acordo com a norma técnica DER-SP (2006), os quais são apresentados na Figura 4.8. Para a camada de subleito, os valores de MR foram obtidos através do ensaio de MR, sendo adotado para a análise estrutural seu valor médio, e o valor do coeficiente de Poisson foi adotado como 0,45 para as duas amostras de solo e suas misturas com EAEP. De acordo com as recomendações de Franco e Motta (2020), não foi considerada a aderência entre as camadas do pavimento asfáltico estudado.

Os pontos para a obtenção dos valores de deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico (ϵ_t), deflexão no topo dessa mesma camada (U_z) e deformação vertical no topo do subleito (ϵ_v) foram adotados no eixo central das rodas (ECR) e o eixo de simetria entre as duas rodas (ESR) do semi-eixo padrão, sendo verificados, para a análise estrutural, a situação mais crítica entre esses pontos para cada parâmetro. A Figura 4.10 apresenta os pontos referentes à análise estrutural realizada.



A Tabela 4.6 apresenta as coordenadas X, Y e Z dos pontos adotados para a realização da análise tensão-deformação para a estrutura do pavimento asfáltico dimensionada inicialmente.

Tabela 4.6: Coordenadas cartesianas dos pontos para análise tensão-deformação.

Ponto	Análise	Posição	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	U_z	ESR	0	0	0,01
2	U_z	ECR	16,2	0	0,01
3	ε_t	ESR	0	0	9,99
4	ε_t	ECR	16,2	0	9,99
5	ε_v	ESR	0	0	40,01
6	ε_v	ECR	16,2	0	40,01

Visando avaliar o número de solicitações de eixo padrão que o pavimento flexível de anteprojeto é capaz de suportar (N_{adm}), foram utilizadas as equações e seus respectivos valores de k e n apresentadas na Tabela 4.7, extraídas da norma técnica DER-SP (2006). A equação para cálculo do N_{adm} , considerando a deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento, faz referência aos fatores de equivalência de carga (FEC) da AASHTO, enquanto que as equações para deflexão no topo do revestimento e deformação vertical no topo do subleito fazem referência aos FEC da USACE.

Tabela 4.7: Equações e coeficientes utilizados para a realização da previsão do número N_{adm} .

Local de análise	Equação	k	n	Fonte
Topo do revestimento	$N_{tr} = n \sqrt{\left(\frac{10^k}{D}\right)}$	3,010	0,174	DNER-PRO 11/1979
Fibra inferior do revestimento	$N_{ir} = k \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^n$	1,092E-06	3,512	FHWA (1976) apud DER-SP (2006)
Topo do subleito	$N_{sub} = k \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^n$	6,069E-10	4,762	Dormon e Metcalf (1965) apud DER-SP (2006)

Em que:

N_{tr} : N_{adm} para o topo do revestimento;

N_{ir} : N_{adm} para a fibra inferior do revestimento asfáltico;

N_{sub} : N_{adm} para o topo do subleito;

D: deflexão no topo do revestimento (10^{-2} mm);

ε_t : deformação específica horizontal de tração na fibra inferior do revestimento;

ε_v : deformação específica vertical no topo do subleito;

k e n: coeficientes determinados por regressões, particulares para cada tipo de mistura asfáltica, modificados para refletir o desempenho do material no campo.

4.3.4.6. Análises mineralógicas e microestruturais

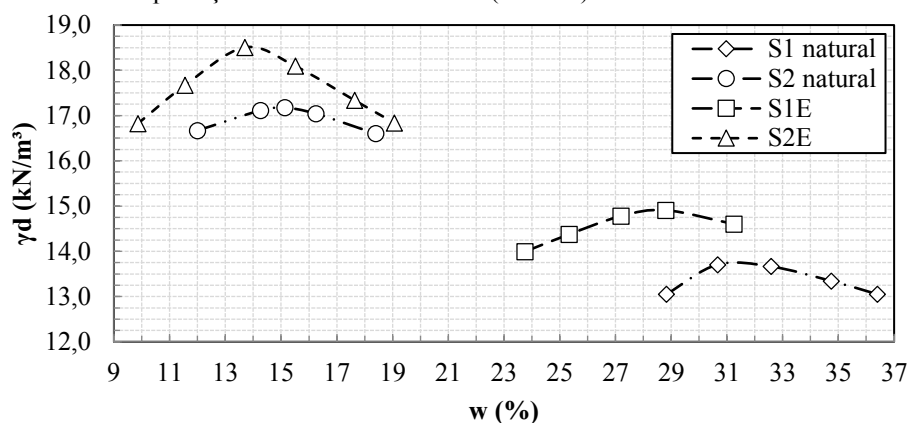
Um dos três corpos de prova compactados para cada processo de cura foi seccionado em 5 discos de 20mm de altura. Do disco central, foram coletadas amostras para a realização das análises de difração de raios-X (DRX). Para a realização da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram extraídos fragmentos próximos à região central dos corpos de prova.

4.4. RESULTADOS

4.4.1. Ensaio de compactação

As curvas de compactação das amostras dos solos S1 e S2, bem como das misturas destes com 20% em massa de EAEP (misturas ótimas S1E e S2E), são apresentadas na Figura 4.11.

Figura 4.11: Curvas de compactação das amostras de solos (S1 e S2) e de suas misturas com EAEP (S1E e S2E).



Observou-se que a adição de EAEP às amostras de solos gerou um aumento de peso específico aparente seco máximo e diminuição do teor de umidade ótimo. O aumento do peso específico aparente seco máximo com adição de EAEP ocorre devido à maior massa específica real da EAEP que substitui as partículas de solo (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; BRAND *et al.*, 2020; OLUWASOLA *et al.*, 2020; SEBBAR *et al.*, 2020). Em amostras de solos arenosos, Al-Homidy *et al.* (2017) atribuem o aumento de peso específico aparente seco máximo à melhor graduação proporcionada pela presença de grãos finos presentes na EAEP que preenchem os vazios deixados pelos grãos maiores do material granular.

A diminuição do teor de umidade com a adição de EAEP, segundo Zumrawi e Babikir (2017), ocorre devido às trocas catiônicas entre os íons de cálcio provenientes da EAEP e os íons presentes na dupla camada difusa das partículas dos solos. De acordo com Aldeeky e Al Hattamleh (2017), essa redução é devida a uma hidratação prévia dos óxidos de cálcio presentes na EAEP, gerando o composto hidróxido de cálcio, o que implica em menor demanda de água na mistura para alcançar seu peso específico aparente seco máximo.

4.4.2. Ensaios de módulo de resiliência

Os valores de MR médio, determinados por meio do ensaio de MR em triplicata para cada amostra de solo e suas misturas com EAEP, são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Valores de MR médio para as amostras de solo e suas misturas com EAEP.

Material	MR médio (MPa)	
	Solo S1	Solo S2
Solo Natural	54,71	31,77
Mistura sem cura	57,94	37,84
1-35d	117,15	85,60
1-42d	127,30	112,03
1-56d	152,81	127,72
2-35d	78,21	33,64
2-42d	80,56	38,66
2-56d	87,80	48,63

Observou-se um aumento dos valores de MR com os procedimentos de cura aplicados nas misturas solo-EAEP, o que reflete a melhora do comportamento resiliente das misturas quando comparadas com as amostras de solo na condição natural. Apesar de ambos os procedimentos de cura promoverem melhora nos valores de MR para as misturas solo-EAEP, o procedimento de cura 1, sob carbonatação acelerada, apresentou um aumento maior, mostrando que a carbonatação ocorrendo em campo ao longo dos anos melhorará o comportamento resiliente do material, sendo benéfico do ponto de vista da sua durabilidade (HAAS; RITTER, 2019).

O aumento de MR gerado pelo processo de cura 1 ocorreu principalmente devido à formação de carbonato de cálcio, responsável por promover o preenchimento dos poros e aumentar o peso específico aparente seco, a rigidez e a resistência (DENELEE *et al.*, 2021; JORAT *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2021; PARK *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2020). Os ensaios de MEV e DRX corroboram esses resultados, mostrando que houve hidratação de óxido de cálcio no processo de cura em câmara úmida e, posteriormente, carbonatação do hidróxido de cálcio que evoluiu com o tempo de cura na câmara de carbonatação acelerada. Além disso, a carbonatação de compostos hidratados formados durante os 28 dias de cura anterior em câmara úmida também pode ter ocorrido (VITALE *et al.*, 2021; ZHA *et al.*, 2021). Os ensaios de MEV e DRX serão apresentados mais à frente.

O aumento de MR gerado pelo processo de cura 2 ocorreu devido à formação de estruturas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), de aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e de sílico-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H), os quais geram uma estrutura mais densa do que a

estrutura do solo na sua condição natural (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; AMINI; GHASEMI, 2019; WU *et al.*, 2019), mas precisam de tempo para se desenvolver.

4.4.3. Análise estrutural

As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam, para as amostras de solos S1 e S2, os valores da deflexão no topo do revestimento (U_z), a deformação horizontal de tração na fibra inferior (ε_t) dessa mesma camada e a deformação específica vertical no topo do subleito (ε_v), assim como os valores do N_{adm} para cada uma dessas análises. As condições de cura nas quais os valores dos três parâmetros de N_{adm} (N_{tr} ; N_{ir} ; N_{sub}) são maiores que os valores de $N_{projeto}$ são destacadas em negrito.

Tabela 4.9: Análise estrutural para do pavimento de anteprojeto considerando a amostra de solo S1.

Solo S1	U_z (10^{-2} mm)	ε_t (m/m)	ε_v (m/m)	Ntr	Nir	Nsub
Solo natural	101,31	4,23E-04	1,87E-04	5,92E+05	7,68E+05	3,43E+08
Mistura sem cura	97,39	4,19E-04	1,81E-04	7,42E+05	7,98E+05	4,06E+08
1-35	61,44	3,69E-04	1,11E-04	1,05E+07	1,25E+06	4,05E+09
1-42	58,41	3,64E-04	1,05E-04	1,40E+07	1,30E+06	5,43E+09
1-56	52,45	3,54E-04	9,12E-05	2,60E+07	1,44E+06	1,05E+10
2-35	79,54	3,96E-04	1,48E-04	2,38E+06	9,74E+05	1,04E+09
2-42	78,00	3,94E-04	1,45E-04	2,66E+06	9,92E+05	1,15E+09
2-56	73,73	3,87E-04	1,37E-04	3,67E+06	1,05E+06	1,52E+09

Tabela 4.10: Análise estrutural para do pavimento de anteprojeto considerando a amostra de solo S2.

Solo S2	U_z (10^{-2} mm)	ε_t (m/m)	ε_v (m/m)	Ntr	Nir	Nsub
Solo natural	148,84	4,73E-04	2,59E-04	6,49E+04	5,22E+05	7,33E+07
Mistura sem cura	131,29	4,56E-04	2,34E-04	1,33E+05	5,92E+05	1,18E+08
1-35	74,96	3,89E-04	1,39E-04	3,34E+06	1,03E+06	1,40E+09
1-42	63,16	3,72E-04	1,15E-04	8,94E+06	1,21E+06	3,47E+09
1-56	58,30	3,64E-04	1,05E-04	1,42E+07	1,31E+06	5,49E+09
2-35	142,83	4,67E-04	2,50E-04	8,22E+04	5,44E+05	8,56E+07
2-42	129,30	4,54E-04	2,31E-04	1,46E+05	6,01E+05	1,26E+08
2-56	109,96	4,33E-04	2,01E-04	3,69E+05	7,07E+05	2,42E+08

As misturas solo-EAEP não submetidas aos processos de cura, para ambas as amostras de solo, mostraram um aumento nos valores de N_{adm} para os três parâmetros analisados, o que ocorreu devido ao aumento nos valores do MR, devido à presença de EAEP.

Observou-se que os processos de cura 1 e 2 proporcionaram uma redução da deflexão no topo do revestimento, na deformação horizontal na fibra inferior dessa mesma camada e na deformação vertical no topo do subleito. Essas reduções promoveram aumentos nos valores dos N_{adm} para todas as situações.

O processo de cura 1, considerando as amostras de solo S1 e S2, mostrou que o processo de carbonatação que ocorre em campo é benéfico sob o ponto de vista da durabilidade, pois aumenta os valores de N_{adm} considerando os três parâmetros analisados. Essa melhora no comportamento do pavimento se deve ao aumento de MR da camada de subleito, a qual sofre carbonatação ao longo do tempo, gerando e desenvolvendo cristais de carbonato de cálcio, responsáveis pelo preenchimento dos poros e pelo aumento na resistência e na rigidez. O processo de cura 2 também apresentou melhora nos valores de N_{adm} , devido ao aumento de MR que ocorreu através da formação de compostos cimentícios.

Em todas as condições analisadas, e considerando ambas as amostras de solos, S1 e S2, o N_{adm} relacionado à deformação vertical no topo do subleito foi atendido. O N_{adm} considerando a deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento não foi atendido em nenhuma das condições e o N_{adm} considerando a deflexão no topo do revestimento asfáltico foi atendido apenas para a mistura solo S1-EAEP com 28 dias de cura em câmara de carbonatação acelerada posterior a 28 dias de cura selada em câmara úmida.

Assim, o pavimento de anteprojeto, caso adotado em uma obra de pavimentação, apresentará, antes do fim da sua vida útil, trincamento por fadiga e afundamento nas trilhas de roda excessivos, devido aos valores de N_{adm} estarem abaixo dos valores de $N_{projeto}$, considerando a deformação de tração na fibra inferior do revestimento e a deflexão no topo dessa mesma camada, respectivamente.

Visando o atendimento do valor de $N_{projeto}$ para no mínimo uma das possibilidades consideradas nesta pesquisa, a espessura da camada de sub-base foi aumentada para 20 cm. Como não houve o atendimento dos valores de $N_{projeto}$, aumentou-se a espessura da camada de base para 20 cm, mantendo a espessura da camada de sub-base em 20 cm. Posteriormente, a espessura da camada de revestimento asfáltico foi sendo incrementada em 1 cm até que os valores de N_{adm} superassem os valores de $N_{projeto}$ considerando todos os parâmetros avaliados. Os resultados da análise estrutural da estrutura do pavimento asfáltico com revestimento de espessuras de 14 cm e 15 cm, para as amostras de solo S1 e S2, respectivamente, considerando as espessuras das camadas de base e sub-base de 20 cm, são apresentados nas Tabelas 4.11 e 4.12.

Tabela 4.11: Análise estrutural para do pavimento com 14 cm de revestimento e 20 cm de base e sub-base para a amostra de solo S1 como subleito.

Solo S1	Uz (10 ⁻² mm)	ε_t (m/m)	ε_v (m/m)	Ntr	Nir	Nsub
Solo natural	81,53	2,90E-04	1,12E-04	2,06E+06	2,90E+06	4,01E+09
Mistura sem cura	78,42	2,87E-04	1,08E-04	2,58E+06	3,00E+06	4,73E+09
1-35	50,13	2,57E-04	6,77E-05	3,37E+07	4,42E+06	4,33E+10
1-42	47,76	2,54E-04	6,38E-05	4,46E+07	4,61E+06	5,74E+10
1-56	43,09	2,48E-04	5,59E-05	8,05E+07	5,01E+06	1,08E+11
2-35	64,34	2,73E-04	8,93E-05	8,04E+06	3,57E+06	1,16E+10
2-42	63,13	2,72E-04	8,76E-05	8,97E+06	3,63E+06	1,27E+10
2-56	59,78	2,68E-04	8,25E-05	1,23E+07	3,81E+06	1,69E+10

Tabela 4.12: Análise estrutural para do pavimento com 15 cm de revestimento e 20 cm de base e sub-base para a amostra de solo S2 como subleito.

Solo S2	Uz (10 ⁻² mm)	ε_t (m/m)	ε_v (m/m)	Ntr	Nir	Nsub
Solo natural	114,80	2,97E-04	1,41E-04	2,88E+05	2,66E+06	1,34E+09
Mistura sem cura	101,23	2,88E-04	1,28E-04	5,94E+05	2,98E+06	2,13E+09
1-35	58,13	2,49E-04	7,77E-05	1,44E+07	4,92E+06	2,26E+10
1-42	49,19	2,39E-04	6,48E-05	3,76E+07	5,69E+06	5,35E+10
1-56	45,51	2,35E-04	5,91E-05	5,88E+07	6,07E+06	8,30E+10
2-35	110,15	2,94E-04	1,36E-04	3,66E+05	2,76E+06	1,56E+09
2-42	99,69	2,87E-04	1,26E-04	6,49E+05	3,03E+06	2,25E+09
2-56	84,82	2,75E-04	1,10E-04	1,64E+06	3,51E+06	4,29E+09

Observou-se que, com o aumento no valor da espessura do revestimento asfáltico, os valores de N_{adm} considerando a deflexão no topo do revestimento, a deformação horizontal de tração na fibra inferior dessa mesma camada e a deformação vertical no topo do subleito apresentaram um aumento, chegando a valores de N_{adm} maiores que os valores de $N_{projeto}$.

O atendimento aos valores de $N_{projeto}$ aqui estudados foram alcançados apenas com o processo de cura em câmara de carbonatação acelerada, o qual retrata a carbonatação ocorrida em longo prazo por uma mistura solo-EAEP. Concluiu-se que, apesar de a amostra de EAEP favorecer o aumento nos valores de MR quando adicionada às amostras de solo analisadas nesta pesquisa, as misturas resultantes ganham resistência significativa apenas com o processo de cura por carbonatação, que demora para ocorrer no campo. Caso seja possível acelerar o processo de carbonatação em campo, as camadas estruturais compostas pelas misturas solo-EAEP analisadas poderiam contribuir muito para o aumento da durabilidade do pavimento asfáltico analisado.

O processo de cura 1 apresentou melhores resultados, mostrando que, em longo prazo, tanto o afundamento plástico nas trilhas de roda quanto o trincamento por fadiga terão seus

efeitos atenuados com o aumento de rigidez da camada de subleito composta pelas misturas de solo-EAEP devido à formação de carbonato de cálcio.

Com o objetivo de que o processo de cura 2 também pudesse satisfazer os valores mínimos de N_{adm} , considerando o pavimento composto por 15 cm de revestimento asfáltico, 20 cm de base e 20 cm de sub-base, foi alterado o valor de MR do material da base para o valor médio, 350 MPa, utilizado em macadame hidráulico, conforme DER-SP (2006). Os resultados da análise estrutural da estrutura do pavimento asfáltico com essa alteração são apresentados nas Tabelas 4.13 e 4.14, para as amostras de solo S1 e S2 compondo a camada de subleito, respectivamente.

Tabela 4.13: Análise estrutural para do pavimento com 15 cm de revestimento e 20 cm de base (MR = 350 MPa) e sub-base para a amostra de solo S1 como subleito.

Solo S1	Uz (10^{-2} mm)	ε_t (m/m)	ε_v (m/m)	Ntr	Nir	Nsub
Solo natural	76,31	2,58E-04	1,02E-04	3,02E+06	4,39E+06	6,30E+09
Mistura sem cura	73,33	2,55E-04	9,82E-05	3,79E+06	4,55E+06	7,41E+09
1-35	46,23	2,27E-04	6,29E-05	5,38E+07	6,83E+06	6,19E+10
1-42	43,95	2,24E-04	5,94E-05	7,19E+07	7,13E+06	8,12E+10
1-56	39,46	2,19E-04	5,22E-05	1,33E+08	7,81E+06	1,50E+11
2-35	59,85	2,42E-04	8,22E-05	1,22E+07	5,46E+06	1,73E+10
2-42	58,69	2,41E-04	8,04E-05	1,36E+07	5,55E+06	1,92E+10
2-56	55,48	2,38E-04	7,61E-05	1,88E+07	5,83E+06	2,49E+10

Tabela 4.14: Análise estrutural para do pavimento com 15 cm de revestimento e 20 cm de base (MR = 350 MPa) e sub-base para a amostra de solo S2 como subleito.

Solo S2	Uz (10^{-2} mm)	ε_t (m/m)	ε_v (m/m)	Ntr	Nir	Nsub
Solo natural	112,53	2,85E-04	1,38E-04	3,24E+05	3,07E+06	1,46E+09
Mistura sem cura	99,10	2,76E-04	1,26E-04	6,72E+05	3,46E+06	2,29E+09
1-35	56,40	2,39E-04	7,73E-05	1,71E+07	5,75E+06	2,30E+10
1-42	47,52	2,29E-04	6,48E-05	4,59E+07	6,67E+06	5,35E+10
1-56	43,86	2,24E-04	5,92E-05	7,27E+07	7,15E+06	8,21E+10
2-35	107,93	2,82E-04	1,34E-04	4,11E+05	3,19E+06	1,69E+09
2-42	97,58	2,75E-04	1,24E-04	7,34E+05	3,50E+06	2,42E+09
2-56	82,87	2,63E-04	1,09E-04	1,88E+06	4,07E+06	4,56E+09

Considerando a amostra de solo S1 como subleito, observou-se que as três idades correspondentes à cura 1 foram capazes de suportar o $N_{projeto}$. Considerando o processo de cura 2, a alternativa com tempo de cura de 56 dias obteve valores de N_{adm} maiores do que os valores de $N_{projeto}$, sendo, portanto, viável tecnicamente.

Para a amostra de solo S2 compondo a camada de subleito, observou-se que, nos três tempos de cura referentes ao processo de cura 1, os valores de N_{adm} foram maiores que os

valores de $N_{projeto}$. Para o processo de cura 2, não foi possível verificar o atendimento dos valores de $N_{projeto}$, mostrando que seria viável aplicar uma outra alternativa para que a amostra de solo S2 pudesse ser utilizada como camada de subleito.

Os resultados mostraram que o aumento no valor do MR do material da camada de base melhora significativamente os valores de N_{adm} dos três parâmetros avaliados na análise estrutural.

4.4.4. Análises mineralógicas e microestruturais

Nas Figuras 4.12 e 4.13, são apresentadas as micrografias para as misturas solo S1-EAEP e solo S2-EAEP, submetidas ao processo de cura 1. Observou-se o desenvolvimento de cristais de carbonato de cálcio, em grande quantidade, revestindo as partículas das misturas, os quais são responsáveis por melhorar a estabilidade do esqueleto sólido devido ao preenchimento dos vazios entre as partículas da mistura, além de fornecer um aumento de peso específico aparente seco, de rigidez e de resistência (DENELE *et al.*, 2021; HAAS; RITTER, 2019; JORAT *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2021; PARK *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2020).

Além do desenvolvimento de carbonato de cálcio, houve também o desenvolvimento de estruturas de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e/ou aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H) possivelmente formados devido às reações químicas entre o óxido de cálcio presente na EAEP e os componentes sílica e alumina presentes nas amostras de solo S1 e S2 durante a cura de 28 dias em câmara úmida. Os compostos cimentícios C-S-H e C-A-H recobrem a superfície das partículas das misturas, preenchendo os poros e fortalecendo a aglomeração entre as partículas, aumentando assim a resistência do material (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; AMINI; GHASEMI, 2019; WU *et al.*, 2019).

Os compostos cimentícios C-S-H e C-A-H foram identificados somente aos 7 dias de cura em câmara de carbonatação acelerada. Aos 28 dias de cura, houve predomínio de carbonato de cálcio, mostrando que os compostos cimentícios possivelmente tenham sofrido o processo de carbonatação, assim como foi observado por Vitale *et al.* (2021).

A formação inicial de compostos cimentícios e de carbonato de cálcio está em concordância com os dados observados nos valores de MR e na análise estrutural do pavimento,

sendo que esses compostos promovem um aumento de rigidez da camada de solo estabilizado, consequentemente aumentando a vida de serviço do pavimento asfáltico avaliado, considerando os critérios de afundamento plástico nas trilhas de roda e de trincamento por fadiga. A formação de carbonato de cálcio e seu papel de destaque em comparação com os compostos cimentícios em misturas entre solos e materiais à base de cal corroboram os resultados encontrados no estudo de Li *et al.* (2021).

Figura 4.12: Micrografias da mistura solo S1-EAEP obtida por MEV no processo de cura 1: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.

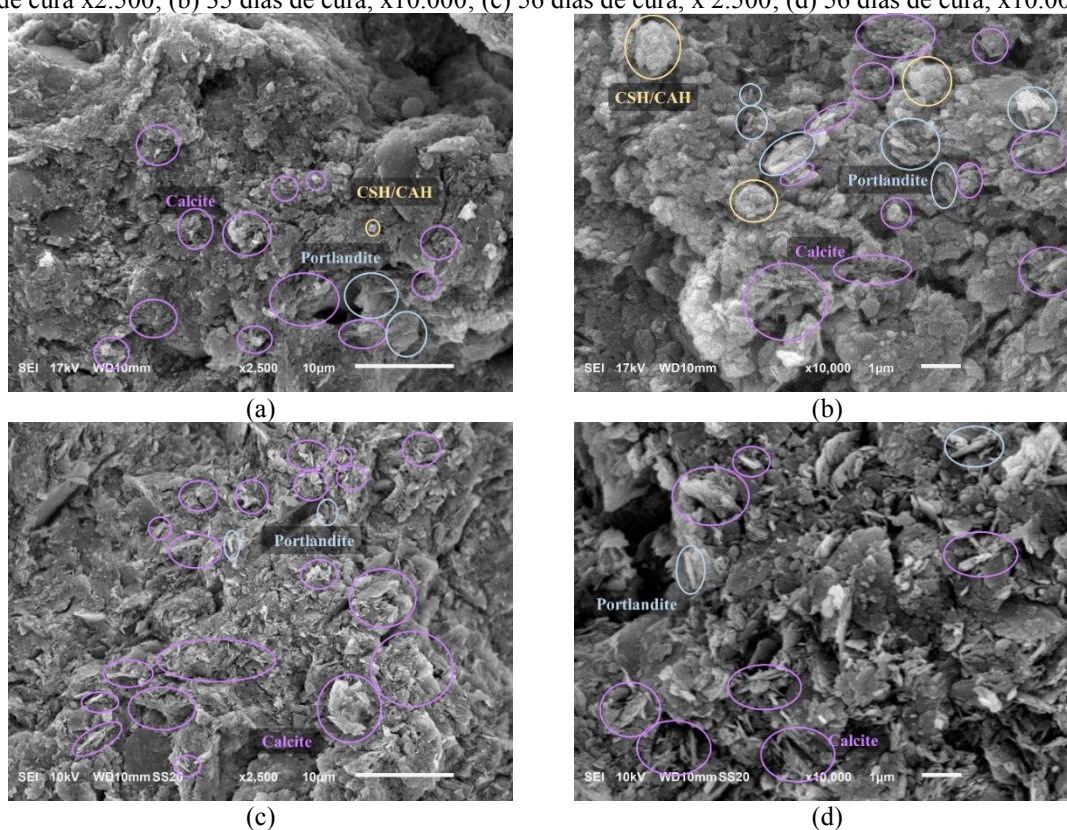
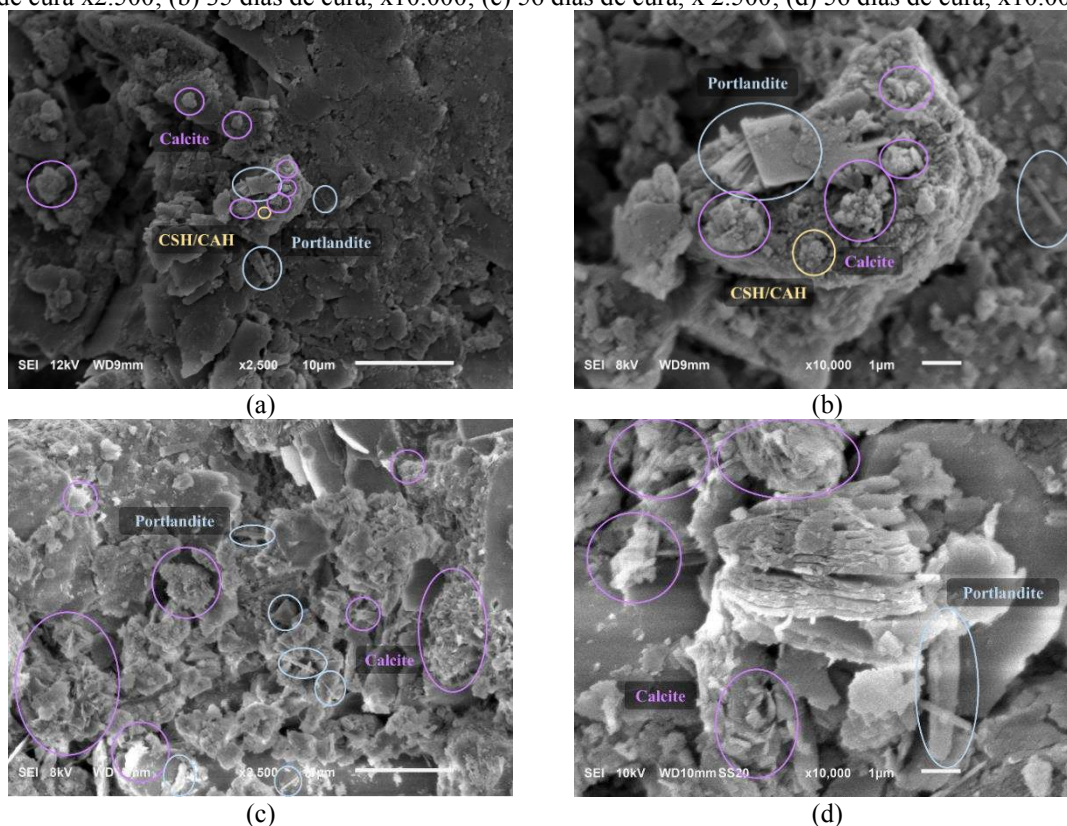


Figura 4.13: Micrografias da mistura solo S2-EAEP obtida por MEV no processo de cura 1: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 2.500; (d) 56 dias de cura, x10.000.



A fim de complementar a análise de MEV, foram realizadas as análises mineralógicas através de DRX para as misturas solo S1-EAEP e solo S2-EAEP, submetidas ao processo de cura 1, as quais são apresentadas nas Figuras 4.14 e 4.15, respectivamente. Também foi realizada a análise mineralógica nas misturas solo-EAEP logo após o tempo de cura de 28 dias em câmara úmida para efeitos de comparação. Observou-se que houve a formação de carbonato de cálcio, verificado principalmente pelo pico próximo de 30° . Mesmo com a formação desse composto, foi observada a presença de hidróxido de cálcio que pode vir a se carbonatar, o que indica que o MR das misturas solo-EAEP, para ambas as amostras de solo, pode aumentar mesmo após 28 dias de cura em câmara de carbonatação acelerada, o que significa que o desenvolvimento de afundamento plástico nas trilhas de roda e de trincamento por fadiga será ainda mais lento, aumentando assim a vida útil do pavimento asfáltico.

Figura 4.14: Difratomogramas da mistura solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 1, por DRX: 35 dias de cura, 42 dias de cura e 56 dias de cura.

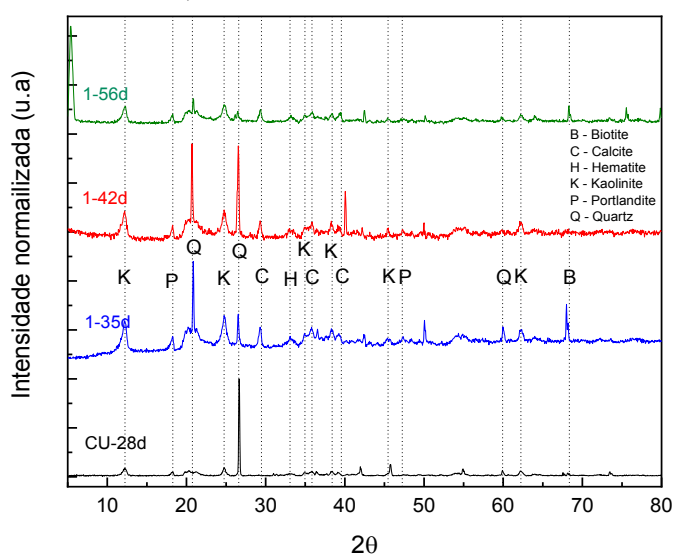
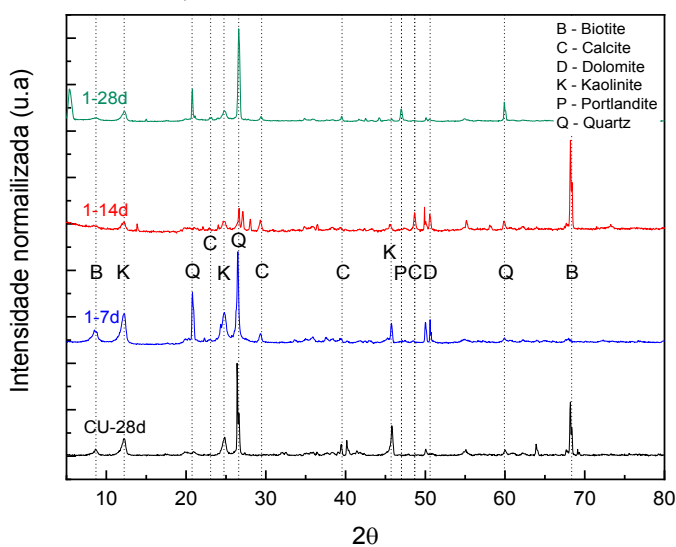


Figura 4.15: Difratomogramas da mistura solo S2-EAEP, submetida ao processo de cura 1, por DRX: 35 dias de cura, 42 dias de cura e 56 dias de cura.



Os compostos cimentícios C-S-H, C-A-H e C-A-S-H foram observados nas micrografias das misturas solo-EAEP, para as amostras de solo S1 (Figura 4.16) e S2 (Figura 4.17), submetidas ao processo de cura 2. Observou-se a presença de hidróxido de cálcio, não sendo observada a formação de carbonato de cálcio, o que está em concordância com o processo de cura utilizado.

Os compostos cimentícios C-S-H e/ou C-A-H, encontrados nas misturas, geram uma estrutura mais densa do que a estrutura do solo na sua condição natural, aumentando a rigidez

do material, como demonstrado a partir dos resultados de MR. Isso explica os menores valores de deflexão no topo do revestimento asfáltico, da deformação horizontal de tração na fibra inferior dessa mesma camada e da deformação vertical no topo do subleito. Estruturas semelhantes desses compostos também foram encontradas por outros autores para misturas entre amostras de solos e EAEP (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; AMINI; GHASEMI, 2019; WU *et al.*, 2019).

Figura 4.16: Micrografias da mistura solo S1-EAEP obtida por MEV no processo de cura 2: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 5.000; (d) 56 dias de cura, x10.000.

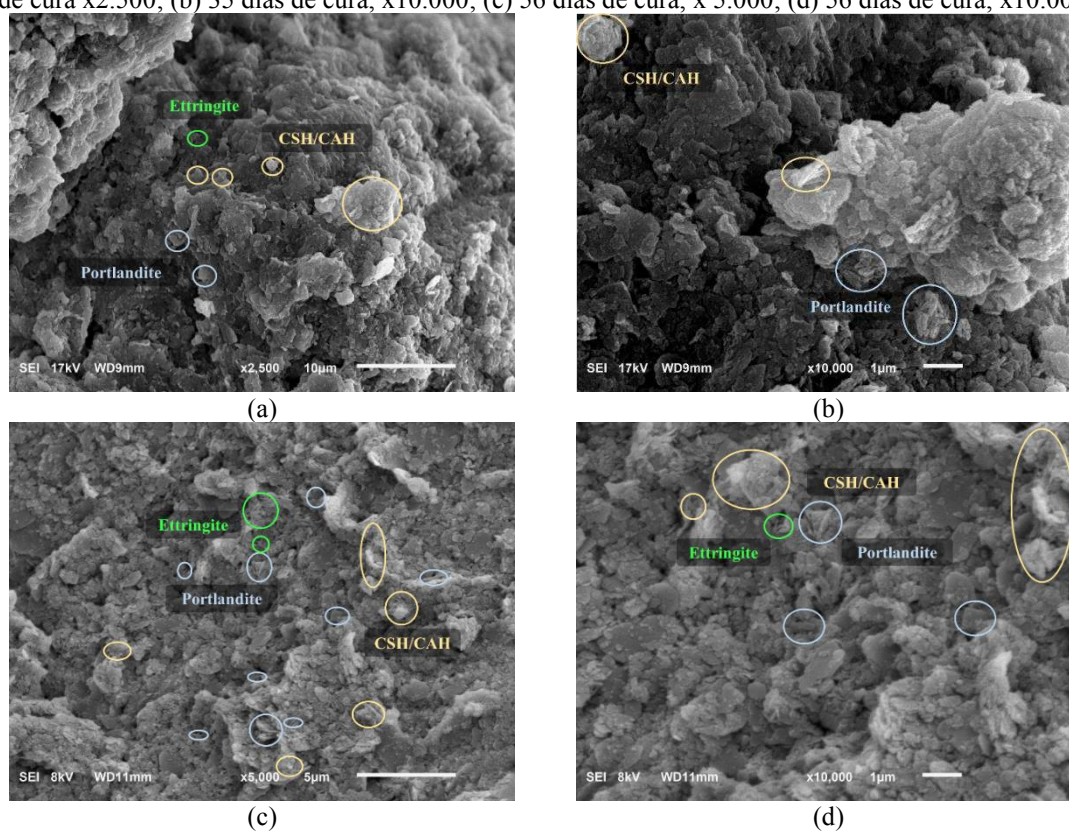
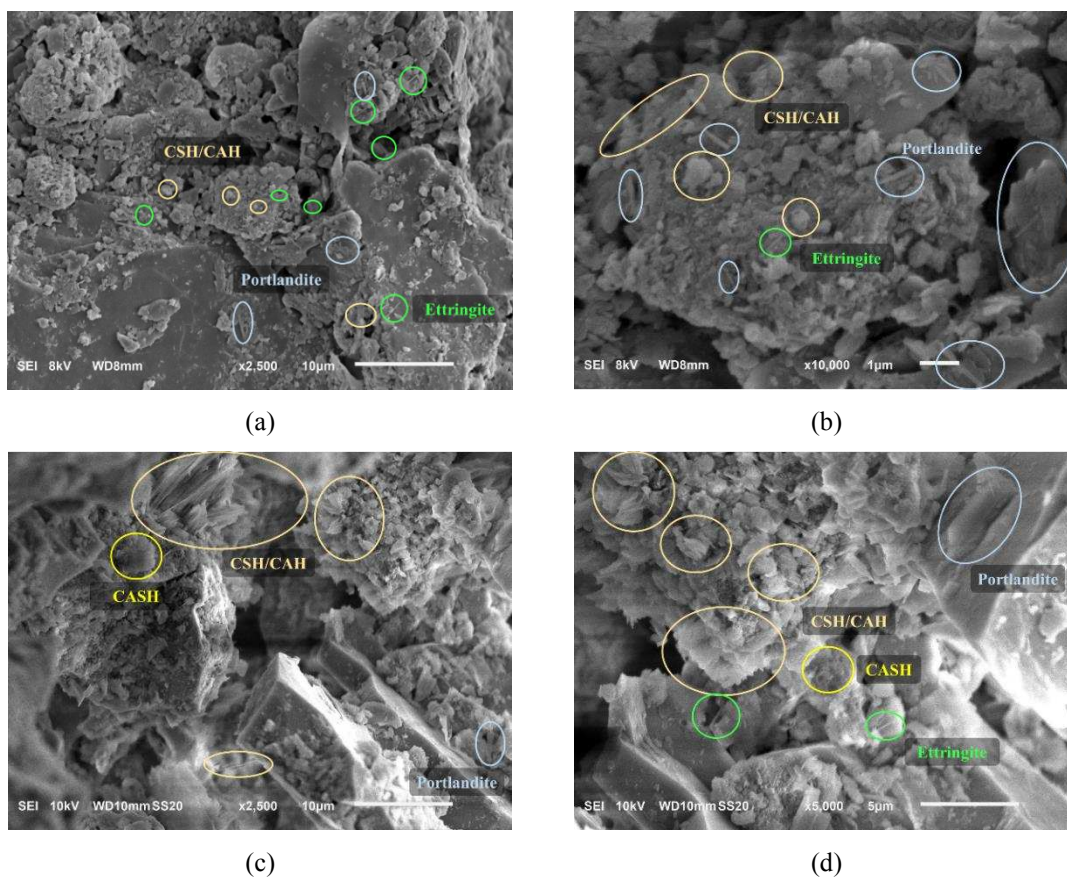


Figura 4.17: Micrografias da mistura solo S2-EAEP obtida por MEV no processo de cura 2: (a) 35 dias de cura x2.500; (b) 35 dias de cura, x10.000; (c) 56 dias de cura, x 5.000; (d) 56 dias de cura, x10.000.



Os difratogramas das misturas solo-EAEP são apresentados nas Figuras 4.18 e 4.19, para as misturas solo S1-EAEP e solo S2-EAEP, respectivamente. Observou-se que não houve indícios de cristais de carbonato de cálcio nas análises de MEV e de DRX, pois não houve contato do material com o CO_2 diretamente, devido ao processo de cura. Entretanto, verificou-se a presença de hidróxido de cálcio, que é produto da hidratação do óxido de cálcio presente na amostra de EAEP.

Figura 4.18: Difratoograma da mistura solo S1-EAEP, submetida ao processo de cura 2, por DRX.

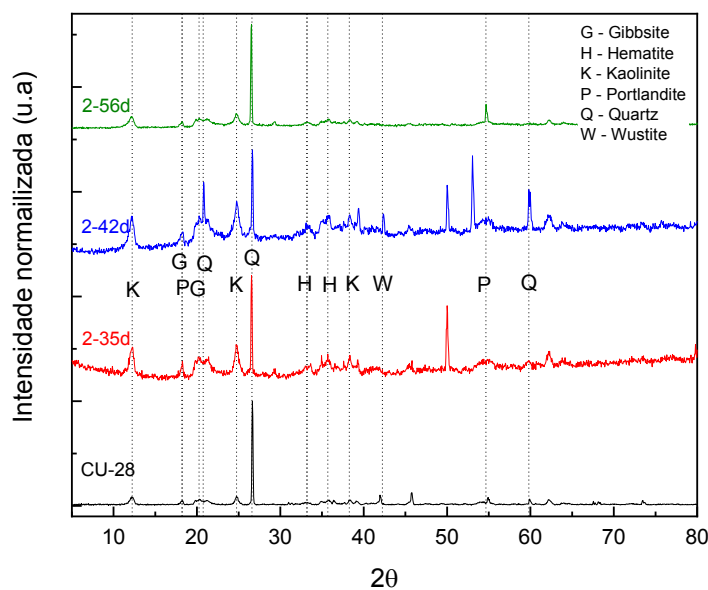
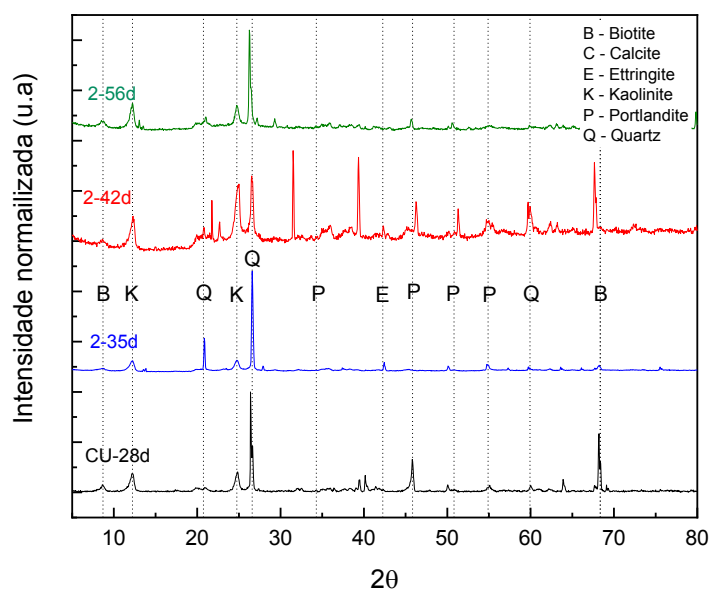


Figura 4.19: Difratoograma da mistura solo S2-EAEP, submetida ao processo de cura 2, por DRX.



4.5. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar a influência da carbonatação acelerada de misturas solo-EAEP, utilizadas na camada de subleito, visando obter um maior conhecimento sobre a durabilidade de misturas solo-EAEP em longo prazo, através de análises estruturais de um pavimento asfáltico.

A carbonatação acelerada promoveu uma diminuição na deflexão no topo do revestimento asfáltico, na deformação horizontal de tração na fibra inferior dessa mesma camada e na deformação vertical no topo do subleito, proporcionando maiores valores de N_{adm} , os quais foram, em várias simulações, maiores do que os valores de $N_{projeto}$ adotados. Portanto, a carbonatação que ocorre em longo prazo no campo é benéfica do ponto de vista técnico, aumentando a rigidez e a vida de serviço do pavimento asfáltico como um todo.

O aumento de rigidez, representado pelo aumento nos valores de MR com o emprego dos processos de cura, em ambas as amostras de solo, mostrou que quanto maiores os valores dessa propriedade para o material que constitui a camada de subleito, menores foram os valores dos parâmetros analisados nesta pesquisa, proporcionando uma estrutura mais durável, alcançando maiores valores de N_{adm} .

Constatou-se que os processos de cura utilizados nesta pesquisa influenciaram os valores de MR das misturas solo-EAEP. O processo de cura 1, sob carbonatação acelerada, mostrou, através dos resultados dos ensaios de MEV e DRX, que o aumento na rigidez das misturas ocorreu devido à transformação de hidróxido de cálcio e de compostos cimentícios em carbonato de cálcio. No processo de cura 2, o aumento nos valores de MR para as misturas solo-EAEP ocorreu somente devido à formação de compostos cimentícios, conforme evidenciado pelos resultados de MEV e DRX.

REFERÊNCIAS

ABD DURAIID, M.; AL-KHALID, H. Fatigue Characterization of WMA and Modeling Using Artificial Neural Networks. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 34, n. 3, p. 04021467, 2022/03/01 2022.

ADENIYI, F. I.; OGUNDIRAN, M. B.; HEMALATHA, T.; HANUMANTRAI, B. B. Characterization of raw and thermally treated Nigerian kaolinite-containing clays using instrumental techniques. **SN Applied Sciences**, 2, n. 5, p. 821, 2020/04/05 2020.

AFRASIABIAN, A.; SALIMI, M.; MOVAHEDRAD, M.; VAKILI, A. H. Assessing the impact of GBFS on mechanical behaviour and microstructure of soft clay. **International Journal of Geotechnical Engineering**, p. 1-11, 2019.

AKINWUMI, I. J. P. P. C. E. Soil modification by the application of steel slag. 58, n. 4, p. 371-377, 2014.

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, n. 1, p. 46676, 2017/04/28 2017.

ALDEEKY, H.; AL HATTAMLEH, O. Experimental study on the utilization of fine steel slag on stabilizing high plastic subgrade soil. **Advances in Civil Engineering**, 2017, 2017.

ALHARBI, F.; ALMOSHAIGE, A.; ALMOSHAOGEH, M.; ELRAGI, A. *et al.* Effect of Geo-Grid Depth in Roads Cross-Section on Reducing Pavement Rutting. 3, n. 1, p. 1-8, 2022.

AL-HOMIDY, A. A.; AL-AMOUDI, O.; MASLEHUDDIN, M.; SALEH, T. A. Stabilisation of dune sand using electric arc furnace dust. **International Journal of Pavement Engineering**, 18, n. 6, p. 513-520, 2017.

AL-MAHBASHI, A. M.; AL-SHAMRANI, M. A.; MOGHAL, A. A. B.; VYDEHI, K. V. Correlation-Based Studies on Resilient Modulus Values for Fiber-Reinforced Lime-Blended Clay. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, 7, n. 3, p. 59, 2021/08/09 2021.

ALNUNU, M. Z.; NALBANTOGLU, Z. Performance of Using Waste Marble Dust for the Improvement of Loose Sand in Deep Soil Mixing. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 2021/10/08 2021.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 145-91**: Standard Specification for Classification of Soils and Soil Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes Washington, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2487-17**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Pensilvânia ASTM International, 2017.

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, p. 409-420, 2019/10/30/ 2019.

AMIRI, S. T.; NAZIR, R.; DEHGHANBANADAKI, A. Experimental study of geotechnical characteristics of crushed glass mixed with kaolinite soil. **International Journal**, 14, n. 45, p. 170-176, 2018.

ARRIBAS, I.; SANTAMARIA, A.; RUIZ, E.; ORTEGA-LOPEZ, V. *et al.* Electric arc furnace

slag and its use in hydraulic concrete. **Construction and Building Materials**, 90, p. 68-79, 2015.

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 (n^o 200). Rio de Janeiro, 2012. 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.

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, 2016e, 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 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, 2016f, 9p.

AVET, F.; SCRIVENER, K., 2020, Singapore. **Simple and Reliable Quantification of Kaolinite in Clay Using an Oven and a Balance**. Springer Singapore. 147-156.

BALAGUERA, C. A. C.; BOTERO, M. A. G. Characterization of steel slag for the production of chemically bonded phosphate ceramics (CBPC). **Construction and Building Materials**,

241, p. 118138, 2020.

BHUVANESHWARI, S.; ROBINSON, R.; GANDHI, S. Resilient modulus of lime treated expansive soil. **Geotechnical Geological Engineering**, 37, n. 1, p. 305-315, 2019.

BILDIK, S.; LAMAN, M. Effect of geogrid reinforcement on soil - structure – pipe interaction in terms of bearing capacity, settlement and stress distribution. **Geotextiles and Geomembranes**, 48, n. 6, p. 844-853, 2020/12/01/ 2020.

BORGES MARINHO, A. L.; MOL SANTOS, C. M.; CARVALHO, J. M. F. d.; MENDES, J. C. *et al.* Ladle furnace slag as binder for cement-based composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 29, n. 11, p. 04017207, 2017.

BOZBEY, I.; KELESOGLU, M. K.; DEMIR, B.; KOMUT, M. *et al.* Effects of soil pulverization level on resilient modulus and freeze and thaw resistance of a lime stabilized clay. **Cold Regions Science and Technology**, 151, p. 323-334, 2018/07/01/ 2018.

BRAND, A. S.; SINGHVI, P.; FANIJO, E. O.; TUTUMLUER, E. Stabilization of a Clayey Soil with Ladle Metallurgy Furnace Slag Fines. **Materials**, 13, n. 19, p. 4251, 2020.

BUDDHDEV, B. G.; TIMANI, K. L., 2021, Singapore. **Critical Review for Utilization of Blast Furnace Slag in Geotechnical Application**. Springer Singapore. 87-98.

CARVALHO, A. I. S.; DE SOUZA ALMEIDA, M. S.; PEDREIRA, W. J. P.; COSTA, W. G. S. *et al.* Influência da Densificação do Solo de Subleito no Desempenho de Pavimentos Flexíveis. **Anuário do Instituto de Geociências**, 43, n. 4, p. 253-262, 2020.

CASTAGNOTTO, E.; LOCARDI, F.; SLIMANI, S.; PEDDIS, D. *et al.* Characterization of the Caput Mortuum purple hematite pigment and synthesis of a modern analogue. **Dyes and Pigments**, 185, p. 108881, 2021/02/01/ 2021.

CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X. *et al.* Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement concrete research**, 34, n. 9, p. 1633-1644, 2004.

CHAKRABORTY, S.; NAIR, S. Impact of curing time on moisture-induced damage in lime-treated soils. **International Journal of Pavement Engineering**, 21, n. 2, p. 215-227, 2020/01/28 2020.

CHITRAGAR, S. F.; SHIVAYOGIMATH, C. B.; MULANGI, R. H. Study on strength and volume change behavior of stabilized black cotton soil with different pH of soil-lime mixes for pavement subgrade. **International Journal of Pavement Research and Technology**, 14, n. 5, p. 543-548, 2021/09/01 2021.

CIKMIT, A. A.; TAKASHI, T.; KANG, G. O.; TANG, Y. X. *et al.*, 2018, **Strength Development of Stabilized Dredged Marine Clay Using Basic Oxygen Furnace Steel Slag**. ISOPE-I-18-316. Acesso em: 1/14/2021.

CIZER, Ö. Thematic Keynote Lime mortars in heritage: Fundamental insights into carbonation reaction and its biocatalization. *In: Structural analysis of historical constructions: anamnesis, diagnosis, therapy, controls*: CRC Press, 2016. p. 67-74.

CIZER, Ö.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; RUIZ-AGUDO, E.; ELSEEN, J. *et al.* Phase and morphology evolution of calcium carbonate precipitated by carbonation of hydrated lime. **Journal of Materials Science**, 47, n. 16, p. 6151-6165, 2012/08/01 2012.

DE WINDT, L.; DENELEE, D.; MAUBEC, N. Kinetics of lime/bentonite pozzolanic reactions at 20 and 50°C: Batch tests and modeling. **Cement and Concrete Research**, 59, p. 34-42, 2014/05/01/ 2014.

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

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-CLA 259**. Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996.

DER-SP. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. Projeto de Pavimentação. **IP-DE-P00/001**. São Paulo, 53 p, 2006.

DIAS, A. R. d. O.; AMANCIO, F. A.; SOUSA, I. L. X. d.; LUCAS, S. O. *et al.* Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. **Matéria (Rio de Janeiro)**, 25, 2020.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. Susceptibility of Asphalt Binders to Rutting: Literature Review. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 28, n. 2, p. 04015134, 2016/02/01 2016.

DU, Y.; CHEN, J.; HAN, Z.; LIU, W. A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods. **Construction and Building Materials**, 168, p. 893-905, 2018/04/20/ 2018.

ELHADJ, M. S. Y.; PERRIN, F. X. Influencing parameters of mechanochemical intercalation of kaolinite with urea. **Applied Clay Science**, 213, p. 106250, 2021/11/01/ 2021.

ERGENÇ, D.; FORT, R. Accelerating carbonation in lime-based mortar in high CO₂ environments. **Construction and Building Materials**, 188, p. 314-325, 2018/11/10/ 2018.

EUROSLAG. **The European Association representing metallurgical slag producers and processors**. 2019. Disponível em: <http://www.euroslag.com>

FRANCO, F.; MOTTA, L. J. M. d. u. d. p. M. Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método Mecânico–Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos. 2020.

GAJEWSKA, B.; KRASZEWSKI, C.; RAFALSKI, L. Significance of cement-stabilised soil grain size distribution in determining the relationship between strength and resilient modulus. **Road Materials and Pavement Design**, 19, n. 7, p. 1692-1701, 2018/10/03 2018.

GARCÍA, L. C. H.; SALAMANCA, N. F. L. Resilient Module Soil-Cement Prediction based on Setting Temperature. **Ingeniería e Investigación**, 40, p. 7-13, 2020.

GRAFFITTI, D. F. Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica. 2002.

HAAS, S.; RITTER, H.-J. Soil improvement with quicklime–long-time behaviour and carbonation. **Road Materials and Pavement Design**, 20, n. 8, p. 1941-1951, 2019.

HAFEZ, M.; MOUSA, R.; AWED, A.; EL-BADAWY, S., 2019, Cham. **Soil Reinforcement Using Recycled Plastic Waste for Sustainable Pavements**. Springer International Publishing. 7-20.

HAN, C.; DONG, Q.; XU, X. Microstructural analysis on the variation of resilient modulus of lime modified soil under freezing–thawing action. **Road Materials and Pavement Design**, p. 1-15, 2021.

HASSAN, H. J. A.; RASUL, J.; SAMIN, M. Effects of Plastic Waste Materials on Geotechnical Properties of Clayey Soil. **Transportation Infrastructure Geotechnology**, 8, n. 3, p. 390-413, 2021/09/01 2021.

HAY, R.; KASHWANI, G.; CELIK, K. Carbonation, strength development, and characterization of calcined limestone as a potential construction material. **Cement and Concrete Research**, 139, p. 106263, 2021/01/01/ 2021.

HOSSEN, S. K. B.; GALLANT, A. P.; ASHRAF, W. Elemental Testing of Carbonated Silty Sand Treated with Lime. *In: Geo-Congress 2020*, 2020. p. 562-571.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2004. 0136552757.

IKEAGWUANI, C. C.; NWONU, D. C. Resilient Modulus of Lime-Bamboo Ash Stabilized Subgrade Soil with Different Compactive Energy. **Geotechnical and Geological Engineering**, 37, n. 4, p. 3557-3565, 2019/08/01 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320**. Partice Size Analysis - Laser Diffraction Methods, the International Organization for Standardization, 2020.

ISLAM, M. R.; TAREFDER, R. A. **Pavement Design: Materials, Analysis, and Highways**. McGraw-Hill Education, 2020. 1260458911.

ISMAIL, A. I. M.; AWAD, S. A.; MWAIFY, M. A. G. The Utilization of Electric Arc Furnace Slag in Soil Improvement. **Geotechnical and Geological Engineering**, 37, n. 1, p. 401-411, 2019/01/01 2019.

JORAT, M. E.; GODDARD, M. A.; MANNING, P.; LAU, H. K. *et al.* Passive CO₂ removal in urban soils: Evidence from brownfield sites. **Science of The Total Environment**, 703, p. 135573, 2020/02/10/ 2020.

KANG, G.; CIKMIT, A. A.; TSUCHIDA, T.; HONDA, H. *et al.* Strength development and microstructural characteristics of soft dredged clay stabilized with basic oxygen furnace steel slag. **Construction and Building Materials**, 203, p. 501-513, 2019/04/10/ 2019.

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, p. 320-330, 2015.

KUČERÍK, J.; SVATOŇ, K.; MALÝ, S.; BRTNICKÝ, M. *et al.* Determiration of soil properties using thermogravimetry under laboratory conditions. 71, n. 3, p. 415-419, 2020.

LAM, M. N.-T.; LE, D.-H.; JARITNGAM, S. Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash. **Construction and Building Materials**, 191, p. 912-922, 2018/12/10/ 2018.

LI, C.-C.; LIN, C.-M.; CHANG, Y.-E.; CHANG, W.-T. *et al.* Stabilization and Crystal Characterization of Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Modified with Ladle Furnace Slag and Alumina. **Metals**, 10, n. 4, p. 501, 2020.

LI, M.; WANG, Q.; YANG, J.; GUO, X. *et al.* Strength and Mechanism of Carbonated Solidified Clay with Steel Slag Curing Agent. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 25, n. 3, p. 805-821, 2021/03/01 2021.

LIN, T.; ISHIKAWA, T.; TOKORO, T.; MARUYAMA, K. *et al.*, 2022, Cham. **Modification of Japanese Pavement Fatigue Life Criteria by Considering Climatic Effects in Cold Regions**. Springer International Publishing. 29-39.

LIU, C.; DUPONT-NIVET, G.; WANG, W.; DENG, C. Magnetic response to pedogenesis in aerobic soils of different weathering degree. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 567, p. 110240, 2021/04/01/ 2021.

LOPES, E. C.; DA SILVA, T. O.; PITANGA, H. N.; PEDROTI, L. G. *et al.* Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. **International Journal of Pavement Engineering**, p. 1-12, 2021.

LOPES, M. M. S.; ALVARENGA, R. d. C. S. S. A.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L. *et al.* Influence of the incorporation of granite waste on the hiding power and abrasion resistance of soil pigment-based paints. **Construction and Building Materials**, 205, p. 463-474, 2019/04/30/ 2019.

LU, Y.; LIU, S.; ZHANG, Y.; LI, Z. *et al.* Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil. **Cold Regions Science and Technology**, 170, p. 102926, 2020/02/01/ 2020.

LUKIANCHUKI, J. A.; DE OLIVEIRA, J. R. M. d. S.; DE ALMEIDA, M. d. S. S.; DOS REIS, J. H. C. *et al.* Geotechnical Behavior of Construction Waste (CW) as a Partial Replacement of a Lateritic Soil in Fiber-Reinforced Cement Mixtures. **Geotechnical and Geological Engineering**, 39, n. 2, p. 919-942, 2021/02/01 2021.

MAHMUDI, M.; ALTUN, S.; ESKISAR, T. Experimental and Numerical Evaluation of Clay Soils Stabilized with Electric Arc Furnace (EAF) Slag. **Advances in Sustainable Construction Resource Management**, 144, p. 73, 2021.

MAHOUTIAN, M.; GHOULEH, Z.; SHAO, Y. Carbon dioxide activated ladle slag binder. **Construction and Building Materials**, 66, p. 214-221, 2014/09/15/ 2014.

MAKÓ, É.; KRISTÓF, J.; HORVÁTH, E.; VÁGVÖLGYI, V. Kaolinite–urea complexes obtained by mechanochemical and aqueous suspension techniques—A comparative study. **Journal of Colloid and Interface Science**, 330, n. 2, p. 367-373, 2009/02/15/ 2009.

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

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

MATHIAN, M.; BUENO, G. T.; BALAN, E.; FRITSCH, E. *et al.* Kaolinite dating from Acrisol and Ferralsol: A new key to understanding the landscape evolution in NW Amazonia (Brazil). **Geoderma**, 370, p. 114354, 2020/07/01/ 2020.

MOOREHEAD, D. R. Cementation by the carbonation of hydrated lime. **Cement and Concrete Research**, 16, n. 5, p. 700-708, 1986/09/01/ 1986.

MORSI, S. M.; EMIRA, H. S.; EL-SAWY, S. M.; MOHSEN, R. M. *et al.* Synthesis and characterization of kaolinite/polyaniline nanocomposites and investigating their anticorrosive performance in chlorinated rubber/alkyd coatings. 40, n. 7, p. 2777-2789, 2019.

NAKARAI, K.; YOSHIDA, T. Effect of carbonation on strength development of cement-treated Toyoura silica sand. **Soils and Foundations**, 55, n. 4, p. 857-865, 2015.

NETINGER, I.; JELČIĆ RUKAVINA, M.; SERDAR, M.; BJEGOVIĆ, D. J. T. v. T. G. STEEL SLAG AS A VALUABLE MATERIAL FOR CONCRETE PRODUCTION. 21, n. 5, 2014.

NOOLU, V.; MUDAVATH, H.; PILLAI, R. J. Resilient modulus of clayey subgrade soils treated with calcium carbide residue. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 15, n. 3, p. 288-297, 2021/03/16 2021.

NWONU, D. C.; IKEAGWUANI, C. C. Evaluating the effect of agro-based admixture on lime-treated expansive soil for subgrade material. **International Journal of Pavement Engineering**, 22, n. 12, p. 1541-1555, 2021/10/15 2021.

OLIVEIRA, J. d. A.; RIBEIRO, J. C. L.; PEDROTI, L. G.; FARIA, C. S. d. *et al.* Durability of concrete after fire through accelerated carbonation tests. **Materials Research**, 22, 2019.

OLUWASOLA, E.; AFOLAYAN, A.; POPOOPA, M.; AFOLABI, A. Effect of Steel Slag on Engineering Properties of Lateritic Soil. **American Journal of Engineering Research**, 9, n. 6, p. 20-27, 2020.

PADMARAJ, D.; ARNEPALLI, D. N. The durability of cementitious phases in lime stabilisation: A critical review. *In*: Indian Geotechnical Conference, 2018, Bengaluru. Indian Institute of Science, December p. 5.

PADMARAJ, D.; ARNEPALLI, D. N., 2021, Singapore. **Durability of Cementitious Phases in Lime Stabilization: A Critical Review**. Springer Singapore. 483-491.

PARK, S.-S.; LE, T.-T.; NONG, Z.; MOON, H.-D. *et al.* Chemically Induced Calcium Carbonate Precipitation for Improving Strength of Sand. 32, n. 9, p. 04020238, 2020.

PHUMMIPHAN, I.; HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; ARULRAJAH, A. *et al.* High

calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material. **Journal of Hazardous Materials**, 341, p. 257-267, 2018/01/05/ 2018.

PLANTE, A. F.; FERNÁNDEZ, J. M.; LEIFELD, J. Application of thermal analysis techniques in soil science. **Geoderma**, 153, n. 1-2, p. 1-10, 2009.

POMAKHINA, E.; DENELEE, D.; GAILLOT, A.-C.; PARIS, M. *et al.* ²⁹Si solid state NMR investigation of pozzolanic reaction occurring in lime-treated Ca-bentonite. **Cement and Concrete Research**, 42, n. 4, p. 626-632, 2012/04/01/ 2012.

QASRAWI, H. Hardened Properties of Green Self-Consolidating Concrete Made with Steel Slag Coarse Aggregates under Hot Conditions. **Materials Journal**, 117, n. 1, 2020.

RONDÓN-QUINTANA, H. A.; RUGE-CÁRDENAS, J. C.; FARIAS, M. M. d. Behavior of Hot-Mix Asphalt Containing Blast Furnace Slag as Aggregate: Evaluation by Mass and Volume Substitution. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 31, n. 2, p. 04018364, 2019.

SALAHUDEEN, A. B.; JALILI, M.; EIDGAHEE, D. R.; ONYELOWE, K. C. *et al.*, 2022, Cham. **Prediction of Durability, Resilient Modulus and Resistance Value of Cement Kiln Dust-Stabilized Expansive Clay for Flexible Pavement Application Using Artificial Neural Networks**. Springer International Publishing. 675-687.

SANTAMARIA, A.; FALESCHINI, F.; GIACOMELLO, G.; BRUNELLI, K. *et al.* Dimensional stability of electric arc furnace slag in civil engineering applications. **Journal of Cleaner Production**, 205, p. 599-609, 2018/12/20/ 2018.

SANTAMARÍA, A.; GARCÍA-LLONA, A.; REVILLA-CUESTA, V.; PIÑERO, I. *et al.* Bending tests on building beams containing electric arc furnace slag and alternative binders and manufactured with energy-saving placement techniques. **Structures**, 32, p. 1921-1933, 2021/08/01/ 2021.

SANTOS, T. A. d.; PINHEIRO, R. J. B.; SPECHT, L. P.; BRITO, L. A. T. J. M. Análise do desempenho de subleitos rodoviários à luz de conceitos da Mecânica dos Pavimentos. 25, 2020.

SEBBAR, N.; LAHMILI, A.; BAHI, L.; OUADIF, L., 2020, **Treatment of clay soils with steel slag, in road engineering**. EDP Sciences. 02017.

SERRA, M. F.; CONCONI, M. S.; SUÁREZ, G.; AGIETTI, E. *et al.* Firing transformations of an argentinean calcareous commercial clay. 59, p. 254-261, 2013.

SHAHSAVANI, S.; VAKILI, A. H.; MOKHBERI, M. Effects of freeze-thaw cycles on the characteristics of the expansive soils treated by nanosilica and Electric Arc Furnace (EAF) slag.

Cold Regions Science and Technology, 182, p. 103216, 2021/02/01/ 2021.

SHEEN, Y.-N.; LE, D.-H.; LAM, M. N.-T. Performance of Self-compacting Concrete with Stainless Steel Slag Versus Fly Ash as Fillers: A Comparative Study. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, 2021.

SIEWERT, C.; KUČERÍK, J. Practical applications of thermogravimetry in soil science. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 120, n. 1, p. 471-480, 2015/04/01 2015.

SILVA, B. A.; FERREIRA PINTO, A. P.; GOMES, A.; CANDEIAS, A. Effects of natural and accelerated carbonation on the properties of lime-based materials. **Journal of CO2 Utilization**, 49, p. 101552, 2021/07/01/ 2021.

SOSA, I.; THOMAS, C.; POLANCO, J. A.; SETIÉN, J. *et al.* High Performance Self-Compacting Concrete with Electric Arc Furnace Slag Aggregate and Cupola Slag Powder. **Applied Sciences**, 10, n. 3, p. 773, 2020.

TOKARSKI, D.; WIESMEIER, M.; DOLEŽALOVÁ WEISSMANNOVÁ, H.; KALBITZ, K. *et al.* Linking thermogravimetric data with soil organic carbon fractions. **Geoderma**, 362, p. 114124, 2020/03/15/ 2020.

TRAVEN, K.; ČEŠNOVAR, M.; DUCMAN, V. Particle size manipulation as an influential parameter in the development of mechanical properties in electric arc furnace slag-based AAM. **Ceramics International**, 45, n. 17, p. 22632-22641, 2019.

VAN BALEN, K.; VAN GEMERT, D. Modelling lime mortar carbonation. **Materials and Structures**, 27, n. 7, p. 393-398, 1994/08/01 1994.

VARGA, G. J. E. The structure of kaolinite and metakaolinite. 59, n. 1, p. 6-9, 2007.

VENKATESH, N.; ALI, D.; PILLAI, R. J.; HEERA LAL, M., 2021, Singapore. **Strength and Durability Characteristic of Lime Stabilized Black Cotton Soil**. Springer Singapore. 739-750.

VITALE, E.; DENELE, D.; RUSSO, G. J. B. o. E. G.; ENVIRONMENT, t. Effects of carbonation on chemo-mechanical behaviour of lime-treated soils. 80, n. 3, p. 2687-2700, 2021.

WANG, Y.; LU, S.; REN, T.; LI, B. Bound water content of air-dry soils measured by thermal analysis. **Soil Science Society of America Journal**, 75, n. 2, p. 481-487, 2011.

WU, J.; LIU, Q.; DENG, Y.; YU, X. *et al.* Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways. **Soils Foundations**, 59, n. 4, p. 955-965, 2019.

XU, B.; YI, Y. Use of ladle furnace slag containing heavy metals as a binding material in civil engineering. **Science of The Total Environment**, 705, p. 135854, 2020.

XU, L.; ZHA, F.; LIU, C.; KANG, B. *et al.* Experimental investigation on carbonation behavior in lime-stabilized expansive soil. 2020, 2020.

YAGHOUBI, E.; YAGHOUBI, M.; GUERRIERI, M.; SUDARSANAN, N. Improving expansive clay subgrades using recycled glass: Resilient modulus characteristics and pavement performance. **Construction and Building Materials**, 302, p. 124384, 2021/10/04/ 2021.

YARAHMADI, A. M.; SHAFABAKHSH, G.; ASAKEREH, A. Laboratory investigation of the effect of nano CaCO_3 on rutting and fatigue of stone mastic asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, 317, p. 126127, 2022/01/24/ 2022.

ZABIELSKA-ADAMSKA, K.; WASIL, M.; DOBRZYCKI, P. Resilient Response of Cement-Treated Coarse Post-Glacial Soil to Cyclic Load. **Materials**, 14, n. 21, 2021.

ZAREI, S.; ALAE, M.; OUYANG, J.; ZHAO, Y. Rutting and surface-initiated cracking mechanisms of semi-flexible pavements with cement asphalt emulsion pastes. **International Journal of Pavement Engineering**, p. 1-15, 2022.

ZHA, F.; LIU, C.; KANG, B.; XU, L. *et al.* Effect of Carbonation on the Leachability of Solidified/Stabilized Lead-Contaminated Expansive Soil. **Advances in Civil Engineering**, 2021, p. 8880818, 2021/02/11 2021.

ZIAEE, S. A.; BEHNIA, K. Evaluating the effect of electric arc furnace steel slag on dynamic and static mechanical behavior of warm mix asphalt mixtures. **Journal of Cleaner Production**, 274, p. 123092, 2020/11/20/ 2020.

ZUMRAWI, M. M.; BABIKIR, A. A.-A. A. Laboratory Study of Steel Slag Used for Stabilizing Expansive Soil. **University Of Khartoum Engineering Journal**, 6, n. 2, 2017.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os objetivos desta pesquisa, foi possível constatar que os resíduos industriais, EAEP e cinza volante, melhoram as propriedades mecânicas das amostras de solo avaliadas, possibilitando seu aproveitamento como agente estabilizante de solos tropicais de baixa capacidade de suporte, sendo uma alternativa que reduziria seu descarte no meio físico, mitigando assim seus impactos ambientais.

Foi possível propor um método de dosagem estatística através de um planejamento experimental em rede simplex-centróide capaz de otimizar propriedades mecânicas de misturas solo-EAEP-cinza volante, o qual se torna um método alternativo de dosagem mais racional que os métodos empíricos utilizados atualmente para misturas entre solos e resíduos. Esse método forneceu como mistura ótima, a qual maximiza as propriedades mecânicas estudadas, as seguintes proporções entre os componentes: 80% de solo, 20% de EAEP e 0% de cinza volante. Foi observada a formação de compostos cimentícios nessa mistura aos 7 dias de cura selada em câmara úmida.

Os processos de carbonatação ao ar e em câmara de carbonatação acelerada mostraram que a formação de carbonato de cálcio melhora as propriedades mecânicas das misturas solo-EAEP, proporcionando misturas mais resistentes e duráveis ao longo do tempo. Observou-se também que a formação de carbonato de cálcio ocorre durante um longo período de tempo, mostrando o potencial de sequestro de CO₂ da amostra de escória de aciaria elétrica primária.

Através da análise estrutural de um pavimento asfáltico, no qual a camada de subleito foi constituída de misturas solo-EAEP, foi possível constatar que o aumento nos valores de módulo de resiliência ocorreu devido à formação de carbonato de cálcio no processo de cura em carbonatação acelerada e à formação de compostos cimentícios no processo de cura em câmara úmida, promovendo uma melhor resposta do pavimento como um todo, diminuindo os efeitos gerados pelo trincamento por fadiga e pelo afundamento plástico nas trilhas de roda. Considerando a cura em carbonatação acelerada, em todos os tempos de cura, os valores de $N_{projeto}$ puderam ser satisfeitos com melhoramentos nas camadas estruturais do pavimento.

A aplicação de resíduos industriais na estabilização de solos tropicais de baixa capacidade de suporte mostrou-se uma alternativa viável técnica e ambientalmente ao melhorar as

propriedades mecânicas avaliadas e propor uma alternativa de aproveitamento desses resíduos em obras de pavimentação, as quais comumente demandam grandes quantitativos de materiais.