

JOSÉ ROBERTO FERNANDES GALINDO

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO
CIVIL E ESCÓRIA DE ACIARIA PARA USO 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: Heraldo Nunes Pitanga

Coorientadores: Taciano Oliveira da Silva
Leonardo Gonçalves Pedroti
Roberto Lopes Ferraz

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

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

T

G158e Galindo, José Roberto Fernandes, 1972-
2022 Estabilização de solos tropicais com resíduos da construção
civil e escória de aciaria para uso em pavimentação / José
Roberto Fernandes Galindo. – Viçosa, MG, 2022.
1 tese eletrônica (158 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.264>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Mecânica do solo. 2. Escória (Metalurgia). 3. Gestão integrada de resíduos sólidos. 4. Pavimentos. I. Pitanga, Heraldo Nunes, 1973-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 624.15136


JOSÉ ROBERTO FERNANDES GALINDO

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO
CIVIL E ESCÓRIA DE ACIARIA PARA USO 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: 25 de fevereiro de 2022.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 JOSE ROBERTO FERNANDES GALINDO
Data: 18/05/2023 13:14:39-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

José Roberto Fernandes Galindo
Autor

Documento assinado digitalmente
 HERALDO NUNES PITANGA
Data: 19/05/2023 10:43:48-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Heraldo Nunes Pitanga
Orientador

AGRADECIMENTOS

A DEUS.

Aos meus pais e irmãos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV, pela oportunidade de realizar o doutorado.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da UFV, em especial ao professor Heraldo Nunes Pitanga, pela orientação, contribuições e amizade.

Aos membros da banca examinadora, professores Taciano Oliveira da Silva, Leonardo Gonçalves Pedroti, Roberto Lopes Ferraz, Carlos Alexandre Braz de Carvalho e Mario Sergio de Souza Almeida pela disponibilidade e valiosas sugestões.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da UFV, que auxiliaram na coleta de amostras e execução dos ensaios experimentais da pesquisa.

Aos seguintes laboratórios e suas equipes pelo uso dos equipamentos e colaborações: Laboratório de Difração e Espalhamento de Raios X e Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Departamento de Física da UFV, ao Núcleo de Microscopia e Microanálise da UFV, ao Laboratório de Engenharia Civil da UFV e ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFOP.

Aos amigos da Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelo apoio, debates e companheirismo.

A todos que direta ou indiretamente ajudaram na realização desta pesquisa, serei eternamente grato.

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

RESUMO

GALINDO, José Roberto Fernandes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2022. **Estabilização de solos tropicais com resíduos da construção civil e escória de aciaria para uso em pavimentação.** Orientador: Heraldo Nunes Pitanga. Coorientadores: Taciano Oliveira da Silva, Leonardo Gonçalves Pedroti e Roberto Lopes Ferraz.

Globalmente, o crescente consumo de matérias-primas naturais e o gradual aumento na geração de resíduos sólidos demandam a criação de alternativas de reciclagem. Entre os muitos estudos de reuso de materiais para a construção de pavimentos, o reaproveitamento de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (RCCr) e de finos de escória oxidante de aciaria elétrica (FEAE) tem ganho especial destaque, tendo em vista suas vantagens econômicas, sociais, ambientais ou tecnológicas. Com o propósito de contribuir no reaproveitamento destes resíduos, nesta pesquisa, investigou-se a metodologia de Planejamento de Experimentos (DOE) na determinação dos teores ideais de RCCr e FEAE para estabilização de dois distintos solos tropicais, visando à utilização em camadas estruturais de pavimentos. O efeito das variáveis independentes (teor de solo, teor de RCCr e teor de FEAE) nas propriedades de resistência à compressão simples (RCS) e CBR (*California Bearing Ratio*) foi investigado por análise de equações de regressão e Metodologia de Superfícies de Resposta. Além disso, os materiais e produtos gerados foram investigados por técnicas de fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX), microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os solos e misturas otimizadas foram avaliados quanto a RCS, CBR, módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP) nas energias do Proctor normal e intermediária nos tempos de cura 0, 7 e 28 dias. Os resultados obtidos mostraram que: (i) a utilização do DOE associado com Metodologia de Superfícies de Resposta e função Desejabilidade permitiu a obtenção de proporções satisfatórias entre os componentes solo e resíduos. Para os modelos de regressão ajustados, as melhores composições, em massa seca dos materiais, foram: 80% de solo, 0% de RCCr e 20% de FEAE, para o solo arenoso, e 18% de solo, 62% RCCr e 20% de FEAE, para o solo argiloso; (ii) a adição dos resíduos aos solos proporcionaram aumento no peso específico aparente seco máximo, redução na umidade ótima, redução da expansibilidade e maior trabalhabilidade; (iii) os RCCr e FEAE proporcionaram ganhos de resistência mecânica aos solos, com incrementos significativos nos valores de RCS e índice CBR. Essas melhorias das características mecânicas observadas estão correlacionadas com o aumento da rigidez das misturas otimizadas após o processo de cura selada. Como destaque, temos as melhorias no

índice CBR do solo arenoso de 17% para 101%, na energia Proctor normal, e de 17% para 202%, na energia Proctor intermediária, e do solo argiloso de 7% para 120%, na energia Proctor normal, e de 10% para 212%, na energia Proctor intermediária; (iv) as misturas solo-resíduos apresentaram aumentos expressivos nos valores de MR comparativamente aos solos na condição natural. A incorporação dos resíduos aos solos arenoso e argiloso proporcionaram incrementos nos valores de MR da ordem de 85% e 120%, para compactação na energia Proctor normal, e 87% e 111%, para compactação na energia Proctor intermediária, respectivamente; (v) a adição dos resíduos aos solos conferiu às misturas bom desempenho em relação à DP, apresentando baixas deformações aos 7 dias de cura e atingindo o *shakedown* em todos os estados de tensões analisados; (vi) os ensaios de DRX e MEV permitiram identificar a formação de produtos cimentícios típicos de reações pozolânicas, como hidróxido de cálcio (CH), silicato de cálcio hidratado (CSH), aluminato de cálcio hidratado (CAH) e sílico-aluminato de cálcio hidratado (CASH). Esses compostos foram formados devido às reações de hidratação do óxido de cálcio presente no FEAE e à sílica e à alumina presentes nos solos e RCCr. Os resultados do estudo permitiram determinar misturas solo-resíduos que atendem aos critérios do DNIT concernentes a parâmetros CBR exigíveis para execução de camadas de base, sub-base e reforço de subleito de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave: Aproveitamento de resíduos. Resíduos sólidos da construção civil. Escória de aciaria. Estabilização de solos. Pavimentação.

ABSTRACT

GALINDO, José Roberto Fernandes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2022. **Stabilization of tropical soils with construction and demotion waste and steel slag for use in paving.** Adviser: Heraldo Nunes Pitanga. Co-advisers: Taciano Oliveira da Silva, Leonardo Gonçalves Pedroti and Roberto Lopes Ferraz.

Globally, the increasing consumption of natural raw materials and the increase generation of solid waste demand the creation of recycling alternatives. Among the many studies on the reuse of materials for the construction of pavements, the reuse of recycled aggregates from construction and demolition waste (CDWr) and fines of electrical arc furnace oxidizing slag (FEAE) has stood out for its economic, social, environmental, and technological advantages. In order to contribute to the reuse of these residues, this research investigated the Design of Experiments (DOE) methodology to determine the ideal contents of CDWr and FEAE for stabilizing of two different tropical soils, for use in structural layers of pavements. The effect of the independent variables (soil content, RCCr content and FEAE content) on the properties of unconfined compressive strength (UCS) and CBR index (California Bearing Ratio) was investigated by analysis of regression equations and Response Surface Methodology. In addition, the materials and products generated were investigated by X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) techniques. Soils and optimized mixtures were evaluated for UCS, CBR index, resilient modulus (MR) and permanent deformation (DP) at standard and intermediate Proctor energies at curing times 0, 7 and 28 days. The results indicated that: (i) the use of DOE associated with Response Surface Methodology and Desirability function allowed obtaining satisfactory proportions between the soil and residue components. For the adjusted regression models, the best compositions, in terms of dry mass of the materials, were: 80% soil, 0% of CDWr and 20% of FEAE for the sandy soil and 18% soil, 62% CDWr and 20% of FEAE for the clayey soil; (ii) the addition of residues to the soils provided an increase in the maximum dry specific weight, a reduction in the optimal moisture content, a reduction in expandability and greater workability. (iii) CDWr and FEAE provided gains in soil mechanical strength, with significant increases in UCS and CBR index values. These improvements in the mechanical characteristics observed are correlated with the increased stiffness of the optimized mixtures after the sealed curing process. The highlights were the improvements in the CBR index of sandy soil from 17% to 101% at standard Proctor compaction effort energy and from 17% to 202% at

intermediate Proctor compaction effort energy, and in clay soil from 7% to 120% at standard Proctor compaction effort energy and from 10 % to 212% at intermediate Proctor compaction effort energy; (iv) soil-waste mixtures show significant increases in MR values compared to soils in their natural condition. The incorporation of residues into sandy and clayey soils provided increments in MR values of the order of 85% and 120% for standard Proctor compaction effort and 87% and 111% for intermediate Proctor compaction effort, respectively; (v) the addition of residues to the soils produced mixtures with good performance in relation to DP, presenting low deformations at 7 days of curing and reaching shakedown in all stress states analyzed; (vi) XRD and SEM tests allowed the identification of the formation of cementitious products typical of pozzolanic reactions, such as calcium hydroxide (CH), calcium silicate hydrates (CSH), calcium aluminate hydrates (CAH) and ettringite (CASH). These compounds were formed due to the hydration reactions of calcium oxide present in FEAE and silica and alumina present in soils and CDWr. The study results allowed determining soil-waste mixtures that meet the DNIT criteria regarding the required CBR parameters for the execution of road pavement's base layers, sub-base, and subgrade reinforcement.

Keywords: Use of waste. Construction and demolition waste. Steel slag. Soil stabilization. Paving.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Amostras de S1 (a), S2 (b), RCCr miúdo (c), RCCr graúdo (d), escória no estado bruto (e) e FEAE (f).....	31
Figura 2.2: Planejamento experimental de mistura em rede simplex-vértices extremos para os efeitos dos componentes solo, RCCr e FEAE: (a) diagrama de composição para os componentes S1, RCCr1 e FEAE; (b) diagrama de composição para os componentes S2, RCCr2 e FEAE	33
Figura 2.3: Curvas granulométricas dos materiais	37
Figura 2.4: Difractogramas do S1 e S2	41
Figura 2.5: Difractogramas do RCCr e FEAE	42
Figura 2.6: Fotomicrografias dos solos obtidas por MEV: (a) organização microestrutural de S1; (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe das microagregações e foliações de partículas lamelares; (c) organização microestrutural de S2; (d) ampliação de “c”, com detalhe da estruturação de um torrão e do plasma argiloso que permeia a amostra	43
Figura 2.7: Fotomicrografias do RCCr e FEAE obtidas por MEV: (a) morfologia do RCCr fino ($\varnothing \leq 0,15$ mm); (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe de partículas com dimensões inferiores a 10 μm ; (c) morfologia do FEAE; (d) ampliação de “c”, com detalhe do grande número de partículas, inferiores 5 μm , aderidas às partículas maiores	44
Figura 2.8: Valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal	47
Figura 2.9: Valores médios do índice CBR das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal	48
Figura 2.10: Superfícies de resposta da propriedade RCS das misturas S1-RCCr1-FEAE: (a) cura de 0 dia; (b) cura de 7 dias.....	50
Figura 2.11: Superfícies de resposta da propriedade RCS das misturas S2-RCCr2-FEAE: (a) cura de 0 dia; (b) cura de 7 dias.....	51
Figura 2.12: Superfícies de resposta da propriedade índice CBR das misturas S1-RCCr1-FEAE: (a) cura de 0 dias; (b) cura de 7 dias	52
Figura 2.13: Superfícies de resposta da propriedade índice CBR das misturas S2-RCCr2-FEAE: (a) cura de 0 dia; (b) cura de 7 dias.	53
Figura 2.14: Intersecção das superfícies de resposta das propriedades RCS e CBR das misturas S1-RCCr1-FEAE (a) e S2-RCCr2-FEAE (b), apresentando as regiões de composições que satisfazem às restrições impostas (região otimizada, em amarelo)	54
Figura 2.15: Valores médios de RCS e CBR das misturas M1 e M12, compactadas na energia do Proctor normal, nas curas 0, 7 e 28 dias	57
Figura 2.16: Difractogramas de M1 e M12 após período de cura selada de 28 dias	58
Figura 2.17: Fotomicrografias de M1 obtidas por MEV: (a) organização microestrutural de M1 ao 0 dia de cura; (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe de foliações de partículas lamelares	

dispersas; (c) organização microestrutural de M1 aos 28 dias de cura, exibindo uma distribuição de grãos mais coesa; (d) ampliação de “c”, com detalhe da formação dos compostos cimentantes de CSH e CASH	59
Figura 2.18: Fotomicrografias de M12 obtidas por MEV: (a) organização microestrutural de M12 ao 0 dia de cura; (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe de partículas dispersas; (c) organização microestrutural de M12 aos 28 dias de cura, exibindo uma composição mais densa; (d) ampliação de “c”, com detalhe da formação dos compostos cimentantes de CH e CSH ...	60
Figura 3.1: Amostras de S1 (a), S2 (b), RCCr miúdo (c) e RCCr graúdo (d)	78
Figura 3.2: Escória no estado bruto (a) e após processo de cominuição (b)	79
Figura 3.3: Planejamento experimental de mistura em rede simplex-vértices extremos para os efeitos dos componentes solo, RCCr e FEAE: (a) diagrama de composição para os componentes S1, RCCr1 e FEAE; (b) diagrama de composição para os componentes S2, RCCr2 e FEAE	81
Figura 3.4: Curvas granulométricas dos materiais	86
Figura 3.5: Difratogramas dos materiais	90
Figura 3.6: Fotomicrografias dos solos obtidas por MEV: (a) organização microestrutural de S1; (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe das microagregações e foliações de partículas lamelares; (c) organização microestrutural de S2; (d) ampliação de “c”, com detalhe da estruturação de um torrão e do plasma argiloso que permeia a amostra	91
Figura 3.7: Fotomicrografias do RCCr e FEAE obtidas por MEV: (a) morfologia do RCCr fino ($\varnothing \leq 0,15$ mm); (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe de partículas com dimensões inferiores à 10 μm ; (c) morfologia dos FEAE; (d) ampliação de “c”, com detalhe do grande número de partículas, inferiores 5 μm , aderidas às partículas maiores	92
Figura 3.8: Variação dos parâmetros W_{ot} , $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e índice de vazios das misturas investigadas	93
Figura 3.9: Valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal	95
Figura 3.10: Valores médios do índice CBR das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal	96
Figura 3.11: Gráficos exibindo, para as misturas investigadas, os valores de RCS e CBR preditos pelos modelos e os observados experimentalmente em laboratório	97
Figura 3.12: Curvas granulométricas de M1 e M12	99
Figura 3.13: Valores médios de RCS (a) e CBR (b) dos solos e misturas M1 e M12 nas curas de 0 e 7 dias, compactadas nas energias do Proctor normal e intermediária	100
Figura 3.14: Valores médios de MR ($\sigma_3 = 0,05$ MPa; $\sigma_d = 0,10$ MPa) dos solos e misturas M1 e M12 nas curas de 0, 7 e 28 dias, compactadas nas energias do Proctor normal e intermediária	102
Figura 3.15: Difratogramas de M1 e M12 aos 28 dias de cura	104

Figura 3.16: Fotomicrografias de M1 e M12 obtidas por MEV: (a) organização microestrutural de M1 ao 0 dia de cura, apresentando detalhe de foliações e partículas lamelares dispersas; (b) organização microestrutural de M12 ao 0 dia de cura, apresentando detalhe de partículas dispersas; (c) organização microestrutural de M1 aos 28 dias de cura, exibindo uma distribuição de grãos mais coesa e formação dos compostos cimentantes de CSH e CASH aderidas à superfície das partículas; (d) organização microestrutural de M12 aos 28 dias de cura, exibindo uma composição mais densa e formação dos compostos cimentantes de CH e CSH aderidas à superfície das partículas.....	105
Figura 4.1: Amostras de S1 (a), S2 (b), RCCr miúdo (c) e RCCr graúdo (d) preparadas para ensaios de caracterização.....	120
Figura 4.2: Escória de aciaria no estado bruto (a) e após processo de pulverização (b)	121
Figura 4.3: Curvas granulométricas dos materiais	127
Figura 4.4: Difratogramas dos materiais	130
Figura 4.5: Fotomicrografias de S1 obtidas por microscopia óptica e MEV: (a) imagem de S1 obtida por microscópio óptico, evidenciando a grande presença de cristais de quartzo e a baixa coesão entre os grãos do solo; (b) imagem da organização microestrutural de S1 obtida por MEV; (c) ampliação de “b”, apresentando microagregações e foliações de partículas lamelares dispersas	131
Figura 4.6: Fotomicrografias de S2 obtidas por microscopia óptica e MEV: (a) imagem de S2 obtida por microscopia óptica, demonstrando a grande presença torrões formados pela aglutinação de partículas de argila e silte envoltas em partículas maiores; (b) imagem da organização microestrutural de S2 obtida por MEV; (c) ampliação de “b”, com detalhe da estruturação de um torrão e do plasma argiloso que permeia a amostra	132
Figura 4.7: Fotomicrografias do RCCr e FEAE obtidas por MEV: (a) morfologia do RCCr fino ($\varnothing \leq 0,15$ mm); (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe de partículas com dimensões inferiores à 10 μ m; (c) morfologia dos FEAE; (d) ampliação de “c”, com detalhe do grande número de partículas, inferiores 5 μ m, aderidas às partículas maiores	133
Figura 4.8: Valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal	134
Figura 4.9: Valores médios do índice CBR das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.	135
Figura 4.10: Variação do deslocamento plástico (ϵ_p) em função do número de ciclos de aplicação de carga (N)	137
Figura 4.11: Investigação da ocorrência de Shakedown	138
Figura 4.12: Difratogramas de M1 e M12 aos 7 dias de cura	140
Figura 4.13: Fotomicrografias de S1, S2, M1 e M12 obtidas por microscopia óptica: (a) imagem de S1 após processo de compactação; (b) M1 após processo de compactação, aos 7 dias de cura; (c) imagem de S2 após processo de compactação; (d) M12 após processo de compactação, aos 7 dias de cura	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Geração de RCC no Brasil.....	23
Tabela 2.2: Resultados de RCS e índice CBR de diferentes pesquisas com RCC.....	24
Tabela 2.3: Composições químicas de escórias de pesquisas prévias.....	26
Tabela 2.4: Intervalos de restrições adotados para os componentes.....	33
Tabela 2.5: Planejamento experimental de mistura para os sistemas solo-RCCr-FEAE.....	34
Tabela 2.6: Síntese dos resultados das caracterizações física e mecânica dos solos e do RCCr.....	38
Tabela 2.7: Propriedades físicas dos FEAE utilizados na pesquisa.....	39
Tabela 2.8: Composição química dos materiais por ensaio de FRX.....	40
Tabela 2.9: Propriedades físicas das misturas previstas no programa experimental.....	45
Tabela 2.10: Valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.....	46
Tabela 2.11: Valores médios dos parâmetros CBR das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.....	48
Tabela 2.12: Equações de regressão relacionadas a propriedade RCS para as misturas S1-RCCr1-FEAE.....	50
Tabela 2.13: Equações de regressão relacionadas a propriedade RCS para as misturas S2-RCCr2-FEAE.....	51
Tabela 2.14: Equações de regressão relacionadas a propriedade índice CBR para as misturas S1-RCCr1-FEAE.....	52
Tabela 2.15: Equações de regressão relacionadas a propriedade índice CBR para as misturas S2-RCCr2-FEAE.....	53
Tabela 2.16: Desejabilidade individual e composta.....	55
Tabela 2.17: Caracterização física das misturas M1 e M12.....	56
Tabela 3.1: Planejamento experimental de mistura para os sistemas solo-RCCr-FEAE.....	81
Tabela 3.2: Caracterização granulométrica dos solos e do RCCr.....	86
Tabela 3.3: Síntese dos resultados das caracterizações física e mecânica dos solos e do RCCr.....	87
Tabela 3.4: Propriedades físicas dos FEAE.....	88
Tabela 3.5: Composição química dos materiais por ensaio de FRX.....	88
Tabela 3.6: Propriedades físicas das misturas previstas no programa experimental.....	93

Tabela 3.7: Valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal	94
Tabela 3.8: Valores médios dos parâmetros CBR das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal	95
Tabela 3.9: Equações de regressão relacionadas às propriedades RCS e índice CBR	97
Tabela 3.10: Desejabilidade individual e composta	98
Tabela 3.11: Caracterização física das misturas M1 e M12	99
Tabela 3.12: Parâmetros do Modelo Composto e MR ($\sigma_3 = 0,05$ MPa; $\sigma_d = 0,10$ MPa) das misturas investigadas	102
Tabela 4.1: Planejamento experimental de mistura para os sistemas solo-RCCr-FEAE	123
Tabela 4.2: Caracterização granulométrica dos solos e do RCCr	127
Tabela 4.3: Síntese dos resultados das caracterizações física e mecânica dos solos e do RCCr	128
Tabela 4.4: Composição química dos materiais por ensaio de FRX	129
Tabela 4.5: Valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal	134
Tabela 4.6: Valores médios dos parâmetros CBR das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal	135
Tabela 4.7: Desejabilidade individual e composta	136
Tabela 4.8: Coeficientes Ψ_i dos modelos de DP dos solos e misturas otimizadas	139

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	16
1.1 Contextualização e objetivo da pesquisa	16
1.2 Objetivos geral e específicos	18
1.3 Organização do trabalho	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
CAPÍTULO 2	24
OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS SOLO-RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL-FINOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA POR METODOLOGIA DE SUPERFÍCIES DE RESPOSTA.	24
2.1 Introdução	25
2.1.1 Planejamento experimental de misturas	33
2.2 Materiais e métodos	34
2.2.1 Coleta e preparação dos materiais	34
2.2.2 Caracterização dos materiais	36
2.2.3 Caracterização das misturas	37
2.2.4 Preparação das misturas	37
2.2.5 Ajuste de modelos e obtenção de superfícies de resposta	40
2.2.6 Ensaio de caracterização mecânica	41
2.2.6.1 Compactação	41
2.2.6.2 RCS	41
2.2.6.3 CBR.....	41
2.2.7 Controle de qualidade	42
2.3 Resultados e discussões	42
2.3.1 Caracterização física, química, mineralógica e morfológica dos materiais.....	42
2.3.2 Caracterização das misturas	50
2.3.3 Ensaio de caracterização mecânica	51
2.3.3.1 RCS	51
2.3.3.2 CBR.....	52
2.3.4 Ajuste dos modelos e obtenção de superfícies de resposta.....	54
2.3.4.1 Modelos do parâmetro RCS	54
2.3.4.2 Modelos do parâmetro índice CBR.....	56
2.3.5 Otimização	59
2.3.6 Caracterização das misturas otimizadas	61
2.4 Conclusão	66

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
CAPÍTULO 3	79
ESTUDO DA RESPOSTA MECÂNICA DE DOIS SOLOS TROPICAIS MELHORADOS COM FINOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	79
3.1 Introdução.....	80
3.1.1 Planejamento experimental de misturas	82
3.2 Materiais e métodos.....	83
3.2.1 Coleta e preparação dos materiais	83
3.2.2 Caracterização dos materiais	84
3.2.3 Caracterização das misturas.....	85
3.2.4 Preparação das misturas.....	85
3.2.5 Modelagem matemática.....	87
3.2.6 Otimização dos modelos.....	88
3.2.7 Ensaio de caracterização mecânica	88
3.2.7.1 Compactação	88
3.2.7.2 RCS	88
3.2.7.3 CBR.....	89
3.2.7.4 Módulo de Resiliência (MR).....	89
3.2.8 Controle de qualidade	90
3.3 Resultados e discussões	91
3.3.1 Caracterização física, química, mineralógica e morfológica dos materiais.....	91
3.3.2 Caracterização das misturas.....	98
3.3.3 Ensaio de caracterização mecânica	99
3.3.3.1 RCS e CBR	99
3.3.4 Ajuste dos modelos e otimização.....	102
3.3.5 Caracterização das misturas otimizadas	103
3.3.5.1 Caracterização física das misturas otimizadas	104
3.3.5.2 RCS, CBR e MR	105
3.3.5.3 Caracterização mineralógica e morfológica das misturas otimizadas.....	109
3.4 Conclusão	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
CAPÍTULO 4	121
ESTUDO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE DOIS SOLOS TROPICAIS MELHORADOS COM FINOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.	121

4.1 Introdução.....	122
4.2 Materiais e métodos.....	125
4.2.1 Coleta e preparação dos materiais	125
4.2.2 Caracterização dos materiais	126
4.2.3 Caracterização das misturas.....	127
4.2.4 Preparação das misturas.....	127
4.2.5 Modelagem matemática.....	128
4.2.6 Análises estatísticas	128
4.2.7 Otimização dos modelos.....	129
4.2.8 Ensaio de caracterização mecânica	129
4.2.8.1 Compactação.....	129
4.2.8.2 RCS.....	129
4.2.8.3 CBR.....	130
4.2.8.4 Deformação Permanente (DP)	130
4.2.9 Controle de qualidade	131
4.3 Resultados e discussões.....	132
4.3.1 Caracterização física, química, mineralógica e morfológica dos materiais.....	132
4.3.2 Ensaio de caracterização mecânica	139
4.3.3 Ajuste dos modelos e obtenção das misturas otimizadas	141
4.3.4 Determinação da deformação permanente.....	141
4.3.5 Caracterização mineralógica e morfológica dos solos e misturas otimizadas	145
4.4 Conclusão	147
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
CAPÍTULO 5	157
5.1 Conclusão geral	157

CAPÍTULO 1

1.1 Contextualização e objetivo da pesquisa

Com a Revolução Industrial, ocorrida no século XVIII, o modelo adotado de produção sistemática de bens de consumo implicou na geração e descarte de resíduos. Concomitantemente e mais efetivamente a partir da segunda metade do século XX, uma diversidade de fatores, como industrialização, crescimento econômico, diversificação do consumo de bens e serviços, crescimento da população mundial e acentuada migração de pessoas para os centros urbanos, fez a demanda mundial por recursos naturais aumentar substancialmente (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2015; OBERLE et al., 2019). Em contrapartida, essa maior demanda por recursos naturais ampliou consideravelmente a geração de resíduos sólidos no planeta, particularmente nas áreas urbanas (HOORNWEG, BHADA-TATA, 2012; KAZA et al., 2018; UNITED NATIONS ENVIRONMENT, 2018).

À medida que o mundo avança em direção ao seu futuro urbano, a quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) cresce mais rapidamente do que a taxa de urbanização. Segundo dados do *World Bank*, o mundo gera 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos por ano, em que, pelo menos, 33% desse montante não são gerenciados de maneira ambientalmente segura. Em todo o planeta, a média de resíduos gerados *per capita*/dia é de 0,74 kg, mas varia amplamente, de 0,11 a 4,54 kg. Embora representem apenas 16% da população mundial, os países de alta renda geram cerca de 34% dos resíduos totais. Em 2050, espera-se que o lixo global cresça para valores próximos de 3,40 bilhões de toneladas, quando a geração *per capita*/dia em países de alta e média/baixa rendas deve aumentar em 19% e 40%, respectivamente (KAZA et al., 2018). Para países emergentes e com uma base industrial em franco desenvolvimento, à semelhança do Brasil, os resíduos têm se transformado em um grave problema urbano, cujo gerenciamento tem se mostrado oneroso e complexo, considerando-se o volume e a massa acumulados (ABRELPE, 2021; PwC, SELURB, 2021).

Um dos problemas que agrava a questão do volume de resíduos é o encarecimento dos processos de tratamento e destinação final, especialmente dos resíduos classificados como perigosos. Os problemas se caracterizam por escassez de áreas de deposição em torno de grandes cidades, altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público, crescentes exigências técnicas para tratamento e deposição e contaminação ambiental (HOORNWEG, BHADA-TATA, 2012; KAZA et al., 2018; UNITED NATIONS ENVIRONMENT, 2018). Atualmente, a gestão dos resíduos sólidos tornou-se uma das principais questões globais.

Com o propósito de assegurar a proteção duradoura do planeta e de seus recursos naturais, criando condições para um crescimento sustentável, inclusivo e economicamente sustentado, foram definidos, em 2015, durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, traduzidos por 17 objetivos e 169 metas a serem atingidos até o ano de 2030 pelos países signatários, dentre os quais, o Brasil (UNITED NATIONS, 2015). Nos ODS definem-se as prioridades e aspirações do desenvolvimento sustentável global para 2030, procurando mobilizar esforços mundiais em torno de objetivos e metas comuns. O ODS 12.5, em particular, estabelece conter substancialmente a geração de resíduos por meio de prevenção, redução, reciclagem e reutilização.

Entretanto, segundo pesquisa realizada pelo Sindicato Nacional das Empresas de Limpeza Urbana (SELURB), analisando dados de 3.572 municípios brasileiros, referentes à

gestão de resíduos sólidos no ano de 2019, se o Brasil mantiver o ritmo atual de geração e destinação inadequada para os resíduos, não conseguirá atingir as metas ligadas à gestão de resíduos sólidos até 2030, conforme estabelecido pelos ODS. De acordo com projeções e mantidas as premissas, essa meta não será atingida em menos de trinta anos após o encerramento do prazo fixado para sua consecução. Entre os municípios analisados, verificou-se que: (i) cerca de 50% continuam dando destinação incorreta ao lixo coletado (embora o prazo inicial para erradicação dos lixões tenha expirado em 2014); (ii) a coleta domiciliar ainda não chegou à universalização, atendendo somente 76% dos lares brasileiros; (iii) 55,5% dos municípios não estabeleceram fonte de arrecadação específica para custear a atividade; e (iv) o índice médio de reciclagem no Brasil não passa dos 3,5% (PwC, SELURB, 2021).

Enquanto o mundo avança em direção a modelos mais eficientes e sustentáveis de gestão de resíduos, o Brasil continua apresentando deficiências verificadas há vários anos, ficando abaixo de indicadores médios de nações com mesma faixa de renda e mesmo desenvolvimento. Historicamente, percebe-se que pouco foi feito com o objetivo de realmente reverter o quadro deficitário e que o tema ainda não constitui uma prioridade nas agendas política e social do país (ABRELPE, 2019).

Importante será para o Brasil, a partir do cenário apresentado, empreender um adequado sistema de gestão para os resíduos sólidos e propiciar a adoção de práticas de reaproveitamento desses. Nesse contexto, a construção civil e a indústria do aço, grandes geradoras de resíduos, apresentam alto potencial de reciclagem.

Conforme levantamento da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2020, foram coletados 47 milhões de toneladas de resíduos sólidos da construção civil (RCC) no país, o que corresponde a 57% dos resíduos sólidos urbanos. Entretanto, estes valores estão aquém do real. Via de regra, a maioria dos municípios contabiliza as informações sobre a coleta executada pelo serviço público que, normalmente, recolhe os RCC lançados ou abandonados nos logradouros públicos. Assim, os dados fornecidos pela ABRELPE estão subestimados, pois não consideram em suas projeções os RCC provenientes de serviços privados (ABRELPE, 2021).

Outro tipo de resíduo que merece destaque é decorrente da produção de aço. Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), no ano de 2017, a quantidade de aço bruto produzida no mundo foi de 1,67 bilhão de toneladas, totalizando 2,8% a mais comparativamente ao ano anterior, sendo os países asiáticos (China, Japão, Índia e Coreia do Sul) responsáveis por 66,2% da produção. No Brasil, no mesmo período, essa produção foi de 34,4 milhões de toneladas de aço bruto, o que lhe garantiu a posição de nono maior produtor mundial (2,1%) e maior produtor da América Latina (53,5%) (BRASIL, 2019). Estimativas apontam que, no mundo, para cada tonelada de aço bruto produzida, são gerados, em média, 180 a 360 kg de escória/agregado siderúrgico (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2020). No Brasil, em 2017, segundo dados do Instituto Aço Brasil (2018), para cada tonelada de aço produzida, foram gerados 607 kg de resíduos e coprodutos diretos. A geração de escória de aciaria representou 164 kg (27%) do total, e a de agregado siderúrgico de alto-forno, 255 kg (42%).

Diante deste contexto, acredita-se que o setor da construção civil e a indústria do aço podem colaborar significativamente para que o Brasil consiga atingir as metas concernentes à gestão de resíduos sólidos a partir do reaproveitamento do RCC e da escória, evitando a deposição em aterros, proporcionando redução no consumo de matérias-primas e diminuindo o gasto energético.

O desenvolvimento de tecnologias de reciclagem destes resíduos e sua reinserção no ciclo produtivo vêm sendo amplamente pesquisados nas últimas décadas. Entre diversas possibilidades de aplicação (SANTOS et al., 2013; BRAVO et al., 2015; MEDEIROS-JUNIOR

et al., 2016; YÜKSEL, 2016; CARASEK et al., 2018; DE FREITAS et al., 2018; SHARKAWI et al., 2018; HARDER, 2020; BRANCA et al., 2020; JAMES O’CONNOR et al., 2021; MARTINS et al., 2021; WHITTAKER et al., 2021), estudos científicos atestam a viabilidade do uso de RCC e finos de escória em camadas de pavimentos rodoviários (LEITE et al., 2011; JIMÉNEZ et al., 2012; JIMÉNEZ, 2013; ARULRAJAH et al., 2013; ORTEGA-LÓPEZ et al., 2014; REIS et al., 2014; VIEIRA, PEREIRA, 2015; CARDOSO et al., 2016; PITANGA et al., 2016; KAMBOLE et al., 2017; DELONGUI et al., 2018; SILVA et al., 2019; PIRES et al., 2019; BEJA et al., 2020; MOREIRA et al., 2020; ZHAO et al., 2021; LUKIANTCHUKI et al., 2021; PARSAEI et al., 2021; YILDIRIM, PREZZI, 2022; LOPES et al., 2022, 2023).

Com o intuito de contribuir para o reaproveitamento de resíduos da indústria da construção civil e do aço, esta pesquisa teve por objetivo principal avaliar o comportamento mecânico de misturas de solo com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (RCCr) estabilizadas com finos de escória oxidante de aciaria elétrica (FEAE) para aplicação em camadas de pavimentos.

O diferencial deste trabalho, em relação às pesquisas já desenvolvidas, consiste na adoção da técnica de Planejamento de Experimentos (*Design of Experiment* [DOE]) na dosagem das misturas. O DOE aliado à Metodologia de Superfícies de Resposta, permite uma melhor avaliação da relação entre as proporções dos componentes nas misturas e as respostas nos parâmetros de interesse. A vantagem da combinação das metodologias supracitadas, aliada a processos de otimização matemática e gráfica, no estudo das proporções dos componentes solo, RCCr e FEAE que produzem os valores desejáveis das respostas, consiste em obter uma gama de combinações dos componentes solo-resíduos que atendam aos critérios normativos. Esses resultados, estatisticamente válidos, são mais robustos comparativamente às técnicas empíricas consagradamente utilizadas. Ressalta-se que, apesar de existir uma ampla variedade de pesquisas que têm como objetivo analisar o desenvolvimento de tecnologias de reaproveitamento dos RCCr e FEAE e sua reinserção no ciclo produtivo, ainda há uma lacuna na literatura de trabalhos que utilizam a técnica proposta e o uso concomitante desses resíduos na estabilização de solos. Mediante esse contexto, a escassez de estudos dessa natureza na literatura adiciona relevância a esta pesquisa.

1.2 Objetivos geral e específicos

Este trabalho teve como objetivo geral contribuir para a técnica de melhoria de solos por meio do reaproveitamento de resíduos industriais e com vistas ao seu emprego em camadas estruturais de pavimentos. Para esse fim, foi empregada a técnica DOE no delineamento de misturas de solo, RCCr e FEAE em arranjo simplex-vértices extremos para determinação das proporções ideais entre os materiais. A partir da aplicação da Metodologia de Superfícies de Resposta, análise de regressão e processos de otimização, foram avaliados parâmetros representativos da resposta mecânica das misturas compactadas, considerando-se o teor dos materiais nas misturas e o incremento do período de cura.

Para o atendimento do objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- i. compor misturas solo-RCCr-FEAE por técnica de DOE e avaliar, na energia de compactação do Proctor normal, as respostas mecânicas traduzidas pelos parâmetros de resistência à compressão simples (RCS) e índice CBR (*California Bearing Ratio*) por meio da Metodologia de Superfícies de Resposta;

- ii. determinar o conjunto de misturas solo-resíduos que atendem aos critérios normativos para emprego em camadas estruturais de pavimentos rodoviários;
- iii. avaliar, nas energias de compactação do Proctor normal e intermediária, as misturas otimizadas em diferentes tempos de cura, via ensaios de RCS, CBR, módulo de resiliência e deformação permanente;
- iv. correlacionar os dados resultantes das caracterizações física, mineralógica e microestrutural das misturas otimizadas com as respectivas propriedades mecânicas investigadas.

1.3 Organização do trabalho

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

- ✓ O capítulo 1 apresenta uma contextualização e o objetivo da pesquisa.
- ✓ O capítulo 2 apresenta um estudo sobre a otimização das propriedades mecânicas de misturas solo-resíduos de construção civil-finos de escória de aciaria por Metodologia de Superfícies de Resposta. Para composição das misturas utilizou-se a abordagem de Planejamento de Experimentos (DOE), em arranjo simplex-vértices extremos. Foram determinados os teores ideais de misturas solo-resíduos para estabilização de dois distintos solos tropicais, visando à utilização em camadas estruturais de pavimentos.
- ✓ O capítulo 3 apresenta um estudo sobre a resposta mecânica de dois solos tropicais melhorados com finos de escória de aciaria e resíduos de construção civil. As misturas, otimizadas por Metodologia de Superfícies de Resposta, foram avaliadas por ensaios de resistência à compressão simples, CBR (*California Bearing Ratio*) e módulo de resiliência nas energias de compactação do Proctor normal e intermediária.
- ✓ O capítulo 4 apresenta um estudo sobre a resposta à deformação permanente de dois solos tropicais melhorados com finos de escória de aciaria e resíduos de construção civil. Novamente, a abordagem de Planejamento de Experimentos e Metodologia de Superfícies de Resposta foram utilizadas na otimização dos teores de solo e resíduos que maximizam as respostas mecânicas das misturas. Os solos, na condição pura, e as misturas otimizadas foram submetidos aos ensaios triaxiais de carga repetidas, sob diferentes estados de tensões, realizados com frequência de 2 Hz e 30.000 ciclos de carga.
- ✓ No capítulo 5, são apresentadas as conclusões finais deste trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M. M.; BO, M. W. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 8, p. 1077-1088, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018**. São Paulo: ABRELPE, 2019. 64p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021. 54p.
- BEJA, I. A.; MOTTA, R.; BERNUCCI, L. B. Application of recycled aggregates from construction and demolition waste with Portland cement and hydrated lime as pavement subbase in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 258, 2020.
- BRANCA, T. A.; COLLA, V.; ALGERMISSEN, D.; GRANBOM, H.; MARTINI, U.; MORILLON, A.; PIETRUCK, R.; ROSENDAHL, S. Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. **Metals**, v. 10, n. 3, p. 1-18, 2020.
- BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Sumário Mineral 2017**. Brasília: ANM, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017. Acesso em: 12 fev. 2020.
- BRAVO, M.; DE BRITO, J.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 59-74, 2015.
- CARASEK, H.; GIRARDI, A. C. C.; ARAÚJO, R. C.; ANGELIM, R.; CASCUDO, O. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, v. 64, n. 370, p. 288-300, 2018.
- CARDOSO, R.; SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. **Waste Management**, v. 49, p. 131-145, 2016.
- DELONGUI, L.; MATUELLA, M.; NÚÑEZ, W. P.; FEDRIGO, W.; SILVA FILHO, L. C. P.; CERATTI, J. A. P. Construction and demolition waste parameters for rational pavement design. **Construction and Building Materials**, n. 168, p. 105-112, 2018.
- DE FREITAS, S. M. A. C.; SOUSA, L. N.; DINIZ, P.; MARTINS, M. E.; ASSIS, P. S. Steel slag and iron ore tailings to produce solid brick. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 5, p. 1087-1095, 2018.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY - EEA. **Global megatrends: intensified global competition for resources (GMT 7)**. 2015. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/soer-2015/global/competition>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- HARDER, J. Slag recycling. **Recovery: recycling technology worldwide, 2020**. Disponível em: https://www.recovery-worldwide.com/en/artikel/slag-recycling_3528047.html. Acesso em: 22 out. 2020.

- HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. **What a Waste - a global review of solid waste management**. Urban Development & Local Government Unit. World Bank. Urban Development Series, n. 15, 2012. 116p.
- INSTITUTO AÇO BRASIL - IABR. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2018. 84p. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 28 jun. 2019.
- JAMES O'CONNOR et al. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 419, 126478, 2021.
- JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; AGRELA, F.; LÓPEZ, M.; GALVÍN, A. P. Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 58, p. 88-97, 2012.
- JIMÉNEZ, J. R. Applications of recycled aggregates from construction and demolition waste: Recycled aggregates (Ras) for roads. In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V.; LABRINCHA, J.; DING, Y.; BRITO, J. **Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste**. p. 351-377, 2013.
- KAMBOLE, C.; PAIGE-GREEN, P.; KUPOLATI, W. K.; NDAMBUKI, J. M.; ADEBOJE, A. O. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. **Construction and Building Materials**, n. 148, p. 618-631, 2017.
- KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; WOERDEN, F. V. **What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050**. Urban Development, The World Bank, 2018. 295p.
- LEITE, F. da C.; MOTTA, R. dos S.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2972-2979, 2011.
- LOPES, E. C. et al. Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n.14, p. 5003-5014, 2022.
- LOPES, E. C. et al. Stabilisation of clayey and sandy soils with ladle furnace slag fines for road construction. **Road Materials and Pavement Design**, v. 24, n. 1, p. 247-266, 2023.
- LUKIANCHUKI, J. A. 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**, v. 39, p. 919-942, 2021.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; BALESTRA, C. E.; LIMA, M. G. Applicability of recycled aggregates in concrete piles for soft soil improvement. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 1, p. 56-64, 2016.
- MOREIRA, E. B.; BALDOVINO, J. J. A.; IZZO, R. L. S.; ROSE, J. L. Impact of Sustainable Granular Materials on the Behavior Sedimentary Silt for Road Application. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, n. 1, p. 917-933, 2020.
- MARTINS, A. C. P. et al. Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance. **Construction and Building Materials**, v. 291, 2021.

- OBERLE, B. et al. **Panorama de los Recursos Globales 2019: Recursos naturales para el futuro que queremos**. Un informe del Panel Internacional de Recursos. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Nairobi, Kenia, 2019. 35p.
- ORTEGA-LÓPEZ, V.; MANSO, J. M.; CUESTA, I. I.; GONZÁLEZ, J. J. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 455-464, 2014.
- PARSAEI, M.; VAKILI, A. H.; SALIMI, M.; FARHADI, M. S.; FALAMAKI, A. 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**, v. 80, n. 8, p. 6303-6320, 2021.
- PIRES, P. M.; SUDO LUTIF TEIXEIRA, J. E.; NEPOMUCENO, D. V.; FURIERI, E. C. Laboratory and field evaluation of KR slag-stabilized soil for paving applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 9, 2019.
- PITANGA, H. N.; SILVA, T. O.; SANTOS, A. L.; SILVA, A. C. B.; LIMA, D. C. MCT classification for compacted mixtures of soil-steel slag-fly ash for application in forest roads. **Revista Árvore**, v. 40, n. 5, p. 911-919, 2016.
- PwC, SELURB. **Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana: Edição 2021**. PwC-SELURB, 2021. 140 p. Disponível em: https://selur.org.br/wp-content/uploads/2022/01/Islu_21-ac.pdf. Acesso em: 15 de ago. 2022.
- REIS, J. H. C.; SOARES SILVA, S.; ILDEFONSO, J. S.; YSHIBA, J. K. Evaluation of soil, cement and construction and demolition waste (CDW) mixtures for use in road pavement base and sub-base applications. **Key Engineering Materials**, v. 634, p. 247-255, 2014.
- SANTOS, E. C. G.; PALMEIRA, E. M.; BATHURST, R. J. Behaviour of a geogrid reinforced wall built with recycled construction and demolition waste backfill on a collapsible foundation. **Geotextiles and Geomembranes**, n. 39, p. 9-19, 2013.
- SHARKAWI, A. M.; EL MOFTY, S. E.-D. M.; SHOWAIB, E. A.; ABBASS, S. M. Feasible construction applications for different sizes of recycled construction demolition wastes. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 4, p. 3351-3366, 2018.
- SILVA, T. O.; PITANGA, H. N.; SANTOS, A. L. D.; LIMA, D. C.; SILVA, A. C. B. Use of steel waste for the application in urban paving. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 41, n. 1, 2019.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT. **Waste Management Outlook for Latin America and the Caribbean**. United Nations Environment Programme, Latin America and the Caribbean Office. Panama City, Panama, 2018. 133p.
- UNITED NATIONS. **Transforming Our World: The 2030 agenda for sustainable development**, 2015. 41p.
- VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 103, p. 192-204, 2015.
- WHITTAKER, M. J. *et al.* Novel construction and demolition waste (CDW) treatment and uses to maximize reuse and recycling. **Advances in Building Energy Research**, v. 15, n. 2, p. 253-269, 2021.

- WORLD STEEL ASSOCIATION. **Public policy paper: Steel industry co-products**. 2020. 8p. Disponível em: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:3d1e2c1e-e306-4bac-a364-3672af7e30b9/Co%2520Products%25202020.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Subgrade stabilisation mixtures with EAF steel slag: an experimental study followed by field implementation. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 6, p. 1754–1767, 2022.
- YÜKSEL, İ. A review of steel slag usage in construction industry for sustainable development. **Environment, Development and Sustainability**, v. 19, n. 2, p. 369-384, 2016.
- ZHAO, Y.; GOULIAS, D.; TEFA, L.; BASSANI, M. Life cycle economic and environmental impacts of CDW recycled aggregates in roadway construction and rehabilitation. **Sustainability**, v. 13, n. 15, 2021.

CAPÍTULO 2

OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS SOLO-RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL-FINOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA POR METODOLOGIA DE SUPERFÍCIES DE RESPOSTA.

Resumo

O presente estudo teve como objetivo o uso do planejamento experimental de misturas em arranjo simplex-vértices extremos para avaliação dos teores de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (RCCr) e finos de escória oxidante de aciaria elétrica (FEAE) na estabilização de dois solos tropicais. Os solos utilizados são provenientes da Zona da Mata Mineira, região do Estado de Minas Gerais, Brasil. O efeito das variáveis independentes (teor de solo, teor de RCCr e teor de FEAE) nas propriedades de resistência à compressão simples (RCS) e índice CBR (*California Bearing Ratio*) foi investigado por análise de equações de regressão e Metodologia de Superfícies de Resposta. Além disso, a otimização das respostas RCS e índice CBR foi realizada, usando a abordagem da função Desejabilidade na determinação das composições ideais das misturas. Os resultados obtidos apresentaram, para os modelos matemáticos ajustados, alto coeficiente de determinação ($R^2 \geq 0,83$). A otimização das variáveis demonstrou que as melhores composições, em massa seca dos materiais, são: (i) 80% de solo, 0% de RCCr e 20% de FEAE, para o solo arenoso; (ii) 18% de solo, 62% RCCr e 20% de FEAE, para o solo argiloso. As misturas otimizadas foram avaliadas por ensaios de DRX e MEV, após o período de cura selada de 28 dias, quando se identificou a formação de produtos típicos de reações pozolânicas, como hidróxido de cálcio (CH [portlandita]), silicato de cálcio hidratado (CSH), aluminato de cálcio hidratado (CAH) e sílico-aluminato de cálcio hidratado (CASH [etringita]). Os resultados obtidos comprovaram que as composições solo-resíduos e o incremento do período de cura proporcionaram redução da expansão e ganhos de RCS e índice CBR em relação aos solos em seu estado natural. A metodologia de Planejamento de Experimentos, aliada à análise de superfícies de resposta e à otimização matemática, permitiu delimitar uma gama de combinações de solo, RCCr e FEAE que atendem aos critérios do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes concernentes a parâmetros CBR exigíveis para execução de camadas de base, sub-base e reforço de subleito de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave: Planejamento de experimentos. Metodologia de superfícies de resposta. Resíduo de construção civil. Escória de aciaria. Estabilização de solos.

2.1 Introdução

Dentre as indústrias que fazem uso de elevada quantidade de matérias-primas naturais, destaca-se a indústria da construção civil, maior consumidora de recursos naturais da economia mundial. Estimativas indicam que, globalmente, ela consome 40% da produção total de energia, 12–16% de toda a água disponível, 32% dos recursos não renováveis e renováveis, 25% de toda a madeira e 40% de todas as matérias-primas. Além disso, produz 30–40% de todos os resíduos sólidos e emite 35–40% de CO₂ (DARKO et al., 2017). Segundo Giljum et al. (2014), a China, maior consumidora de matérias-primas naturais, consome, juntamente com os Estados Unidos (EUA), Índia, Brasil e Rússia, mais de 50% de todo o montante extraído globalmente.

No período de 1970 a 2017, a extração mundial de recursos naturais cresceu de 27 para 92 bilhões de toneladas. Os minerais correspondem a 45% desse total, consistindo em grande parte de brita, cascalho e areia. Desde 2000, o crescimento nas taxas de extração acelerou para 3,2% ao ano, impulsionado em grande parte por grandes investimentos em infraestrutura e padrões de vida mais elevados nos países em desenvolvimento, especialmente na Ásia (GILJUM et al., 2014; OBERLE et al., 2019). Esses números retratam a grande dependência da economia mundial por esse tipo de matéria-prima e indicam a tendência de aumento de consumo para os próximos anos. Continuando no atual ritmo de consumo, o mundo extrairá, em 2060, 190 bilhões de toneladas de recursos naturais (OBERLE et al., 2019).

Na indústria da construção civil, a utilização de grande parte dos recursos naturais extraídos se dá, principalmente, na produção de cimento, rocha britada, cascalho, areia e no beneficiamento de agregados, visando, sobretudo, à produção de argamassas e concretos, atividade que demanda grande quantidade de energia e contribui enormemente para emissões de gases nocivos ao meio ambiente (ROSSI, SALES, 2014; ARIÖĞLU AKAN et al., 2017; TANGTINTHAI et al., 2019).

O processo de beneficiamento de agregados utiliza, principalmente, a força motriz para acionamento de motores elétricos, iluminação, esteiras, britadores, peneiras vibratórias e caminhões para transporte, sendo as principais fontes energéticas, o óleo combustível e a eletricidade. Portanto, o setor faz uso de grandes quantidades de energia, contribuindo na geração de poluentes (ROSSI, SALES, 2014; GHANBARI et al., 2017; MARTINEZ-ARGUELLES et al., 2019). Segundo a Empresa de Pesquisa Energética, em 2018, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 416,1 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (com projeção de 513 milhões de toneladas para 2027), sendo a indústria responsável por 18,8% deste montante e os transportes, 46,3% (EPE, 2019).

Corroborando os impactos ambientais ocasionados pelas atividades da indústria da construção civil, a produção *per capita* mundial de 1 m³ de concreto requer o consumo de 2 bilhões de toneladas de cimento, o que significa 7% das emissões globais de dióxido de carbono (aproximadamente 30 bilhões de toneladas) (GRABIEC et al., 2012). No concreto, considerado produto básico da construção civil, utilizam-se brita (ou cascalho), areia, cimento, água e aditivos químicos. Com grande parte do concreto (cerca de 90% do volume) sendo composto por agregados, a demanda por esses materiais vem se cumprindo mediante exploração de novos locais e com distâncias cada vez maiores dos centros consumidores, o que acarreta aumento no valor final do produto e maior gasto energético (HABERT et al., 2020).

No Brasil, em 2016, foram produzidos 312 milhões de toneladas de areia e 236 milhões de toneladas de brita e cascalho, insumos utilizados quase integralmente na indústria da construção civil (BRASIL, 2019). Considerando que, em 2035, a área urbana do país será três vezes maior do que a do ano 2000, a Associação Nacional de Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil prevê forte demanda por agregados para os próximos anos

(ANEPAC, 2016). A crescente demanda por agregados leva a um risco de depleção das fontes naturais. Além disso, previsões de aumento substancial da demanda por agregados para o setor de construção civil, principalmente nas economias emergentes, como o Brasil, fazem da gestão de carbono uma questão prioritária para o setor.

Os agregados, insumos básicos da indústria da construção civil, são os minerais mais consumidos no mundo, constituindo recursos naturais dos mais acessíveis à humanidade (DARKO et al., 2017; OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2019). Embora sendo produtos de baixo valor unitário, constituem-se em importante indicador de situação econômica e social de um país. São materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades estabelecidas para uso em obras de engenharia civil, tais como rocha britada, cascalho, areias naturais ou artificiais, argilas, resíduos inertes reciclados, escórias de aciaria, produtos industriais, entre outros (MONTEIRO et al. 2018).

Depreende-se que o crescimento do setor da construção civil, tão necessário ao desenvolvimento socioeconômico do país, acarreta aumento de consumo de agregados naturais, ocasionando maior gasto energético, escassez de jazidas e impactos ao meio ambiente. Areladas a esse crescimento, surgem também questões relacionadas ao desperdício de materiais da construção civil, que geram grande volume de resíduos em obras (BARROS, 2012; SÁEZ et al., 2014; LAFAYETTE et al., 2018). Várias pesquisas apontam a reciclagem desses resíduos como uma prática importante para a sustentabilidade, seja atenuando os impactos ambientais gerados ou reduzindo os custos (TAM et al., 2008; LLATAS, 2011; VIEIRA, PEREIRA, 2015; CARDOSO et al., 2016; GHANBARI et al., 2017; MOREIRA et al., 2020). Eles são comumente chamados de entulho de obra, resíduo da construção civil ou resíduo de construção e demolição (BRASIL, 2002; ABNT, 2004a).

Conforme a Resolução Conama nº 307/2002 (BRASIL, 2002, Artigo 2º, inciso I), os chamados resíduos sólidos da construção civil são:

[...] os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

De acordo com essa Resolução, os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, são os provenientes de: (i) construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; (ii) construção, demolição, reformas e reparos de edificações, como os componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto; (iii) processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras.

Sendo grande consumidora de recursos naturais e preponderante setor da economia mundial, a indústria da construção civil produz elevada quantidade de resíduos, provenientes de atividades de extração de matéria-prima (YILMAZ, BAKIŞ, 2015; TANGTINTHAI et al., 2019), transporte e armazenamento inadequado de materiais, construção, reformas, reparos e demolições de obras civis (MÁLIA et al., 2011; LLATAS, 2011). O crescimento populacional, a intensa migração de pessoas para os centros urbanos e o processo de desenvolvimento econômico também têm impactado diretamente a quantidade de resíduos gerados pelo setor de construção civil, pois impulsionam principalmente as atividades de construção associadas à

expansão de programas de urbanização e infraestrutura, características de países em desenvolvimento (YILMAZ, BAKIŞ, 2015; TANGTINTHAI et al., 2019).

Destarte, o RCC se transforma em grave problema urbano, com um gerenciamento oneroso e complexo devido aos enormes volume e massa produzidos. Quando não corretamente descartados ou manejados, esses resíduos podem ocasionar problemas sociais e ambientais, tais como escassez de áreas adequadas de deposição, altos custos sociais advindos do gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público, contaminação do meio ambiente, dentre outros (LLATAS, 2011; BRAGA et al., 2017; MAHPOUR, 2018).

Pesquisas apontam que os RCC estão sendo gerados a taxas muito elevadas nas últimas décadas, apresentando efeitos deletérios ao meio ambiente. Estas taxas elevadas fazem com que, muitas vezes, esses resíduos sejam aqueles com maior participação na massa total de RSU, podendo representar até 70% do total gerado nas médias e grandes cidades brasileiras (IPEA, 2012). Tais valores também foram observados em outros países (TAM et al., 2008; KATZ, BAUM, 2011; IPEA, 2012; SÁEZ et al., 2014; OUDA et al., 2017; HUANG et al., 2018; AKHTAR, SARMAH, 2018).

Segundo Barros (2012), de todos os materiais que entram numa obra, uma fração significativa sai como resíduos, tais como brita, areia, cacos cerâmicos e de tijolos, sobras de argamassa e de concreto, madeira, plástico, metal, solo, entre outros, podendo representar uma perda de até 30% do volume total utilizado. Esse elevado índice de perda está representado pelas altas taxas de geração de resíduos por metro quadrado de obra construída (OSMANI et al., 2008; SOLÍS-GUZMÁN et al., 2009; KATZ, BAUM, 2011; LLATAS, 2011; RÖHM et al., 2013; SÁEZ et al., 2014; COSTA et al., 2014; LAFAYETTE et al., 2018).

Os números de produção mundial também apontam a relevância quanto à geração de RCC. Segundo Katz e Baum (2011), no ano de 2010, em Israel, a participação deste resíduo atingiu 60% do total de resíduos sólidos do país. Na Malásia, os RCC, somados aos resíduos industriais, correspondiam a 28% do total dos RSU, enquanto que os resíduos domésticos representavam 37% do total (BEGUN et al., 2006). Na Austrália, aproximadamente 14 milhões de toneladas de resíduos eram depositados em aterros a cada ano, dos quais cerca de 44% são atribuídos à indústria da construção (TAM et al., 2008). Em 2014, a produção de RCC na Austrália foi de 19,5 milhões de toneladas (PICKIN, RANDELL, 2017). Para outros países, como Japão (16%), Alemanha (19%), EUA (29%), China (30-40%), Reino Unido (50%) e Espanha (70%), as parcelas de RCC gerados, em relação aos RSU totais, variam consideravelmente (TOJO, FISCHER, 2011; ZHAO et al., 2011).

Em Jeddah, cidade da Arábia Saudita, onde habita 14% da população total do país, 4,5-6,4 milhões de toneladas de RCC são produzidos a cada ano (OUDA et al., 2017). No Vietnã, em 2015, 5,3 milhões de toneladas de RCC foram produzidos (LOCKREY et al., 2016). Na China, maior gerador mundial, mais de 2 bilhões de toneladas de RCC são produzidos anualmente (ZHENG et al., 2017). Somente em Pequim, cerca de 40 milhões de toneladas de RCC foram gerados em 2014 (HUANG et al., 2018). Em metrópoles como Xangai e Shenzhen, a quantidade de RCC foi de até 30 milhões de toneladas por ano (LI et al., 2018). Em Hong Kong, em 2014, a produção de RCC foi de aproximadamente 20 milhões de toneladas (HOSSAIN et al., 2017). Na União Europeia, em 2018, o total de resíduos gerados foi de 2,337 bilhões de toneladas. Desse total, as atividades de construção e demolição (839 milhões de toneladas, 35,9% do total) e mineração e extração de rochas (622 milhões de toneladas, 26,6% do total) são os setores econômicos que mais geraram resíduos (EUROSTAT, 2021).

Ainda sendo prática comum descartar RCC em aterros (VIEIRA, PEREIRA, 2015; CARDOSO et al., 2016; AKHTAR, SARMAH, 2018), existem vários casos em que quantidades substanciais de materiais foram recuperadas. Alguns países da Europa apresentam

altas taxas de reaproveitamento, com destaque para Holanda (98%), Dinamarca (94%), Estônia (92%), Alemanha (86%), Irlanda (80%), Reino Unido (75%) e Bélgica (68%). As políticas públicas vigentes e a escassez de agregados naturais nesses países têm induzido os RCC a uma destinação mais nobre que a disposição irregular ou o encaminhamento a aterros (VIEIRA, PEREIRA, 2015; AKHTAR, SARMAH, 2018).

Para os EUA, estima-se que os RCC representavam entre 10% a 30% do total de resíduos gerados no país, com produção total de 540 milhões de toneladas em 2014, resíduos estes provenientes das atividades de construção e demolição (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2016; TOWNSEND et al., 2019).

No Brasil, segundo levantamento realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, em 2018, foram gerados 79 milhões de toneladas de RSU. Desse montante, 72,7 milhões (92%) foram coletados e 43,3 milhões (59,5%) tiveram destinação adequada em aterros sanitários. Os 29,5 milhões (40,5%) de toneladas de RSU restantes acabaram indo para lixões ou aterros controlados, os quais não contam com um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger a saúde das pessoas e o meio ambiente contra danos e degradações (ABRELPE, 2019).

Do total de RSU gerado no Brasil em 2018, 57% correspondiam a RCC. A Tabela 1 apresenta os valores de RCC para os anos de 2016, 2017 e 2018.

Tabela 2.1: Geração de RCC no Brasil.

Região	Ano					
	2016		2017		2018	
	Total (10 ⁶ ton.)	<i>Per capita</i> (kg/hab/dia)	Total (10 ⁶ ton.)	<i>Per capita</i> (kg/hab/dia)	Total (10 ⁶ ton.)	<i>Per capita</i> (kg/hab/dia)
Norte	1,7	0,266	1,7	0,264	1,7	0,259
Nordeste	8,9	0,428	9,0	0,429	9,0	0,425
Centro-Oeste	5,0	0,882	5,0	0,855	5,0	0,824
Sudeste	23,4	0,741	23,4	0,737	23,4	0,726
Sul	6,1	0,568	6,0	0,556	6,0	0,546
Brasil	45,1	0,600	45,0	0,594	45,0	0,585

Fonte: adaptado da ABRELPE (2019).

Diante deste contexto de crescente produção de resíduos e da utilização predatória de recursos naturais, acredita-se que o setor de construção civil deva se basear no conceito de economia circular, de forma que os materiais possam voltar para as fases iniciais de produção após o fim de sua vida útil. O reaproveitamento do RCC proporciona redução em consumo de matérias-primas, emissão de gases de efeito estufa, custos da obra, além de evitar a deposição em aterros e proporcionar menor gasto energético (LLATAS, 2011; GHANBARI et al., 2017; MAHPOUR, 2018). Várias experiências descritas na literatura científica apontam alternativas de reaproveitamento dos RCC em detrimento de sua destinação em lixões e aterros, tais como, estruturas de solo reforçado (SANTOS et al., 2013, 2014; VIEIRA, et al., 2016), fabricação de argamassas (CARASEK et al., 2018; FERREIRA et al., 2019a), fabricação de tijolos ou como agregados para concreto (RAO et al., 2007; BRAVO et al., 2015; MEDEIROS-JUNIOR et al., 2016; SHARKAWI et al., 2018), construção de estradas (ARULRAJAH et al., 2013; VIEIRA, PEREIRA, 2015; CARDOSO et al., 2016; DELONGUI et al., 2018; BEJA et al., 2020; SOUZA et al., 2020; LUKIANTCHUKI et al., 2021), entre outras aplicações.

Na construção de pavimentos, o emprego dos RCC em camadas de base ou sub-base aparece como possibilidade viável para seu reaproveitamento. Devido aos enormes volumes

gerados e por possuir características similares ao agregado natural, após o processo de beneficiamento em usinas recicladoras, os RCC podem ser usados como camadas de reforço de pavimentos. Pesquisas desenvolvidas no Brasil e no mundo têm confirmado a viabilidade de utilização destes resíduos como substitutos totais ou parciais da brita natural em obras de pavimentação, conforme o atestam Agrela et al. (2012), Pérez et al. (2013), Arulrajah et al. (2013), Reis et al. (2014), Vieira e Pereira (2015), Cardoso et al. (2016), Delongui et al. (2018), Moreira et al. (2020), Souza et al. (2020), Beja et al. (2020), Lukiantchuki et al. (2021), dentre outros. O reaproveitamento desse material em projetos de grande escala, como camadas de base, sub-base e reforço para pavimentação de estradas, pode levar a benefícios econômicos e ambientais de longo prazo (LUKIANTCHUKI et al., 2021).

A natureza dos RCC, com elevada heterogeneidade de composição, apresenta grande dispersão de resultados. Na tabela 2.2, são apresentados os resultados de resistência à compressão simples (RCS) e de índice CBR (*California Bearing Ratio*) de pesquisas prévias.

Tabela 2.2: Resultados de RCS e índice CBR de diferentes pesquisas com RCC.

Natureza do Estudo	Energia de Compactação	RCS (kPa)	CBR (%)
Emprego de RCC na construção de 2 km de via pavimentada (LEITE et al., 2011).	Intermediária	-	73
	Modificada	-	117
Avaliou-se o comportamento de RCC misto e de concreto em condições de campo (JIMÉNEZ et al., 2012).	Modificada	-	68
		-	138
Estudou-se três tipos distintos de RCC: concreto, asfalto e tijolo triturado (ARULRAJAH et al., 2013).	Modificada	-	118-160
		-	30-35
		-	123-138
Analisaram-se misturas de solo, cimento e RCC. CP* de Ø10 x 12,73 cm e cura de 7 dias (REIS et al., 2014).	Normal	450-2770	-
Estudou-se o comportamento de RCC misto em condições de campo. Avaliaram-se trechos experimentais de vias urbanas construídas com RCC puro, com 3% cimento e com 3% cal. RCS com CP* de Ø15 x 30 cm e cura de 7 dias (BEJA et al., 2020).	Modificada	420	51
		4600	-
Realizaram-se experimentos de laboratório em misturas de RCC com um solo silto argiloso (A-7-6). As adições de RCC ao solo foram nas proporções de 40%, 50% e 60%. RCS com CP* de Ø5 x 10 cm e curas de 30, 60 e 90 dias (MOREIRA et al., 2020).	Normal	416-565	5-14
	Intermediária	587-1480	9-29
	Modificada	747-2831	16-70
	Valor máximo	4600	160
	Valor mínimo	416	5
	Média	1679	70

*CP: Corpo de prova.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Brasil, o uso de agregados reciclados tem despertado grande interesse, e, nas últimas décadas, foram criadas normas e legislações com objetivo de especificar a utilização desses em obras de pavimentação (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2003, 2006; ABNT, 2004a, 2004b; PREFEITURA MUNICIPAL DE BAURU, 2011; PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO GONÇALO, 2017), incentivando, assim, a prática do reuso.

Entretanto, mesmo com normativas específicas para sua utilização e experiências de sucesso de sua aplicação em campo na execução de camadas de pavimentos (JIMÉNEZ et al., 2012; AGRELA et al., 2012; JIMÉNEZ, 2013; PÉREZ et al., 2013; VIEIRA, PEREIRA, 2015;

CARDOSO et al., 2016; BEJA et al., 2020), o emprego de agregado reciclado de RCC em obras viárias ainda não é uma realidade para grande maioria dos municípios do país. Em grande parte, isso se deve ao baixo reaproveitamento dos RCC que, segundo Nunes e Mahler (2020), é de aproximadamente 8% no Brasil.

Portanto, estudar as propriedades dos RCC e desenvolver técnicas que visem melhorar o seu uso têm importância no sentido de contribuir para um melhor conhecimento de suas características e fomentar sua inserção no mercado.

Para o uso de agregados reciclados em pavimentação, as especificações estabelecem requisitos importantes para manutenção das características funcionais e estruturais de uma camada de pavimento (ABNT, 2004a, 2004b), principalmente como camada granular de comportamento mecânico análogo ao do agregado natural.

Em geral, os tratamentos de camadas granulares de pavimentos, de grande relevância na concepção estrutural, resumem-se, basicamente, a dois grandes grupos de estabilização: granulométrica e com adição de aglomerantes (BALBO, 2007).

A estabilização granulométrica consiste no encaixe granulométrico segundo uma limitação física imposta por procedimentos normativos, a qual concebe materiais com curvas granulométricas, via de regra, bem distribuídas. É um método de melhoria da capacidade resistente de materiais *in natura* ou combinação de materiais (solos e/ou agregados), mediante emprego de energia de compactação adequada, de forma a se obter um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade (DNIT, 2010a).

Na estabilização por adição de aglomerante, o agente é um aglomerante hidráulico (cal, cimento Portland ou outro) que potencializa o aumento da rigidez e da resistência à flexão do material estabilizado, melhorando, assim, suas características físicas e mecânicas (BALBO, 2007; PIRES et al., 2019).

Em relação às tradicionais técnicas de estabilização com adição de aglomerantes, uma tecnologia alternativa vem sendo testada e discutida na literatura científica. Esse novo método de estabilização, ambientalmente sustentável, busca alternativas de estabilização com resíduos da indústria siderúrgica. Estudos utilizando escórias de aciaria como material cimentante têm obtido notoriedade (ORTEGA-LÓPEZ et al., 2014; KAMBOLE et al., 2017).

A indústria siderúrgica, importante setor da economia e grande fornecedor de insumos para a construção civil, é responsável por expressivos impactos ambientais relativos ao consumo de energia, uso de materiais não renováveis e cerca de 5% das emissões mundiais de CO₂ (CARVALHO et al., 2016; HASANBEIGI, 2017), além da geração de diversos tipos de coprodutos e resíduos. Regulamentações cada vez mais rigorosas e custos de eliminação cada vez mais elevados afetam atualmente essa indústria transformadora, levando-a a intensificar os seus esforços no sentido de melhorar a taxa de reciclagem destes resíduos (BRANCA et al., 2020).

Durante o processo de produção do ferro-gusa e do aço, a indústria siderúrgica é responsável por uma significativa geração de escórias. Elas são inevitavelmente geradas como um subproduto dos processos de fabricação, consistindo em um resíduo sólido derivado de reações químicas que ocorrem no interior do reator metalúrgico (FREITAS, 2018; BRANCA et al., 2020).

As funções da escória incluem remover as impurezas presentes no minério de ferro, na sucata de aço ou outras cargas, bem como proteger o metal líquido do oxigênio e manter a temperatura dentro do forno (BRANCA et al., 2020). A sua composição química pode variar segundo a matéria-prima utilizada (minério de ferro, sinter, carvão, sucata), processo de

produção, revestimento do convertedor, forma de resfriamento da escória, sua armazenagem e, principalmente, pelo tipo de aço produzido (FREITAS, 2018; JAMES O’CONNOR et al., 2021). Elas contêm, principalmente, óxidos de cálcio, silício, alumínio, magnésio e ferro e sua aplicação restrita está relacionada com a variabilidade das suas características físicas, químicas e mineralógicas (KAMBOLE et al., 2017; BRANCA et al., 2020).

A tabela 2.3 apresenta a composição química de diversas escórias pesquisadas para reuso em construção civil.

Tabela 2.3: Composições químicas de escórias de pesquisas prévias.

Referência	Composição química (%)											
	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
	18,9	7,1	2,4	58,4	10,2	-	10,2	0,3	0,9	0,3	-	-
(ORTEGA-LÓPEZ et al., 2014)	15,0	11,9	2,6	51,2	8,4	-	8,4	0,6	1,9	0,4	-	-
	10,0	23,3	0,5	50,7	13,6	-	13,6	0,2	-	0,1	-	-
	21,3	8,3	1,0	59,2	7,9	-	7,9	0,3	-	0,2	-	-
	3,0	27,3	2,9	57,8	7,1	-	7,1	0,1	-	0,1	-	-
(KAMBOLE et al., 2017)	10,2	1,7	24,7	40,2	0,1	-	7,2	7,2	-	0,5	1,8	-
	13,7	3,8	21,8	45,4	0,1	0,1	6,3	3,3	-	-	1,4	-
	13,7	6,8	17,8	45,4	0,7	0,3	7,3	-	-	-	-	-
	7,8	1,0	38,1	39,3	-	-	8,6	4,2	-	1,0	-	-
(PIRES, et al., 2019)	14,6	5,1	26,0	44,8	-	-	2,7	1,7	3,8	-	-	-
(SILVA et al., 2019)	10,2	3,5	32,4	40,0	0,2	-	3,8	6,0	0,3	0,5	1,8	1,2
Valor máximo	21,3	27,3	38,1	59,2	13,6	0,3	13,6	7,2	3,8	1,0	1,8	1,2
Valor mínimo	3,0	1,0	0,5	39,3	0,1	0,1	2,7	0,1	0,3	0,1	1,4	1,2
Média	12,6	9,1	15,5	48,4	5,4	0,2	7,6	2,4	1,7	0,4	1,7	1,2

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos estudos de Ortega-López et al. (2014), Kambole et al. (2017), Pires al. (2019) e Silva et al. (2019).

As escórias de ferro e aço já contribuem significativamente para a economia circular em vários países, inclusive no Brasil. Grande parte da escória da indústria siderúrgica vem sendo utilizada na fabricação de produtos para as indústrias de cimento, como agregados para a construção de estradas e indústrias de fertilizantes (KAMBOLE et al., 2017; HARDER, 2020; BRANCA et al., 2020; JAMES O’CONNOR et al., 2021). Por muitos anos, a escória foi classificada como um resíduo sólido da produção siderúrgica. Atualmente, países como EUA, Canadá e Alemanha passaram a classificar a escória como um coproduto da siderurgia (FREITAS, 2018). Ela é também conhecida como agregado siderúrgico, e sua geração, cerca de 400 kg por tonelada de aço produzido, dá uma ideia do grande volume de material gerado no Brasil e no mundo (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

O processo produtivo empregado na indústria siderúrgica é capaz de gerar dois diferentes tipos de escória: a de alto-forno e a de aciaria. A escória proveniente da obtenção do ferro-gusa, originada a partir da fusão redutora do minério de ferro, é classificada como de alto-forno, enquanto a obtida durante a produção do aço é denominada escória de aciaria (MASUERO et al., 2004; HARDER, 2020).

Dentre os processos produtivos para a obtenção do aço, os dois mais utilizados são: o método de fusão e refino da sucata em fornos elétricos a arco (EAF – *Electric Arc Furnace*) e o método de refino do ferro-gusa líquido em conversores à oxigênio (forno conversor LD - *Linz Donawitz* ou BOF - *Basic Oxygen Furnace*). Devido a esses distintos métodos de produção, as escórias de aciaria são subdivididas em escória de aciaria elétrica e escória de aciaria LD (MASUERO et al., 2004; FREITAS, 2018; BRANCA et al., 2020).

No total, 70% do aço mundial produzido são obtidos pelo processo classificado como de alto-forno, durante o qual, o minério de ferro é reduzido a ferro-gusa e depois é convertido em aço no forno conversor. As entradas dessa rota são principalmente minério de ferro, carvão, calcário e sucata de aço. Na segunda rota, baseada principalmente no EAF, são produzidos 30% do aço mundial, utilizando sucata como insumo e eletricidade como fonte de energia (BRANCA et al., 2020).

Em 2018, cerca de 1,247 bilhão de toneladas de ferro-gusa foram produzidas em todo o mundo, levando à produção de aproximadamente 0,330 a 0,375 bilhão de toneladas de escória de alto-forno. Já a produção global de aço bruto foi de aproximadamente 1,807 bilhão de toneladas (70,8% pelo processo LD e 28,8% pelo processo EAF) no ano de 2018. Derivadas desses números, as quantidades anuais de escória de aciaria somam um total de 0,250 bilhão de toneladas. No total, existem cerca de 0,600 bilhão de toneladas de escórias da indústria siderúrgica em todo o mundo (HARDER, 2020).

Em 2017, segundo dados do Instituto Aço Brasil (2018), para cada tonelada de aço produzido no Brasil foram gerados 607 kg de resíduos e coprodutos diretos (pós, lamas, escórias, carepas, refratários etc.). A geração de agregado siderúrgico de alto-forno representou 42% do volume total, e a de escória de aciaria, 27%. Os agregados siderúrgicos de alto-forno em sua quase totalidade (92%) foram vendidos, especialmente para a produção de cimento. No caso das escórias de aciaria, foram vendidos 36% e reutilizados internamente 23%, sendo a pavimentação de vias e estradas sua principal aplicação.

Dentro da perspectiva de aplicação da escória de aciaria na engenharia rodoviária, estudos têm apontado para a possibilidade de mobilização de suas propriedades mecânicas e hidráulicas quando utilizada moída (em pó) e na presença de umidade, onde reage quimicamente e ajuda na formação de compostos com propriedades cimentantes (POH et al., 2006; ORTEGA-LÓPEZ et al., 2014; LOPES et al., 2022, 2023).

Considerando o grande volume de escória gerado e o potencial de uso desses materiais, justifica-se avaliar a viabilidade técnica do emprego do resíduo industrial escória oxidante de aciaria elétrica em pó, dentro do contexto de sua aplicação como agente estabilizante de solos. Algumas pesquisas realizadas já atestam a viabilidade do uso de finos de escória oxidante de aciaria elétrica (FEAE) como agente estabilizante em camadas de pavimentos rodoviários (ORTEGA-LÓPEZ et al., 2014; PITANGA et al., 2016; KAMBOLE et al., 2017; SILVA et al., 2019; PIRES et al., 2019; RODRIGUES et al., 2021; PARSAEI et al., 2021; YILDIRIM, PREZZI, 2022; LOPES et al., 2022, 2023).

O desenvolvimento de tecnologias de reciclagem de RCC e FEAE tem adquirido relevância nas últimas décadas. Mais pesquisas são, no entanto, necessárias para entender melhor certos comportamentos, como as características de uso conjunto destes dois resíduos na melhoria de solos para camadas estruturais de pavimentos. Acredita-se que o setor da construção civil e a indústria do aço podem colaborar significativamente na gestão de resíduos sólidos a partir do reaproveitamento do RCC e da escória, evitando, assim, a deposição em aterros, proporcionando a redução no consumo de matérias-primas e diminuindo o gasto energético.

Com o intuito de contribuir no reaproveitamento de resíduos da construção civil e da indústria do aço, esta pesquisa teve por objetivo avaliar o comportamento mecânico de misturas de solo com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (RCCr) estabilizadas com FEAE para aplicação em camadas de pavimentos. Para a composição das misturas, foi adotada a metodologia de Planejamento de Experimentos (*Design of Experiment* [DOE]) em arranjo simplex para obtenção das proporções ideais dos componentes. Este método permite uma melhor avaliação, por abordagem estatística, da relação entre as proporções dos

componentes nas misturas e as respostas nos parâmetros de interesse. A obtenção de superfícies de resposta e a otimização matemática e gráfica na delimitação de composições solo-resíduos que atendem aos critérios desejáveis, possibilitam obter resultados comparativamente mais robustos em relação às técnicas empíricas até então utilizadas.

Para obtenção das superfícies de resposta, foram avaliadas, na energia do Proctor normal, as propriedades mecânicas RCS e índice CBR das misturas solo-resíduos nos períodos de cura selada de 0 e 7 dias. Após, via função Desejabilidade, as proporções dos componentes que maximizam os parâmetros de interesse nas misturas foram determinadas. Essas misturas otimizadas foram avaliadas, na energia do Proctor normal, quanto a RCS e ao índice CBR no período de cura selada de 28 dias. Todos os materiais e misturas otimizadas foram avaliados quanto às características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais.

2.1.1 Planejamento experimental de misturas

Projetos de experimentos de misturas são aqueles em que há a mistura íntima de dois ou mais componentes para formação de um produto final. Mistura é aqui definida como sendo uma combinação composta por dois ou mais componentes, em que as quantidades (ou proporções) de cada componente da mistura são dependentes entre si. A soma destas quantidades, expressas como frações da mistura e mensuradas em peso, volume ou outra unidade, não deve exceder a 1 (ou a unidade). Tal condição causa uma interdependência entre os componentes da mistura (CALADO, MONTGOMERY, 2003; CORNELL, 2011; NOVAES et al., 2017).

Sendo x_i o componente da mistura e q o número de componentes, a soma das frações dos i componentes obedece à equação:

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

Quando a resposta de interesse do produto investigado depende somente das proporções relativas dos diferentes componentes da mistura, planejamentos com misturas são indicados para se descrever o sistema. Nesses experimentos, os componentes são misturados em várias combinações com diferentes proporções, e propriedades físicas e/ou químicas resultantes dessas misturas são medidas. Assume-se que essas propriedades (as respostas) são funções somente das proporções dos componentes (os fatores) na mistura, e não da quantidade total desta (NOVAES et al., 2017). O objetivo principal é, a partir de uma abordagem estatística, descrever, dentro dos limites experimentais e com número reduzido de ensaios, o comportamento das propriedades de interesse nas misturas estudadas (JIAO et al., 2018).

Essas propriedades são então avaliadas e, quando satisfatórias, permitem inferir quais proporções dos componentes na mistura atendem à condição de interesse. Para que se possa prever qual mistura causa um determinado posicionamento da resposta, são criadas, a partir de modelos polinomiais estimados, superfícies de respostas (NOVAES et al., 2017). Essas superfícies de respostas são obtidas por combinação de técnicas de planejamento de experimentos, análise de regressão e métodos de otimização. Elas se fundamentam no ajuste de modelos matemáticos empíricos aos dados experimentais obtidos, segundo uma determinada matriz experimental, com o objetivo de descrever o comportamento desses dados e fazer previsões estatisticamente válidas (HANRAHAN, LU, 2006). Dessa forma, a Metodologia de

Superfícies de Resposta é muito utilizada para quantificar e interpretar as relações entre as respostas e os efeitos dos fatores (ORLANDINI et al., 2014).

Segundo Calado e Montgomery (2003), existem diversos tipos de arranjos para misturas. Nesses arranjos, em misturas com três componentes e nenhuma restrição, o espaço experimental é representado por um triângulo (simplex-centróide, simplex-lattice), com os vértices correspondendo aos componentes puros, os lados correspondendo às misturas binárias e os pontos internos correspondendo às misturas ternárias.

Entretanto, existem situações nas quais certas limitações são impostas nas proporções dos componentes na mistura, sendo necessária a determinação de limites (inferior, superior ou ambos). Nestas situações, têm-se misturas com restrições, em que o arranjo utilizado (vértices extremos) deve considerar não só a proporção dos componentes, mas também restrições para essas proporções (CALADO, MONTGOMERY, 2003).

Tradicionalmente, em prospecção de novos materiais para a área de pavimentação, estudos envolvendo dosagens de misturas são realizados pelo monitoramento de um fator por vez e observação de sua influência sobre uma resposta experimental. Nesse tipo de experimentação univariada, enquanto o nível de um fator (componente) é alterado, os níveis dos demais são mantidos constantes. Como consequência, essa técnica não possibilita a avaliação dos efeitos de interação entre os componentes.

São recorrentes, na engenharia rodoviária, normas ou pesquisas referentes a misturas de três diferentes materiais para emprego em camadas estruturais de pavimentos (DNER, 1994a; DER-PR, 2005a; DER-SP, 2006; YUAN et al., 2011; REIS et al., 2014; PITANGA et al., 2016; REZENDE et al., 2017; FEDRIGO et al., 2018; SILVA et al., 2019; SOUZA et al., 2020; LUKIANTCHUKI et al., 2021). Nessas pesquisas, observa-se que o método de dosagem é empírico e que o número de experimentos requeridos tende a crescer à medida que a combinação de diferentes teores dos componentes investigados aumenta. Isso torna, muitas vezes, o estudo inviável, visto o grande número de misturas e o elevado tempo de execução. Já métodos de dosagem baseados em delineamento experimental de misturas permitem otimizar as respostas em função somente das proporções relativas dos componentes na mistura com um número reduzido de experimentos (CALADO, MONTGOMERY, 2003; NOVAES et al., 2017; JIAO et al., 2018).

Recentemente, algumas pesquisas têm abordado considerações acerca de métodos mais acurados de dosagem para misturas na área de pavimentação (CHOMICZ-KOWALSKA, MACIEJEWSKI, 2015; IWAŃSKI et al., 2016; FEDRIGO et al., 2017; KLEINERT et al., 2019; EMMANUEL et al., 2020; RODRIGUES et al., 2021; ALANEME et al., 2022). Esses estudos permitem, a partir de uma abordagem estatística multivariada, aperfeiçoar a obtenção das dosagens ideais dos componentes na mistura. Mas, em geral, ainda são poucas as pesquisas realizadas.

2.2 Materiais e métodos

2.2.1 Coleta e preparação dos materiais

No trabalho experimental aqui apresentado, foram utilizados dois solos tropicais, aqui denominados S1 e S2, provenientes da Zona da Mata Mineira, Estado de Minas Gerais, Brasil. O S1, um solo granular residual jovem de gnaiss, foi coletado no horizonte C de um talude de corte na zona rural do Município de Cajuri-MG. Ele é procedente da jazida de empréstimo

denominada “Nô da Silva”, localizada nas coordenadas geográficas latitude 20°46’46,23’’S e longitude 42°49’12,68’’WGr. O S2, um solo fino residual maduro de gnaiss, foi coletado na zona rural do Município de Viçosa-MG, às margens da BR-120, no horizonte B de um talude de corte localizado nas coordenadas geográficas latitude 20°47’29,50’’S e longitude 42°50’17,60’’WGr.

Ambos os solos foram coletados na condição deformada, em conformidade com as orientações constantes na norma DNER-PRO 003 (DNER, 1994b) do DNIT. As amostras foram dispostas em sacos plásticos devidamente vedados e transportadas até o Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LEC-UFV), campus Viçosa-MG, onde foram secas ao ar e destorroadas.

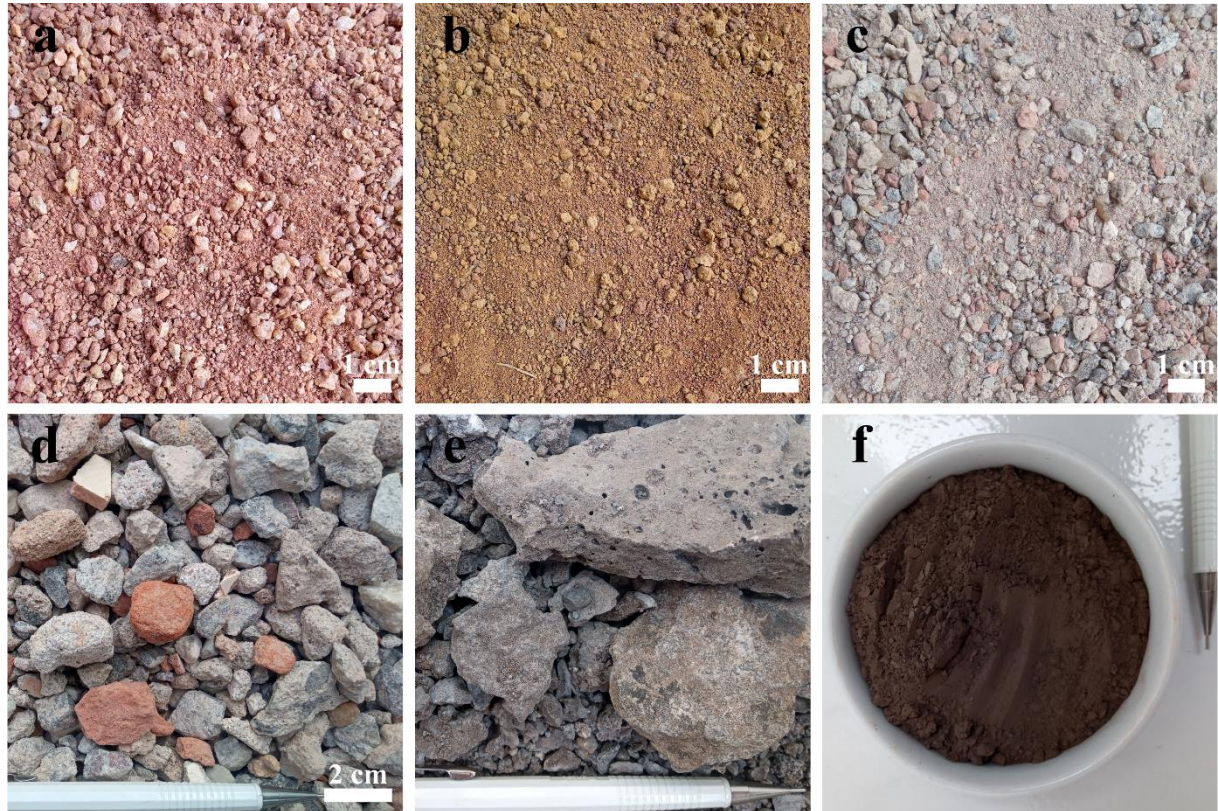
O RCCr é proveniente da usina de beneficiamento Ecovia Reciclagem de Resíduos da Construção Civil, localizada na cidade de Varginha-MG, Brasil. A usina se enquadra na definição de usina fixa e, para a britagem, utiliza um britador de mandíbulas. Os resíduos são recolhidos em caçambas por toda a cidade e descarregados no pátio central da empresa. Ao chegar na usina, esses resíduos são acomodados em pilhas e separados conforme a composição predominante (RCC de composição mista e RCC de concreto). O material passa por processo de triagem manual, durante o qual os resíduos indesejáveis (madeiras, plásticos, pneus, vidros, entre outros) são descartados. Após esse processo, os RCC são encaminhados para o britador, onde são cominuídos e, então, categorizados por um conjunto de peneiras de diferentes aberturas. Os agregados cinzentos, originários de preparo e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (lajes, vigas, blocos, tubos, meios-fios), são comercializados como brita e areia. Os agregados oriundos de materiais vermelhos (tijolos cerâmicos, telhas, pisos) são comercializados como material para recuperação de estradas rurais ou obras de terraplenagem em condomínios.

O RCCr foi coletado segundo as normas DNER-PRO 120 (DNER, 1997) e NBR 10007 (ABNT, 2004c). A amostra foi adequadamente acondicionada em tonéis vedados e transportada até o LEC-UFV. Após processo de homogeneização, o RCCr foi separado por peneiramento em duas frações granulométricas: material retido entre as peneiras de #4,80 mm e de #19,00 mm (RCCr graúdo) e material passante na peneira de #4,80 mm (RCCr miúdo). Tal procedimento se fez necessário devido ao fenômeno de segregação do RCCr miúdo, quando armazenado conjuntamente ao RCCr graúdo.

A escória de aciaria elétrica utilizada no programa experimental foi cedida pela unidade siderúrgica da VSB (Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil), localizada no município de Jeceaba-MG, Brasil. A escória é proveniente do forno elétrico a arco (escória oxidante) e foi coletada, no estado bruto, no pátio de estocagem a céu aberto da fábrica segundo as exigências da NBR 10007 (ABNT, 2004c). A amostra foi acondicionada em tonéis vedados e transportada até o LEC-UFV. Posteriormente, a fim de aumentar a superfície específica da escória, o material foi fragmentado em um moinho de bolas cilíndrico para a redução da granulometria, até que passasse integralmente pelas aberturas da peneira de #0,15 mm (peneira n.º 100).

Na Figura 2.1 são apresentados os materiais utilizados na pesquisa.

Figura 2.1: Amostras de S1 (a), S2 (b), RCCr miúdo (c), RCCr graúdo (d), escória no estado bruto (e) e FEAE (f).



Fonte: Acervo do autor.

2.2.2 Caracterização dos materiais

Os procedimentos de redução e preparo das amostras para os ensaios seguiram as normas NBR NM 27 (ABNT, 2001) e NBR 6457 (ABNT, 2016a), para os solos, e DNER-PRO 199 (DNER, 1996a), para os resíduos.

Os ensaios de caracterização física dos materiais foram realizados de acordo com as normas: (i) Solos: NBR 7181 - Análise granulométrica (ABNT, 2016b), NBR 6459 e NBR 7180 - Limites de Atterberg (ABNT, 2016c; ABNT, 2016d) e NBR 6508 - Massa específica (ABNT, 2016e); (ii) RCCr: NBR 7181 - Análise granulométrica (ABNT, 2016b), NBR 7809 - Índice de forma (ABNT, 2019), NBR 6508 e NBR 6458 - Massa específica (ABNT, 2016e; ABNT, 2016f) e DNER-ME 035 - Abrasão Los Angeles (DNER, 1998); (iii) FEAE: ISO 13320 - Análise granulométrica (ISO, 2020), NBR 11579 - Índice de finura (ABNT, 2012a), NBR 16372 - Superfície específica (ABNT, 2015), NBR 16605 - Massa específica (ABNT, 2017) e NBR NM 18 - Perda ao fogo (ABNT, 2012b).

Os solos e o RCCr miúdo também foram classificados segundo os sistemas TRB (*Transportation Research Board*) (AASHTO, 2021), USC (*Unified Soil Classification*) (ASTM, 2017) e MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) (DNER, 1994c, 1994d, 1996b).

Os materiais foram analisados quanto a sua composição química, pelo método de fluorescência de raios-X (FRX), composição mineralógica, por difração de raios-X (DRX), e

suas características microestruturais, por técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Os ensaios de FRX foram realizados no equipamento EDX-720 *Shimadzu Rayny*. A análise foi realizada em amostras com tamanho de partícula inferior a 75 μm , obtidas por cominuição. Os ensaios por DRX foram realizados no equipamento D8 *Discover* com sistema de reconhecimento automático de componentes. As características dos ensaios foram radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), tensão de trabalho de 40 kV e corrente elétrica de 40 mA. As amostras foram escaneadas de 5° a 80° (2θ), com um tamanho de passo de 0,05° e um tempo acumulado por passo de 1 segundo. As imagens por MEV foram realizadas em equipamento da marca JEOL, modelo JSM-6010LA, magnificação de 8X a 300.000X e voltagem de aceleração de 500 V a 20 kV.

A granulometria do FEAE foi realizada por método de difração a laser (ISO, 2020). O equipamento utilizado foi o granulômetro *Mastersizer 2000*, da Malvern Instruments Ltda, com capacidade de leitura de 0,02 μm a 2.000 μm .

2.2.3 Caracterização das misturas

Os ensaios de caracterização física das misturas solo-resíduos foram realizados de acordo com as normas: NBR 7181 - Análise granulométrica (ABNT, 2016b), NBR 6459 e NBR 7180 - Limites de Atterberg (ABNT, 2016c; ABNT, 2016d) e NBR 6508 e NBR 6458 - Massa específica (ABNT, 2016e; ABNT, 2016f).

As misturas otimizadas foram classificadas segundo os sistemas TRB (AASHTO, 2021), USC (ASTM, 2017) e MCT (DNER, 1994c, 1994d, 1996b).

As avaliações mineralógica e microestrutural das misturas otimizadas foram realizadas pelas técnicas de DRX e MEV. Os equipamentos utilizados foram os mesmos já citados na subseção 2.2.2.

Neste trabalho, com objetivo de interromper os processos de hidratação e preservar as amostras das misturas de interesse em um tempo de cura escolhido, inibindo, assim, a continuidade de reações pozolânicas, adotou-se conservar os espécimes em álcool isopropílico (SNELLINGS et al., 2018).

2.2.4 Preparação das misturas

Para realização deste estudo, o domínio experimental para as misturas propostas sofreu restrições, sendo adotados limites máximos e/ou mínimos para as proporções dos componentes. No caso do FEAE, adotou-se um limite superior de 20%, definido com base nos estudos desenvolvidos por Pitanga et al. (2016), Silva et al. (2019) e Pires et al. (2019). Para os componentes solo e RCCr, a restrição foi definida considerando-se que a composição binária destes deveria atender à faixa granulométrica “D” especificada na norma DNIT 141-ES (DNIT, 2010a), a qual contempla as especificações para a execução da camada de base de pavimentos, utilizando solos estabilizados granulometricamente. Para atender a essa restrição, a dosagem do solo com o RCCr miúdo e RCC graúdo foi realizada de modo que a composição pudesse gerar o melhor ajuste possível à faixa granulométrica “D” do DNIT (DNIT, 2010a). Como na obtenção das composições solo-RCCr, os componentes solo, RCCr miúdo e RCCr graúdo foram ajustados separadamente, esse procedimento gerou distintas dosagens de RCCr miúdo e

RCCr graúdo para S1 e S2. A relação RCCr miúdo/RCCr graúdo, em massa seca dos materiais, para as composições com S1 e S2, foram de 0,3 (RCCr1) e 1,4 (RCCr2), respectivamente.

A Tabela 2.4 apresenta os intervalos de restrições adotados para os componentes nas misturas.

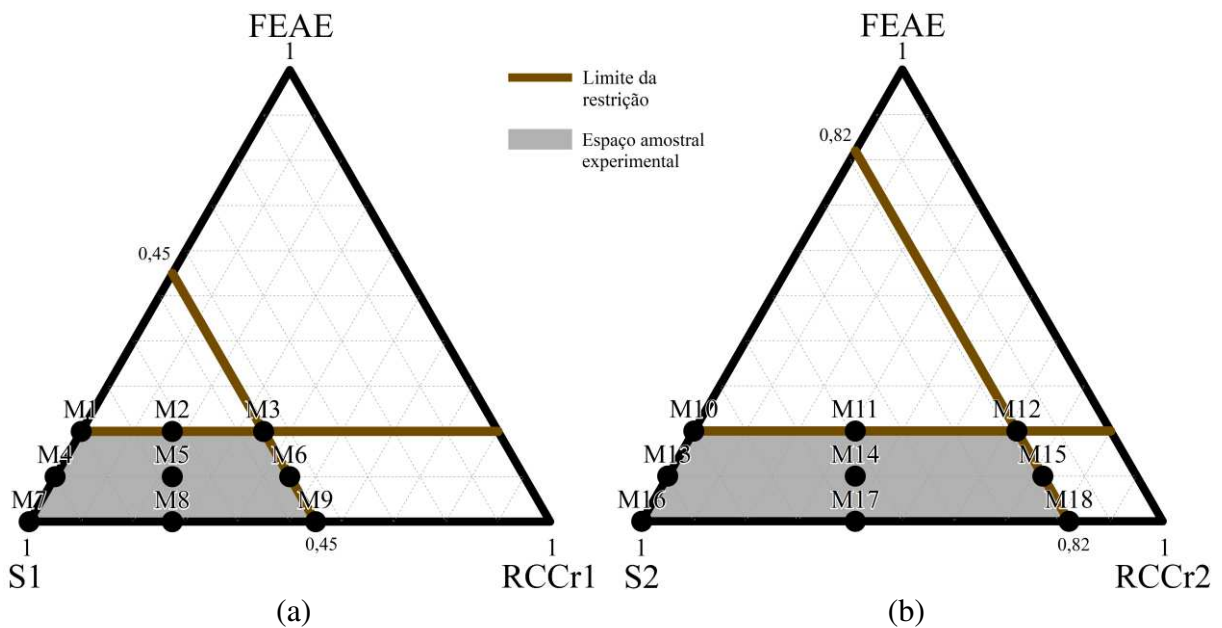
Sistema	Restrições dos Componentes
S1-RCCr1-FEAE	$1 \leq S1 \leq 0,55$
	$0 \leq RCCr1 \leq 0,45$
	$0 \leq FEAE \leq 0,20$
S2-RCCr2-FEAE	$1 \leq S2 \leq 0,18$
	$0 \leq RCCr2 \leq 0,82$
	$0 \leq FEAE \leq 0,20$

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nos estudos desenvolvidos por Pitanga et al. (2016), Silva et al. (2019), Pires et al. (2019) e norma DNIT 141-ES (DNIT, 2010a).

Definidos os intervalos de variação dos componentes nas misturas, elaborou-se um delineamento experimental em arranjo simplex-vértices extremos, utilizando-se o software de análise estatística Minitab.

Na Figura 2.2 e na Tabela 2.5 são apresentados, respectivamente, o diagrama dos planejamentos experimentais e o detalhamento numérico das composições das misturas propostas.

Figura 2.2: Planejamento experimental de mistura em rede simplex-vértices extremos para os efeitos dos componentes solo, RCCr e FEAE: (a) diagrama de composição para os componentes S1, RCCr1 e FEAE; (b) diagrama de composição para os componentes S2, RCCr2 e FEAE.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Na Figura 2.2, as linhas em marrom representam as restrições (limites superior e/ou inferior) impostas aos componentes. A área trapezoidal (em cinza) representa o espaço amostral do experimento.

Para o cálculo da superfície de resposta dos parâmetros RCS e índice CBR, foram definidos nove pontos para cada experimento de mistura: quatro localizados nos vértices, quatro localizados nos pontos médios das arestas e um no centroide do espaço amostral (Figura 2.2). As misturas foram nomeadas como M1, M2,..., M18, nas quais M7 e M16 representam, respectivamente, os componentes S1 e S2 puros.

Tabela 2.5: Planejamento experimental de mistura para os sistemas solo-RCCr-FEAE.

Mistura	Proporção dos componentes			Mistura	Proporção dos componentes		
	S1	RCCr1	FEAE		S2	RCCr2	FEAE
M1	0,800	0,000	0,200	M10	0,800	0,000	0,200
M2	0,675	0,125	0,200	M11	0,490	0,310	0,200
M3	0,550	0,250	0,200	M12	0,180	0,620	0,200
M4	0,900	0,000	0,100	M13	0,900	0,000	0,100
M5	0,725	0,175	0,100	M14	0,540	0,360	0,100
M6	0,550	0,350	0,100	M15	0,180	0,720	0,100
M7	1,000	0,000	0,000	M16	1,000	0,000	0,000
M8	0,775	0,225	0,000	M17	0,590	0,410	0,000
M9	0,550	0,450	0,000	M18	0,180	0,820	0,000

Fonte: Resultado da pesquisa.

Realizado o planejamento do experimento, as misturas foram processadas conforme as proporções dos componentes listadas na Tabela 2.5. Para a produção das misturas, as amostras de solo e RCCr foram secas ao ar e, então, suas unidades foram determinadas. As proporções, ou quantidades percentuais, de solo, RCCr e FEAE a serem adicionadas às misturas foram calculadas considerando-se a massa seca dos materiais.

As misturas foram processadas em etapas progressivas, adicionando-se os seus componentes na seguinte ordem crescente de granulometria: FEAE, solo, RCCr miúdo e RCCr graúdo. Para cada adição de novo componente na mistura, seguia-se uma homogeneização manual e o processamento em peneiras de abertura nominal de #4,80 mm e/ou #19,00 mm. Ressalta-se que as misturas foram realizadas individualmente para cada corpo de prova (CP), o que reduz a probabilidade de ocorrência da repetição de eventuais erros de produção.

Definiu-se que o teor de água necessária à confecção dos CPs a serem ensaiados deveria variar em cada mistura de modo a atender aos correspondentes parâmetros de ótimo de compactação (teor de umidade ótimo [Wot] e peso específico aparente seco máximo [$\gamma_{dm\acute{a}x}$]) correspondentes à energia do Proctor normal (ABNT, 2012c, 2016g).

De posse dos resultados obtidos para os parâmetros RCS e índice CBR, nos diferentes tempos de cura, realizou-se a análise estatística dos resultados. Para tal, os dados experimentais foram ajustados a modelos matemáticos polinomiais, em que os coeficientes estimados foram avaliados a um nível de 10% de significância, em virtude de os dados obtidos apresentarem grande variabilidade. Dessa forma, o nível de confiança das equações estimadas é igual a 90% (P-valor = 0,10). A qualidade do ajustamento dos modelos estimados foi avaliada a partir dos

coeficientes de determinação (R^2)¹. Este indica qual a proporção da variável dependente está sendo explicada pelas variáveis independentes da equação estimada.

2.2.5 Ajuste de modelos e obtenção de superfícies de resposta

A utilização de planejamentos experimentais para misturas permite verificar os efeitos dos componentes solo, RCCr e FEAE no ganho de resistência mecânica das misturas, aqui avaliada pela RCS e índice CBR. O objetivo é conhecer não apenas o comportamento das misturas, individualmente, mas o comportamento do conjunto de misturas em todo o espaço amostral do experimento por meio de otimização matemática e gráfica, e, assim, delimitar uma gama de composições dos componentes solo, RCCr e FEAE (região otimizada) cujas misturas atendam às propriedades de interesse.

As superfícies de resposta, dentro do espaço amostral do experimento, foram geradas no software Minitab. Cada superfície representa o modelo gerado para cada tempo de cura estudado. Para a determinação da superfície de resposta das propriedades analisadas, foi adotado o modelo numérico cúbico especial (CALADO, MONTGOMERY, 2003). O modelo é apresentado no seu modo completo conforme Equação 2.

$$y = \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k \sum_j^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j}^k \sum_{j < k}^k \sum_k^k b_{ijk} x_i x_j x_k \quad (2)$$

em que:

y : estimativa da resposta RCS ou índice CBR;

k : número de componentes na mistura;

b : coeficientes dos componentes puros e suas interações, a serem determinados nas equações;

x : componentes da mistura.

Os valores de RCS e índice CBR obtidos nos ensaios, nas condições experimentais de laboratório, foram utilizados no estágio exploratório da construção dos modelos. As análises estatísticas preliminares dos modelos obtidos permitiram avaliar o efeito dos componentes (solo, RCCr e FEAE) e suas interações nas propriedades mecânicas das misturas.

Para esses resultados preliminares, realizou-se a análise estatística a partir do ajuste dos dados experimentais aos modelos polinomiais, respeitando-se a significância dos termos ($P\text{-valor} \leq 0,10$). A fim de se obter resultados mais robustos, utilizou-se o método *Stepwise*, em que os coeficientes estimados que apresentaram resultados estatisticamente não significativos ($P\text{-valor} > 0,10$) foram retirados dos modelos. O método *Stepwise* é uma técnica automática de ajuste de modelos de regressão, usada nos estágios exploratórios da construção de modelos, para identificar um subconjunto útil de variáveis independentes. O processo adiciona sistematicamente, em cada etapa, a variável independente mais significativa ou remove a menos significativa do conjunto de variáveis explicativas. Portanto, os coeficientes das equações

¹ Uma propriedade importante do coeficiente de determinação, R^2 , é que a medida em que se acrescenta variáveis explicativas (independentes) ao modelo, há uma tendência de aumento no seu valor. O R^2 ajustado, também é utilizado como medida de avaliação da qualidade do ajustamento do modelo, sendo que, este é ajustado pelos graus de liberdade, ou seja, penalizado pelo acréscimo de variáveis explicativas no modelo. Para informações mais detalhadas a respeito dos coeficientes de determinação, R^2 e R^2 ajustado, ver Gujarati (2011), p. 217-218.

reportadas, nas Tabelas 2.12 a 2.15, são todos estatisticamente significativos a um nível de até 10% de significância.

Durante o processamento dos dados, é possível verificar as observações não usuais, as quais representam os resultados experimentais que não se adaptaram corretamente ao modelo proposto. Por ajuste estatístico, o *software*, durante essa etapa, sugere um valor mais adequado ao modelo. Assim, é permitido substituir o resultado experimental pelo valor sugerido ou realizar um novo ensaio, para essa(s) mistura(s), em laboratório. O *software* recomenda adotar alguma dessas medidas quando o resíduo padrão for superior a ± 3 . Destarte, não foi necessário alterar nenhum dado nesse trabalho e todos os valores analisados representam resultados obtidos experimentalmente. Após a exclusão dos termos estatisticamente não significativos, foram obtidas as equações que representam a influência de cada variável explicativa sobre a variável de resposta.

2.2.6 Ensaios de caracterização mecânica

2.2.6.1 Compactação

A determinação dos respectivos pontos de ótimo de compactação das misturas foi realizada segundo as NBR 7182 (ABNT, 2016g) e NBR 12023 (ABNT, 2012c) na energia do Proctor normal. Para todas as 18 misturas, o cilindro metálico grande ($\text{Ø}15,24 \times 17,78$ cm [cilindro CBR]) foi utilizado na determinação das curvas de compactação. Obtidas as curvas, os valores de W_{ot} e $\gamma_{dm\acute{a}x}$ foram adotados como referência na moldagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios de RCS e CBR.

2.2.6.2 RCS

O ensaio de RCS foi realizado conforme as prescrições das normas técnicas DNER-ME 202 (DNER, 1994e) e DNER-ME 201 (DNER, 1994f), em corpos de prova compactados em cilindros de dimensões $\text{Ø}10 \times 12,73$ cm. Para cada mistura investigada foram compactados três corpos de prova (ensaio em triplicata). Após a etapa de moldagem, os corpos de prova foram extraídos dos cilindros de compactação, envelopados em plástico filme e acondicionados em câmara úmida, para preservar o teor de umidade. As amostras ficaram acondicionadas nesse ambiente por 7 e 28 dias. As amostras com 0 dia de cura foram submetidas ao ensaio de RCS logo após o procedimento de compactação. Os corpos de prova, previamente à realização do ensaio, não foram submetidos a imersão em água por 4 horas, conforme fixa a norma DNER-ME 201 (DNER, 1994f).

Para o ensaio, utilizou-se prensa MARSHALL automática digital microprocessada (marca SOLOTEST) com velocidade de deformação de 1,00 mm por minuto. A prensa possui célula de carga tipo S de 5.000 kgf de capacidade e LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) de 50 mm com resolução de 0,01 mm.

2.2.6.3 CBR

O ensaio para obtenção dos parâmetros CBR foi realizado conforme a norma DNIT 172-ME (DNIT, 2016). Foram moldados corpos de prova em triplicata para cada uma das misturas investigadas. Após a moldagem, os corpos de prova para as curas de 7 e 28 dias foram envelopados em plástico filme e acondicionados em câmara úmida, para preservar o teor de umidade. Os corpos de prova de 0 dia de cura foram submetidos ao ensaio logo após o procedimento de compactação. Os corpos de prova, imediatamente após o processo de cura,

permaneceram imersos em água por período de 96 horas (quatro dias). Terminado o período de embebição, foram retirados da imersão, para realização do ensaio.

Para o ensaio, foi utilizada prensa com motor elétrico (marca SOLOTEST) com velocidade de deformação de 1,27 mm por minuto. A prensa possui anel dinamométrico de 5.000 kgf de capacidade, sensível a 2,5 kgf, extensômetro com resolução de 0,001 mm, para medir as deformações do anel dinamométrico, e extensômetro com resolução de 0,01 mm, para medir a penetração do pistão no CP.

2.2.7 Controle de qualidade

Todos os corpos de prova foram moldados em triplicata para possibilitar a aplicação de análise estatística na determinação dos valores de RCS e índice CBR. Os critérios de aceitação dos corpos de prova foram: (i) valor de umidade de compactação entre $\pm 1\%$ da W_{ot} obtida da curva de compactação da mistura; (ii) grau de compactação (GC) entre 97% e 103%; (iii) coeficiente de variação (Equação 3) dos parâmetros RCS e índice CBR, para os três corpos de prova, menor ou igual a 15%.

O coeficiente de variação (CV), métrica utilizada para avaliações de repetitividade e reprodutibilidade, foi determinado a partir da equação:

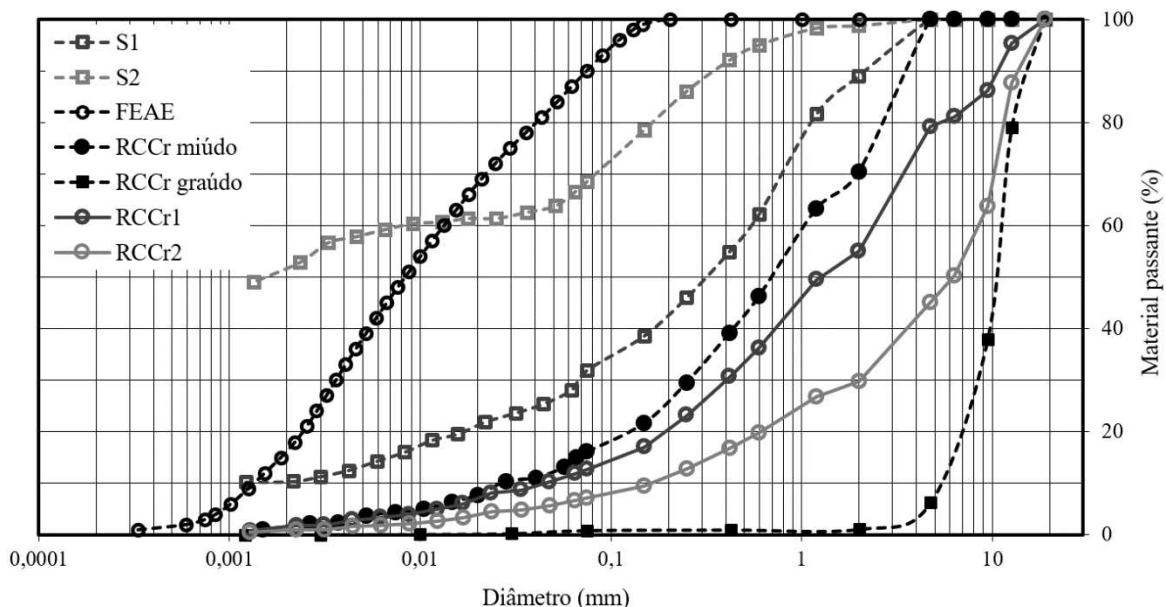
$$CV = \left(\frac{\text{Desvio Padrão}}{\text{Média}} \right) \cdot 100\% \quad (3)$$

2.3 Resultados e discussões

2.3.1 Caracterização física, química, mineralógica e morfológica dos materiais

Na Figura 2.3 estão apresentadas as curvas granulométricas do S1, S2, RCCr miúdo, RCCr graúdo, RCCr1, RCCr2 e FEAE.

Figura 2.3: Curvas granulométricas dos materiais.



Fonte: Resultado da pesquisa.

A Tabela 2.6 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica para os dois solos e o RCCr.

Tabela 2.6: Síntese dos resultados das caracterizações física e mecânica dos solos e do RCCr.

Parâmetros	Materiais			
	S1	S2	RCCr miúdo	RCCr graúdo
% argila ($\emptyset \leq 0,002$ mm)	10	52	2	0
% silte ($0,002$ mm $\leq \emptyset \leq 0,06$ mm)	17	14	11	1
% areia fina ($0,06$ mm $\leq \emptyset \leq 0,2$ mm)	15	17	12	0
% areia média ($0,2$ mm $\leq \emptyset \leq 0,6$ mm)	20	12	21	1
% areia grossa ($0,6$ mm $\leq \emptyset \leq 2,0$ mm)	27	4	24	1
% pedregulho ($\emptyset \geq 2,0$ mm)	11	1	30	97
Limite de liquidez (%)	40	58		
Limite de plasticidade (%)	26	40	Não plástico	-
Índice de plasticidade (%)	14	18		
Peso específico (kN/m ³)	27,27	27,57	28,94	25,90
Classificação TRB	A-2-7 (1)	A-7-5 (13)	A-1-b	-
Classificação USC	SC	CH	SW-SM	-
Classificação MCT	NA'	LG'	NA'	-
Wot (%)	EN	14,1	28,3	-
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	EN	18,2	14,6	-
CBR (%)	EN	17	7	-
Expansão CBR (%)	EN	0,2	1,4	-
RCS (kPa)	EN	191	261	-
Abrasão Los Angeles (%)				42
Índice de forma				3

Ø: Diâmetro; EN: Energia normal.

Fonte: Resultado da pesquisa.

Verifica-se que os solos são bem distintos, com predomínio da fração areia no S1 e de materiais finos ($\emptyset \leq 0,06$ mm) no S2. Conforme sua granulometria, o S1 é caracterizado como uma areia silto-argilosa e o S2 como uma argila arenosa (ABNT, 1995). No sistema de classificação TRB, o S1 foi enquadrado no grupo A-2-7 e o S2 no grupo A-7-5. Segundo essa classificação, aos solos granulares do subgrupo A-2-7 se atribui comportamento excelente a bom como camada do subleito de pavimentos rodoviários. Aos solos do subgrupo A-7-5 se atribui previsão de fraco a pobre comportamento como subleito de vias, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume (DNIT, 2006; AASHTO, 2021). Pelo sistema USC, S1 e S2 foram classificados como SC (areia com finos) e CH (argilas de alta plasticidade), respectivamente.

Quanto à classificação geotécnica MCT, pode-se esperar que os solos apresentem as seguintes características: (i) S1, classificado como NA' (Arenoso Não-Laterítico), possuindo a fração areia bem graduada e a porcentagem de finos com menos de 35% passante na peneira n.º 200, pode oferecer condições adequadas para uso como bases de pavimentos. Contudo, se na fração areia ou silte ocorrer a presença de mica e/ou macrocristais de caolinita e/ou halosita, eles podem ser inapropriados para bases de pavimentos, sendo importante observar sua capacidade de suporte e expansibilidade (NOGAMI, VILLIBOR, 1995). Segundo o DER-PR (2005b), são admissíveis como revestimento primário e, se classificados em zona limítrofe com NS' e NG', devem atender a critérios complementares de aceitação; (ii) S2, classificado como LG' (Laterítico Argiloso), é costumeiramente do grupo de solos que constituem o horizonte B; são conhecidos pedologicamente por latossolos. Por ter porcentagem relativamente elevada da fração areia (32%), pode apresentar propriedades similares às dos solos do grupo LA',

possuindo, entretanto, menor capacidade de suporte e menores módulos de resiliência (NOGAMI, VILLIBOR, 1995). De acordo com o DER-PR (2005b), costumam apresentar excelente durabilidade, podendo ser utilizados como revestimento primário de vias não pavimentadas. Quando apresentar $c' < 1,7$ podem ser utilizados sem aplicação de agregados, desde que o greide seja plano ou suave. Se classificados na faixa limítrofe com NA' e NG' (e' entre 1,10 e 1,15), devem atender aos critérios complementares de aceitação.

Conforme os critérios do DNIT (DNIT, 2006), os parâmetros CBR observados em S1 e S2, compactados na energia do Procto normal, permitem suas aplicações em subleito e reforço de subleito de pavimentos.

O RCCr miúdo é constituído, principalmente, de areia média, areia grossa e pedregulho. Classificado como A-1-b e SW-SM, caracteriza-se por ser um material bem graduado e com pouca presença de finos (DNIT, 2006; ASTM, 2017). Devido à baixa quantidade de argila e silte presente na sua composição, o RCCr miúdo não apresentou limites de liquidez e plasticidade e , portanto, não possui índice de plasticidade. O comportamento não plástico do RCC também foi observado nos trabalhos de Jiménez et al. (2012), Vieira e Pereira (2015), Souza et al. (2020) e Moreira et al. (2020). Isso se deve à baixa quantidade de grãos que passam pela peneira n.º 200.

Segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004a), a amostra de RCCr foi identificada como agregado de resíduo de concreto (ARC) que, de acordo com a classificação, é predominantemente originado de concreto, com teor de fragmentos a base de rocha (brita) e argamassa acima de 90%. A dimensão máxima característica do RCCr graúdo é de 19 mm e, conforme sua granulometria, possui predomínio da fração pedregulho. O material apresenta coloração fortemente cinza (grande quantidade de resíduos de concreto e mármore), média presença de material vermelho e pouca presença de resíduos de madeira, plástico ou metal.

Quanto ao desgaste físico sofrido pelos agregados quando submetidos a cargas abrasivas, o RCCr graúdo apresentou valor de 42% no ensaio de abrasão “Los Angeles”, condizente com os estudos de Arulrajah et al. (2013), Vieira e Pereira (2015) e Beja et al. (2020). Tal valor é considerado baixo, já que a norma DNIT 141-ES (DNIT, 2010a), que delimita as especificações para materiais utilizados em sub-base e base de pavimentos estabilizados granulometricamente, indica um limite máximo de 55%. Esse comportamento, provavelmente, decorre da composição do RCCr, majoritariamente derivada de concreto. Para o ensaio de índice de forma, o agregado graúdo apresentou valor 3. A NBR 15116 (ABNT, 2004a) estabelece, como critério de aceitação, valores menores ou iguais a 3. Partículas planas e alongadas são mais suscetíveis à quebra durante o processo de compactação (LEITE et al., 2011).

Em relação aos contaminantes, o agregado reciclado apresentou 0,8% de materiais não minerais de características distintas, ficando abaixo do limite de 3% estabelecido pela NBR 15116 (ABNT, 2004a).

A análise granulométrica do FEAE apresentou grande presença de partículas finas, com cerca de 80% de material passante na peneira de #75 μm . Na Tabela 2.7, apresentam-se outros resultados da caracterização física do FEAE empregados na pesquisa.

Tabela 2.7: Propriedades físicas dos FEAE utilizados na pesquisa.

Peso Específico (kN/m^3)	Superfície Específica (m^2/kg)	Índice de Finura (%)	Material retido na peneira #45 μm (%)	PF (%)
37,95	263,0	21,0	32,0	0,18

*PF: Perda ao fogo.

Fonte: Resultado da pesquisa.

As propriedades físicas observadas no FEAE (Tabela 2.7) são similares às obtidas por Pitanga et al. (2016), Pires et al. (2019) e Silva et al. (2019). Os valores de material retido na peneira de #45 μm e perda ao fogo estão em conformidade com as exigências da NBR 12653 (ABNT, 2014).

A escória de aciaria elétrica primária, em seu estado bruto (escória em pedregulhos), foi submetida ao ensaio de abrasão “Los Angeles” e apresentou valor de 15%. A característica de elevada dureza contribuiu para o excessivo tempo de cominuição observado (6-10 horas) no processamento da escória em pedregulho em FEAE, o que torna o processo mais caro e com maior consumo energético. Nesse sentido, seu uso em menores quantidades contribuiu positivamente para a demanda de energia.

Os resultados da caracterização química dos solos, do RCCr e do FEAE, realizada por meio da técnica de FRX, são apresentados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Composição química dos materiais por ensaio de FRX.

Elemento	Unidade	Concentração				Elemento	Unidade	Concentração			
		S1	S2	RCCr*	FEAE			S1	S2	RCCr*	FEAE
V ₂ O ₅	ppm	852	1.000	2.565	926	TiO ₂	%	2,0	3,3	1,4	0,6
Cl	ppm	652	600	2.016	430	CaO	%	0,1	0,2	15,6	40,6
ZrO ₂	ppm	525	683	10.650	119	MnO	%	0,1	0	0,2	6,3
ZnO	ppm	125	110	5.854	0	MgO	%	-	-	1,3	2,8
SrO	ppm	0	24	9.150	1.340	P ₂ O ₅	%	0,5	0,5	-	-
Bi ₂ O ₃	ppm	52	17	1.005	-	SO ₃	%	0,2	0,1	2,4	0,2
Al ₂ O ₃	%	30,9	37,3	15,1	3,7	K ₂ O	%	0,3	0,1	2,1	-
SiO ₂	%	44,6	34,7	39,9	11,8	Cr ₂ O ₃	%	0,1	0,1	-	1,6
Fe ₂ O ₃	%	20,9	23,5	17,5	32,2	Outros	%	0,1	0,1	1,4	0,0

*RCCr miúdo.

Fonte: Resultado da pesquisa.

Os solos são constituídos, principalmente, por sílica, alumina, óxido de ferro e, em menores teores, dióxido de titânio e pentóxido de fósforo. Segundo Nogami e Villibor (1995), nos solos lateríticos (S2) os óxidos de ferro e de alumínio hidratados possuem propriedades cimentantes, desempenhando papel importante na formação de torrões (grumos) e concreções. Destaca-se, também, a contribuição dos óxidos de ferro na cor dos solos e as eventuais propriedades pozolânicas dos óxidos de alumínio hidratados. No caso dos solos saprolíticos (S1), os argilo-minerais e, eventualmente, outros minerais presentes não se apresentam recobertos por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, como no caso dos solos lateríticos.

Para os valores apresentados na Tabela 2.9, a relação entre os teores de sílica e alumina ($[\% \text{SiO}_2 \cdot 1,7] / [\% \text{Al}_2\text{O}_3]$), ou valor Ki, é usualmente utilizada como um indicador do grau de intemperismo dos solos. Solos altamente intemperizados caracterizam-se pedogeneticamente pela remoção de sílica e acúmulo de alumínio nos seus perfis (DONAGEMA et al., 2011). Por essa relação, os valores de Ki calculados para o S1 e S2 são, respectivamente, 2,45 e 1,58. Esses valores indicam ser o S1 um solo residual jovem e o S2 um solo residual maduro, corroborando os resultados da caracterização física realizada (Tabela 2.7).

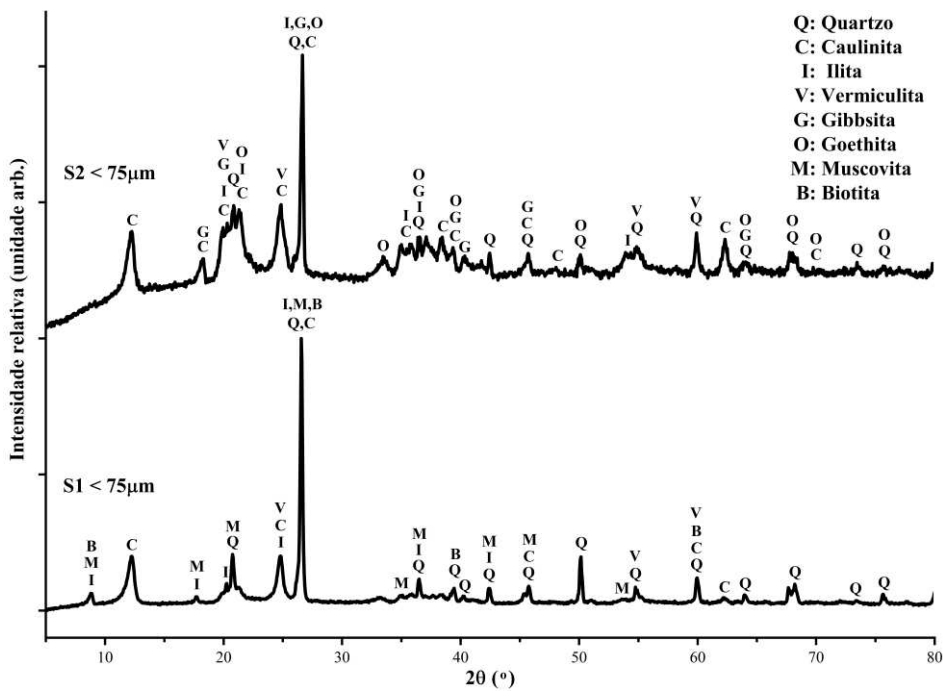
O RCCr apresentou, em maior concentração, a presença de sílica. Quantidades significativas de óxidos de ferro, cálcio e alumínio também foram observadas. A maior ocorrência desses elementos na composição do RCCr confirma o que foi observado em nível macroscópico, onde os materiais cimentícios aparecem em grande quantidade. O ferro,

alumínio e cálcio justificam, como se verá mais adiante, a presença de minerais como caulinita, biotita, calcita e gipsita no RCCr.

O FEAE é composto, basicamente, por CaO , Fe_2O_3 , SiO_2 e, em menores proporções, MnO , Al_2O_3 e MgO . Importante observar que cal, óxido de ferro e sílica são elementos usuais da composição química do cimento Portland. Conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), o teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (47,6%) do FEAE está próximo do mínimo exigido (50%) e os percentuais de SiO_3 (0,2%) e Na_2O (0,0%) estão abaixo dos valores máximos toleráveis. A presença de grandes quantidades de CaO , SiO e, em menores proporções, MgO , e sua elevada relação CaO/SiO_2 (3,5), são indicativos da reatividade potencial do material como um ligante hidráulico (POH et al., 2006). Quando finamente moído e/ou ativado com um material alcalino (tipicamente cal hidratada), produz materiais convencionais de silicato de cálcio hidratado (KAMBOLE et al., 2017). No entanto, os minerais CaO e MgO não hidratados, quando na presença de água, resultam em compostos expansivos prejudiciais à construção de estradas (YÜKSEL, 2016; KAMBOLE et al., 2017; JAMES O'CONNOR et al., 2021).

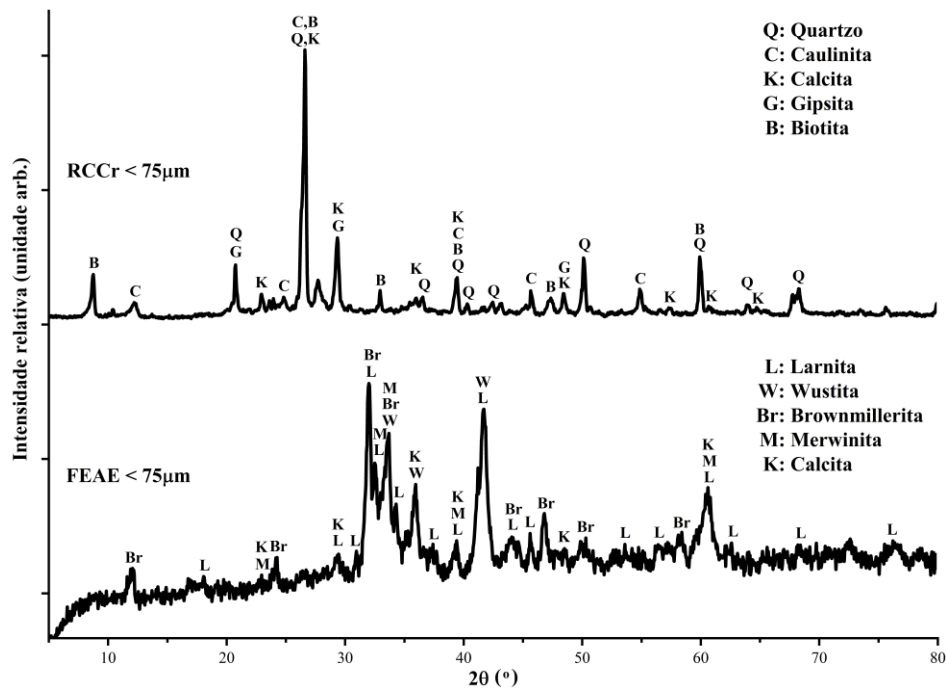
Análises mineralógicas por DRX foram realizadas em amostras ($\varnothing \leq 75 \mu\text{m}$) do S1, S2, RCCr e FEAE obtidas por cominuição. Os difratogramas são apresentados nas Figuras 2.4 e 2.5.

Figura 2.4: Difratogramas do S1 e S2.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Figura 2.5: Difratogramas do RCCr e FEAE.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Os difratogramas dos materiais apresentaram picos de cristalinidade bem definidos. Os solos são constituídos, principalmente, de caulinita (mineral 1:1) e quartzo, minerais primários de elevada resistência à intemperização (KAMPF et al., 2019). A caulinita, principal mineral da fração argila de solos desenvolvidos sob condições tropicais úmidas, é comumente encontrada em solos lateríticos e saprolíticos do Brasil (NOGAMI, VILLIBOR, 1995). S1 apresentou características de um solo jovem, com picos bem definidos de muscovita, ilita e biotita. S2 apresentou características pedológicas de um solo em avançado estágio de intemperização, com presença de gibbsita, goethita e vermiculita, cuja ocorrência é favorecida em condições de longo tempo de exposição do solo aos agentes bioclimáticos. São materiais de origem bastante envelhecidos e alterados, resultando solos argilosos (KAMPF et al., 2019). Maiores detalhes sobre minerais presentes nos distintos estádios de formação dos solos, bem como características macro e microestruturais, podem ser obtidas em Nogami e Villibor (1995, p. 12-21) e Kampf et al. (2019, pp. 349-366).

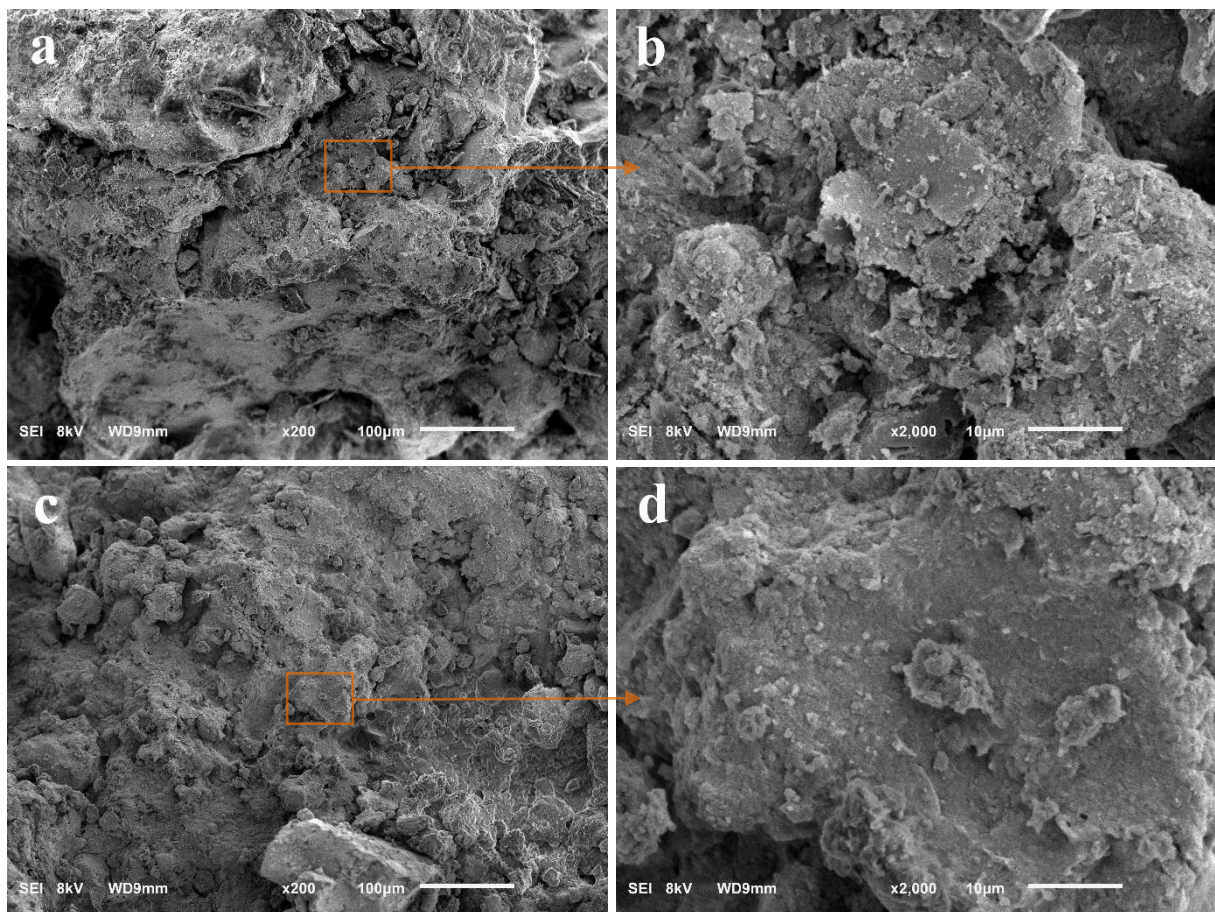
A análise por DRX do RCCr demonstrou a presença quartzo, caulinita, calcita, gipsita e biotita. A presença desses minerais condiz com o observado por outros autores (JIMÉNEZ et al., 2012; FERREIRA et al., 2019b; MOREIRA et al., 2020; SOUZA et al., 2020). O quartzo deriva da presença de rochas naturais, já a calcita pode ter diferentes origens, como, por exemplo, a partir de agregados naturais e de componentes carbonatados (FERREIRA et al., 2019b) utilizados em concretos e argamassas, como a cal e o cimento. A presença de gipsita também foi observada em outras pesquisas (JIMÉNEZ et al., 2012; FERREIRA et al., 2019b). A origem da biotita pode estar relacionada com os resíduos de granito presentes no RCCr.

Para o FEAE, os minerais identificados foram larnita (Ca_2SiO_4), wustita (FeO), brownmillerita ($\text{Ca}_2[\text{Al,Fe}]_2\text{O}_5$), merwinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}[\text{SiO}_4]_2$) e calcita (CaCO_3), em coerência com estudos prévios de outros autores (KAMBOLE et al., 2017; PIRES et al., 2019; BRANCA et al., 2020; JAMES O'CONNOR et al., 2021). Como já relatado anteriormente, a mineralogia do FEAE pode variar amplamente, a depender da sucata utilizada, do tipo de aço produzido,

das condições de funcionamento do forno, dos tratamentos empregados e da forma de resfriamento (FREITAS, 2018; JAMES O’CONNOR et al., 2021).

Para estabelecer uma conexão entre as propriedades físicas e químico-mineralógicas dos materiais, uma análise morfológica foi realizada pela técnica de MEV e está apresentada nas Figuras 2.6 e 2.7.

Figura 2.6: Fotomicrografias dos solos obtidas por MEV: (a) organização microestrutural de S1; (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe das microagregações e foliações de partículas lamelares; (c) organização microestrutural de S2; (d) ampliação de “c”, com detalhe da estruturação de um torrão e do plasma argiloso que permeia a amostra.

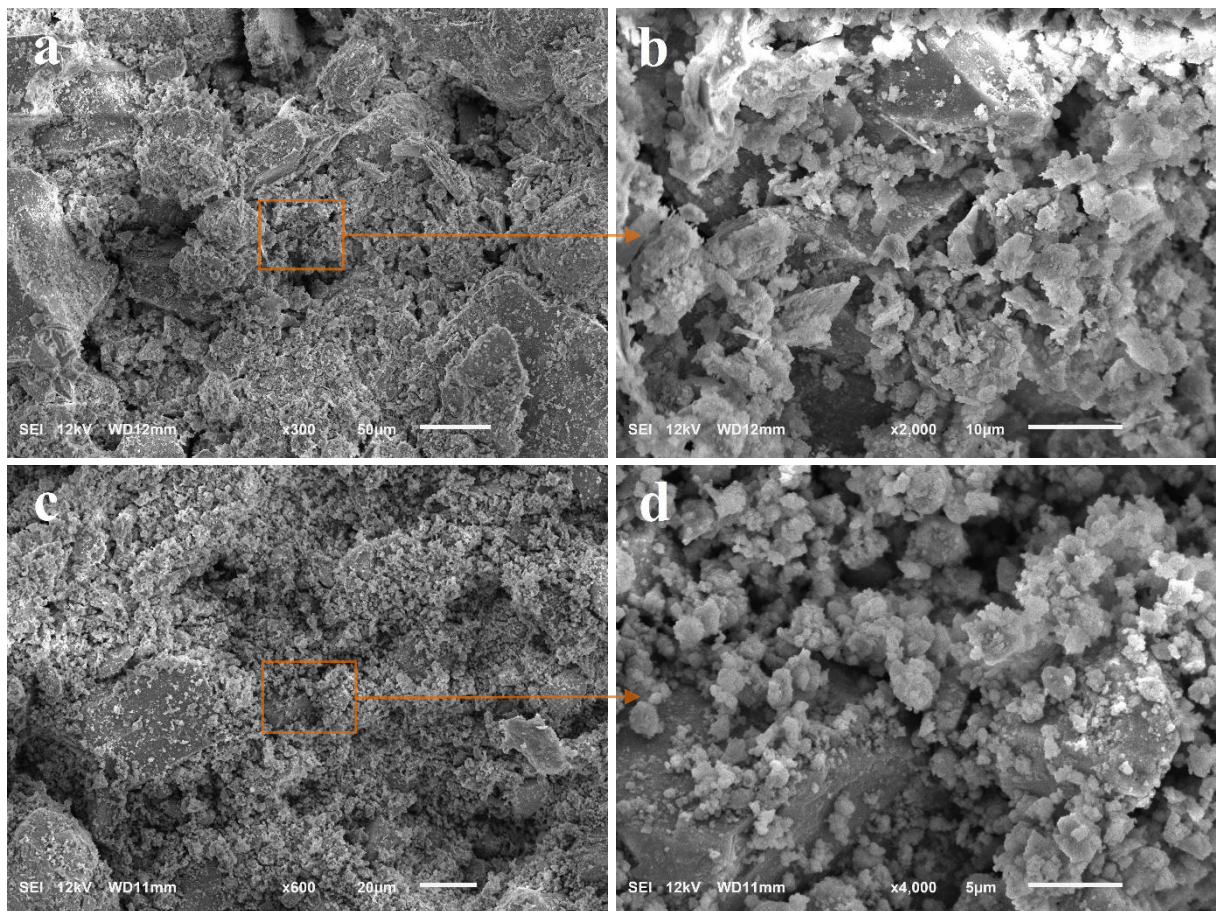


Fonte: Resultado da pesquisa.

Em S1 (Figura 2.6a), é possível identificar a estruturação lamelar das camadas de deposição em uma grande partícula, provavelmente, de sílica. Observa-se, também, forte estruturação microgranular, com presença de grãos volumétricos de diferentes formatos, textura rugosa, aspecto poroso e arestas vivas. Os macroporos, principalmente na forma de canais com diâmetros da ordem de 30 μm , estão preenchidos com pequenas partículas de dimensões variadas, provavelmente quartzo. Na imagem de ampliação (Figura 2.6b), as microagregações observadas, foliações formadas por partículas lamelares com formatos variados e espessura inferiores a 1 μm , podem ser compostos de caulinita. Por ser um solo jovem, pouco intemperizado, é comum possuir grande quantidade de minerais primários e secundários, guardando características herdadas da rocha original.

Na Figura 2.6c, correspondente ao S2, nota-se uma estrutura mais compacta e regular, característica de solos com grande presença de argilominerais. Estes aglomerados são constituídos, basicamente, por agentes cimentantes presentes nos solos, como a sílica, óxidos de ferro e de alumínio (NOGAMI; VILLIBOR, 1995), confirmando os resultados obtidos no ensaio de FRX (Tabela 2.9). Na imagem com maior ampliação (2.6d), observa-se a estruturação de um torrão (grumo) e detalhe do plasma argiloso que permeia a amostra. Sua estrutura amorfa condiz com um ambiente de gênese sedimentar, onde não se formam estruturas cristalinas e a agregação das moléculas se dá por ligações iônicas.

Figura 2.7: Fotomicrografias do RCCr e FEAE obtidas por MEV: (a) morfologia do RCCr fino ($\text{Ø} \leq 0,15 \text{ mm}$); (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe de partículas com dimensões inferiores a $10 \mu\text{m}$; (c) morfologia do FEAE; (d) ampliação de “c”, com detalhe do grande número de partículas, inferiores $5 \mu\text{m}$, aderidas às partículas maiores.



Fonte: Resultado da pesquisa.

O RCCr fino ($\text{Ø} \leq 0,15 \text{ mm}$) apresentou morfologia irregular, com partículas de diversos tamanhos, formas variadas e de arestas e vértices angulares (Fig. 2.7a e 2.7b), o que se justifica em função do processo de britagem do RCCr (FERREIRA et al., 2019b). Na imagem com maior ampliação (2.8b), observa-se um grande número de partículas, de dimensões inferiores a $10 \mu\text{m}$, apresentando estruturas volumétricas e lamelares, de superfície porosa com textura moderadamente rugosa e áspera, provavelmente provenientes de argamassas e concretos.

Analisando as imagens do FEAE (Figuras 2.7c e 2.7d), pode-se observar grãos de tamanhos variados, consideravelmente menores do que os grãos observados no RCCr, onde as

partículas maiores são predominantemente volumétricas, moderadamente rugosas e possuem bordas levemente arredondadas. O grande número de pequenas partículas, inferiores 5 μm , aderidas às partículas maiores, contribui para a elevada superfície específica (263 m^2/kg) do FEAE, o que auxilia na maior capacidade de interação química dos finos de escória com os solos e o RCCr.

2.3.2 Caracterização das misturas

A Tabela 2.9 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados nas misturas previstas no programa experimental.

Tabela 2.9: Propriedades físicas das misturas previstas no programa experimental.

Mistura	Proporção (%)			Wot* (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ * (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	Iv	(%)			IG	EA (%)	D ₆₀ (mm)	Cc
	Solo	RCCr	FEAE					LL	LP	IP				
M1	80,0	0,00	20,0	12,7	19,22	28,90	0,50	24	15	9	1	2	0,31	1,1
M2	67,5	12,5	20,0	13,0	19,11	28,79	0,51	24	17	7	0	2	0,44	0,9
M3	55,0	25,0	20,0	13,3	19,54	28,68	0,47	23	19	4	0	2	0,72	0,6
M4	90,0	0,00	10,0	13,0	19,06	28,06	0,47	29	20	9	0	7	0,41	2,0
M5	72,5	17,5	10,0	13,4	19,11	27,92	0,46	29	20	9	0	8	0,70	1,9
M6	55,0	35,0	10,0	12,6	19,21	27,78	0,45	27	19	8	0	8	1,30	1,1
M7	100,0	0,00	0,00	14,1	18,22	27,27	0,50	40	26	14	1	9	0,50	14,1
M8	77,5	22,5	0,00	12,2	19,11	27,10	0,42	32	24	8	0	9	0,98	4,3
M9	55,0	45,0	0,00	12,3	19,22	26,93	0,40	33	23	10	0	28	2,50	2,7
M10	80,0	0,00	20,0	25,5	15,58	29,17	0,87	39	31	8	8	4	0,04	0,1
M11	49,0	31,0	20,0	19,9	17,27	29,18	0,69	28	21	7	4	9	0,15	12,0
M12	18,0	62,0	20,0	14,7	19,00	29,18	0,54	22	18	4	0	37	1,10	0,8
M13	90,0	0,00	10,0	27,2	14,87	28,35	0,91	38	35	3	7	3	0,04	0,0
M14	54,0	36,0	10,0	20,5	16,87	28,36	0,68	41	29	12	4	12	0,22	5,7
M15	18,0	72,0	10,0	14,5	18,80	28,37	0,51	26	20	6	0	40	2,30	1,5
M16	100,0	0,00	0,00	28,3	14,58	27,57	0,89	58	40	18	13	2	0,04	0,0
M17	59,0	41,0	0,00	21,6	16,38	27,58	0,68	47	35	12	3	9	0,33	0,2
M18	18,0	82,0	0,00	15,2	18,20	27,59	0,52	Não plástico			0	42	3,10	6,8

*Valores referentes a compactação na energia do Proctor normal.

Wot: Teor de umidade ótimo; $\gamma_{dm\acute{a}x}$: Peso específico aparente seco máximo; γ_s : Peso específico dos sólidos; Iv: Índice de vazios; LL: Limite de liquidez; LP: Limite de plasticidade; IP: Índice de plasticidade; IG: Índice de grupo; EA: Equivalente de areia; D₆₀: Diâmetro do grão correspondente a 60% mais fino; Cc: Coeficiente de curvatura.

Fonte: Resultado da pesquisa.

A incorporação do RCCr aos solos proporcionou, devido ao método de dosagem adotado, redução na proporção de finos e acréscimo da fração areia, resultando em misturas com melhor distribuição granulométrica e menores índices de vazios. Essas características auxiliam na melhoria da capacidade resistente das misturas que, mediante emprego de energia de compactação adequada, tendem a gerar produtos finais com propriedades satisfatórias de estabilidade (DNIT, 2010a).

Nota-se que a adição dos resíduos aos solos ocasionou incremento do peso específico aparente seco máximo e redução da umidade ótima. À medida em que as proporções dos RCCr e FEAE nos solos aumenta, o peso específico seco (γ_d) das misturas aumenta. Pode-se, portanto, presumir que um aumento no γ_d ocorre devido à adição dos resíduos. Isso decorre em razão dos

maiores pesos específicos dos resíduos e preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas existentes no FEAE (efeito *filler*). A distribuição granulométrica do FEAE indicou que 55% em massa desse material possuem diâmetros inferiores a 10 μm (Figura 2.3), o que contribui no melhor empacotamento dos grãos. Esse comportamento, normalmente associado a ganhos de resistência mecânica, já foi observado em estudos envolvendo misturas solo-escória (DINIZ et al. 2017; MUJTABA et al., 2018; PIRES et al., 2019; SILVA et al., 2019) e solo-RCCr (SOUZA et al., 2020; MOREIRA et al., 2020). De forma mais significativa, destaca-se que os ganhos de γ_d nas misturas M3, M6 e M9, em relação ao S1, e M12, M15 e M18, em relação ao S2, foram de 7%, 5% e 5% e 30%, 29% e 25%, respectivamente.

Observa-se também a influência dos resíduos no índice de plasticidade dos solos, onde os incrementos de RCCr e FEAE provocaram redução dessa propriedade nas misturas. Para a mistura M18, não foi possível determinar os limites de liquidez e plasticidade, caracterizando-a como não plástica.

2.3.3 Ensaios de caracterização mecânica

Objetivando a determinação das propriedades mecânicas de interesse, conforme as respectivas prescrições normativas, foram realizados ensaios de RCS e índice CBR nas misturas nos tempos de cura 0 e 7 dias. Os valores médios de RCS e índice CBR obtidos para cada mistura foram utilizados para o ajuste dos modelos matemáticos polinomiais via metodologia de DOE. Definidos os modelos e determinadas as regiões otimizadas, cujas misturas atendem às exigências técnicas normativas, obtiveram-se, via função Desejabilidade, as proporções dos componentes que maximizam os parâmetros de interesse nas misturas. Essas misturas, assim determinadas, foram avaliadas na energia do Proctor normal, quanto à RCS e ao índice CBR no período de cura de 28 dias. Elas foram classificadas segundo os sistemas TRB (AASHTO, 2021), USC (ASTM, 2017) e MCT (DNER, 1994c, 1994d, 1996b), e suas características granulométricas, químicas, mineralógicas e microestruturais são apresentadas.

2.3.3.1 RCS

A Tabela 2.10 apresenta os valores médios do parâmetro RCS obtidos dos três CPs confeccionados para cada mistura. Os valores dos CV (Equação 3), utilizados como critério de aceitação dos resultados observados, também são apresentados.

Tabela 2.10: Valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.

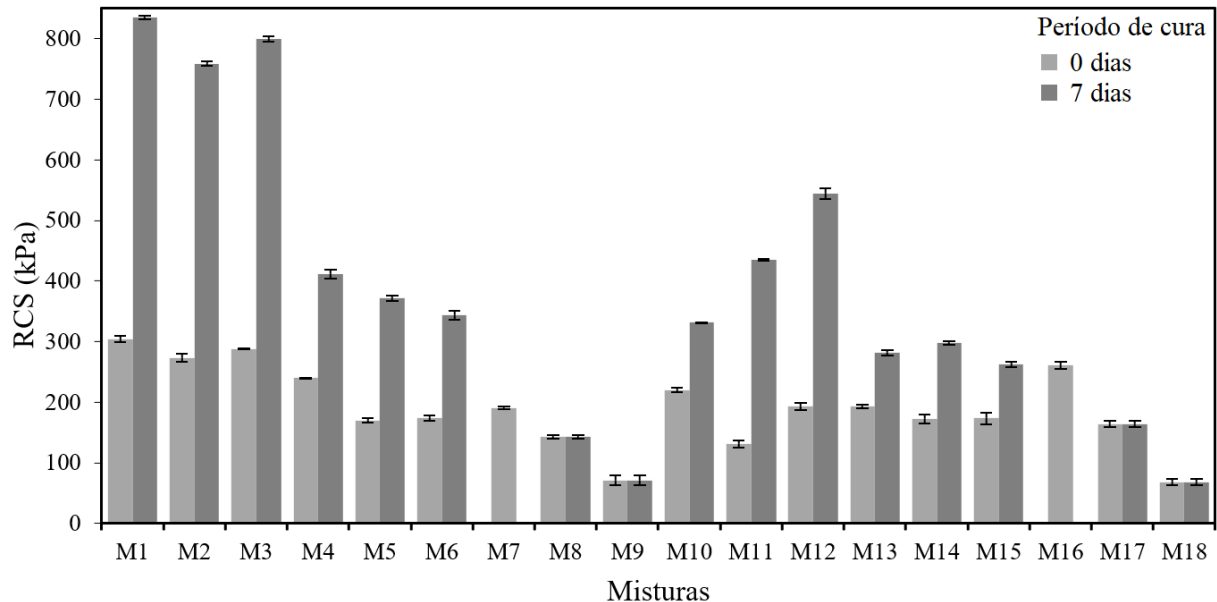
Mist.	Período de cura (dias)				Mist.	Período de cura (dias)			
	0		7			0		7	
	TR (kPa)	CV (%)	TR (kPa)	CV (%)		TR (kPa)	CV (%)	TR (kPa)	CV (%)
M1	304,31	5,6	834,89	3,3	M10	220,04	4,0	331,72	0,4
M2	273,59	6,6	758,95	3,5	M11	112,45	5,8	435,00	1,2
M3	288,03	1,0	799,72	4,7	M12	192,60	5,8	544,74	8,5
M4	240,00	0,6	411,31	7,4	M13	193,39	2,9	281,82	4,6
M5	169,82	4,0	372,20	4,6	M14	172,45	7,6	298,18	2,9
M6	173,56	4,4	344,20	7,5	M15	173,71	9,7	262,75	4,5
M7	190,93	1,5	190,93	1,5	M16	261,06	5,9	261,06	5,9
M8	142,65	3,2	142,65	3,2	M17	164,33	4,9	164,33	4,9
M9	71,47	7,9	71,47	7,9	M18	68,43	5,5	68,43	5,5

Mist.: Mistura; TR: Tensão de ruptura; CV: Coeficiente de variação.

Fonte: Resultado da pesquisa.

A Figura 2.8 apresenta os valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia Proctor normal, para os períodos de cura de 0 e 7 dias.

Figura 2.8: Valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Para as misturas sem adição do FEAE, não ocorreu ganho de resistência após o período de cura estudado, evidenciando que os componentes cimentícios do RCCr não reagiram quimicamente após o processo de hidratação promovida pela umidade de compactação. Segundo Jiménez (2013), os agregados reciclados de resíduos de construção tendem a reagir, principalmente, após 90 dias de cura. Esta reação é função direta das reações pozolânicas entre a sílica e a alumina das partículas de cerâmica e a portlandita hidratada do cimento, ou devido às propriedades hidráulicas que permanecem nos resíduos de cimento do concreto e/ou argamassa presentes no RCC.

A Figura 2.8 evidencia, para as misturas com adição do FEAE, um incremento da resistência em função do tempo. Os maiores valores de RCS, relativamente aos solos *in natura*, foram observados nos CPs com 20% de resíduo de escória na idade de 7 dias, comprovando, conforme relato de outros estudos (DINIZ et al. 2017; KAMBOLE et al., 2017; PIRES et al., 2019; SILVA et al., 2019), o potencial do FEAE como ligante hidráulico. As misturas M1, M2 e M3, para o S1, e M10, M11 e M12, para o S2, apresentaram os maiores valores de RCS. Importante observar que as misturas M1, M2, M3 e M12 apresentaram, após o período de cura selada, acréscimos superiores a 345 kPa nos valores de RCS. De acordo com a ASTM D 4609 (2008), um aumento na RCS de 345 kPa ou mais, após o período de cura, deve ser alcançado para que um tratamento com adição de aglomerantes na estabilização de solos seja considerado eficaz. No geral, as misturas com o S1 apresentaram os maiores acréscimos nos valores de RCS.

2.3.3.2 CBR

A Tabela 2.11 apresenta os valores médios dos parâmetros CBR obtidos dos três CPs confeccionados para cada mistura. Os valores dos CV (Equação 3), utilizados como critério de aceitação dos resultados observados, também são apresentados.

Tabela 2.11: Valores médios dos parâmetros CBR das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.

Mist.	Período de cura (dias)						Mist.	Período de cura (dias)					
	0		7		Expan. (%)	0		7		Expan. (%)			
	CBR (%)	CV (%)	CBR (%)	CV (%)		CBR (%)		CV (%)	CBR (%)		CV (%)		
M1	71	101	7,4	0,6	0,0	0,0	M10	38	58	9,8	5,8	0,0	0,0
M2	68	82	7,7	8,0	0,1	0,0	M11	58	64	6,6	5,6	0,0	0,0
M3	41	49	10,3	4,5	-0,1	0,0	M12	85	120	2,8	8,3	0,0	0,0
M4	39	54	6,0	4,0	0,1	0,0	M13	32	36	10,0	2,1	0,1	0,0
M5	13	30	3,6	11,1	-0,1	0,0	M14	39	43	1,0	9,3	0,3	0,3
M6	16	26	6,4	8,2	0,3	0,0	M15	35	46	8,8	1,8	0,2	0,2
M7	17	17	3,1	3,1	0,2	0,2	M16	7	7	2,8	2,8	1,4	1,4
M8	5	5	10,0	10,0	-0,2	-0,2	M17	14	14	5,5	5,5	0,2	0,2
M9	28	28	9,3	9,3	0,0	0,0	M18	37	37	4,8	4,8	0,1	0,1

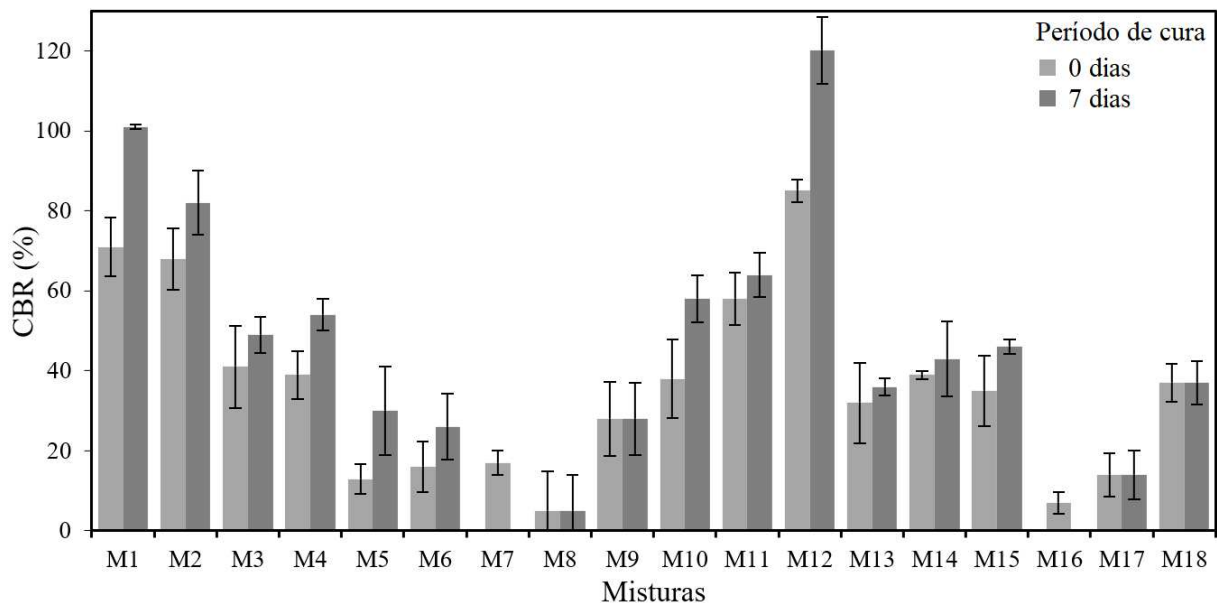
Mist.: Misturas; CV: Coeficiente de variação; Expan.: Expansão CBR.

Fonte: Resultado da pesquisa.

À exceção da mistura M16, que é o solo argiloso na condição pura, todas as misturas apresentaram baixos valores de expansão. Segundo os requisitos do DNIT (DNIT, 2010a, 2010b), os materiais constituintes de solos e mistura de solos e materiais britados devem apresentar expansão menor que 0,5% e 1% para uso como camadas de base e sub-base, respectivamente, de pavimentos rodoviários. Destaca-se que para os dois solos estudados, a adição dos resíduos e a adoção do tempo de cura contribuem na redução da expansão e incremento do índice CBR.

A Figura 2.9 apresenta os resultados do ensaio de índice CBR para os períodos de cura de 0 e 7 dias.

Figura 2.9: Valores médios do índice CBR das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Como esperado, as misturas M8, M9, M17 e M18 não apresentaram ganhos de resistência com o período de cura, fato já observado nos ensaios de RCS. Entretanto, M9 e M18, dosadas de forma a atender à faixa granulométrica D especificada pelo DNIT (DNIT, 2010a), apresentaram, respectivamente, ganhos de 65% e 429% no valor do índice CBR, quando comparadas aos solos na condição pura. Esses resultados comprovam que o RCCr, quando adicionado em proporções adequadas e promovendo correções granulométricas satisfatórias aos solos, acarreta ganhos de resistência mecânica às misturas.

Os resultados indicaram maiores valores de índice CBR para misturas com 20% de FEAE aos 7 dias, em que M1, M2 e M3 apresentaram, em média, CBR de 77%; M10, M11 e M12, 81%. Para as misturas com 10% de FEAE, aos 7 dias, o índice CBR médio observado foi de 37% para M4, M5 e M6, e de 42% para M13, M14 e M15. Segundo Mujtaba et al. (2018), os constituintes cimentícios presentes nos finos de escória, quando misturados com solo e na presença de água, desencadeiam processos como troca catiônica, floculação e aglomeração e reações pozolânicas, contribuindo na estabilização e ganho de resistência mecânica.

De acordo com os critérios do DNIT (DNIT, 2010a, 2010b), grande parte das misturas investigadas atendeu às condições de expansão $\leq 1\%$ e índice CBR $\geq 20\%$ exigíveis para execução de camadas de sub-base de pavimentos. As misturas M1 e M2, aos 7 dias, e M12, com e sem cura, atenderam aos critérios expansão $\leq 0,5\%$ e índice CBR $\geq 80\%$ para compor camadas de base de pavimentos. No entanto, conforme normativas do DNIT (DNIT, 2018a, 2018b), também é necessário analisar a resposta das misturas sob carregamento repetido. Os resultados obtidos comprovam a capacidade dos componentes RCCr e FEAE em promover ganhos de resistência mecânica às misturas estudadas.

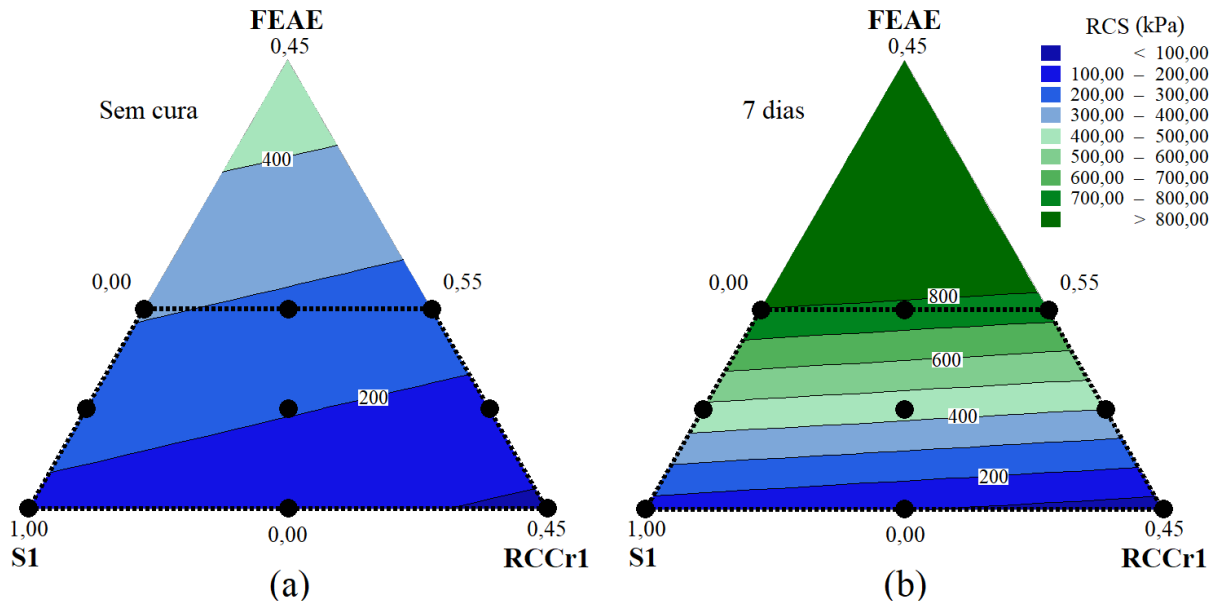
2.3.4 Ajuste dos modelos e obtenção de superfícies de resposta

Nas subseções, a seguir, os resultados obtidos quanto ao comportamento mecânico das misturas e apresentados nas Tabelas 2.11 e 2.12, foram discutidos mediante utilização da técnica de DOE, via equações de regressão e análise de superfícies de resposta realizadas no *software* Minitab. A magnitude e o sinal de cada coeficiente estimado indicam o efeito de cada componente no modelo, bem como os sinergismos e antagonismos das interações binárias e ternárias entre eles.

2.3.4.1 Modelos do parâmetro RCS

Na Figura 2.10, são apresentadas as superfícies de resposta para os valores de RCS das misturas S1-RCCr1-FEAE, nos tempos de cura 0 e 7 dias. Na Tabela 2.12, são apresentadas as equações de regressão que correlacionam os valores de RCS_0 e RCS_7 (variáveis dependentes) com as proporções de S1, RCCr1 e FEAE (variáveis independentes) nas misturas. Também são apresentados os parâmetros estatísticos para os modelos ajustados.

Figura 2.10: Superfícies de resposta da propriedade RCS das misturas S1-RCCr1-FEAE: (a) cura de 0 dia; (b) cura de 7 dias.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Tabela 2.12: Equações de regressão relacionadas a propriedade RCS para as misturas S1-RCCr1-FEAE.

Equações de regressão sistema S1-RCCr1-FEAE	R ²	R ² _{aj.}	DP (kPa)
$RCS_0 \text{ (kPa)} = 176,31S - 32,94R + 839,82E$	0,94	0,92	22
$RCS_7 \text{ (kPa)} = 154,80S - 67,24R + 3357,96E$	0,96	0,94	57

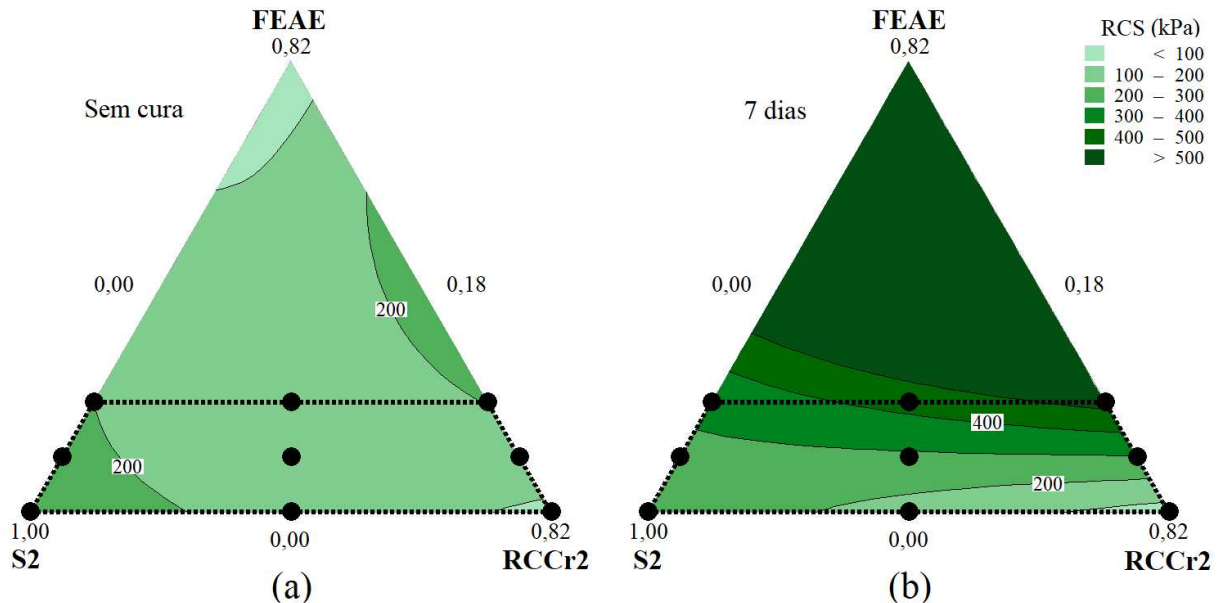
S: proporção de S1 na mistura; R: proporção de RCCr1 na mistura; E: proporção de FEAE na mistura; R²: coeficiente de determinação; R²_{aj.}: coeficiente de determinação ajustado; DP: desvio padrão da discrepância entre os valores preditos pelos modelos e os valores observados experimentalmente em laboratório.

Fonte: Resultado da pesquisa.

A Figura 2.10 apresenta as isolinhas dos valores de RCS para as misturas S1-RCCr1-FEAE. Nessa figura, visualiza-se a influência individual de cada componente sobre a propriedade analisada. Observa-se que os maiores valores de RCS, para ambos os tempos de cura, foram obtidos para as composições localizadas próximas ao vértice do componente FEAE, com participação significativa do componente S1. Os coeficientes de S1 e FEAE, observados nas equações RCS₀ e RCS₇, corroboram com a elevada participação desses componentes no ganho de resistência à compressão. A componente RCCr1, em menor grau, contribuiu negativamente no ganho de resistência. Ambos os modelos apresentaram ótimos parâmetros de ajuste.

Na Figura 2.11, são apresentadas as superfícies de resposta para os valores de RCS das misturas S2-RCCr2-FEAE, nos tempos de cura 0 e 7 dias. Na Tabela 2.13, são apresentadas as equações de regressão que correlacionam os valores de RCS₀ e RCS₇ com as proporções de S2, RCCr2 e FEAE nas misturas. Também são apresentados os parâmetros estatísticos para os modelos ajustados.

Figura 2.11: Superfícies de resposta da propriedade RCS das misturas S2-RCCr2-FEAE: (a) cura de 0 dia; (b) cura de 7 dias.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Tabela 2.13: Equações de regressão relacionadas a propriedade RCS para as misturas S2-RCCr2-FEAE.

Equações de regressão sistema S2-RCCr2-FEAE	R ²	R ² _{aj.}	DP (kPa)
$RCS_0 \text{ (kPa)} = 251,24S + 43,83R - 6,65E + 1594,12RE - 2918,54SRE$	0,88	0,75	27
$RCS_7 \text{ (kPa)} = 267,72S + 11,49R + 2887,96E - 2827,79SE$	0,99	0,98	18

S: proporção de S2 na mistura; R: proporção de RCCr2 na mistura; E: proporção de FEAE na mistura; R²: coeficiente de determinação; R²_{aj.}: coeficiente de determinação ajustado DP: desvio padrão da discrepância entre os valores preditos pelos modelos e os valores observados experimentalmente em laboratório.

Fonte: Resultado da pesquisa.

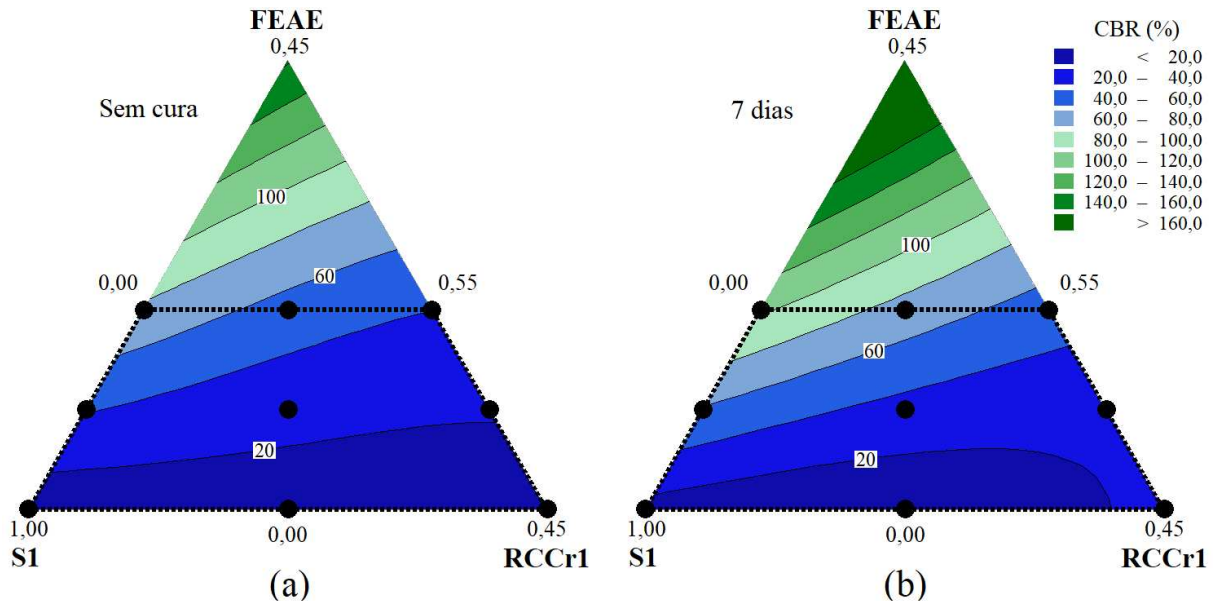
A Figura 2.11 apresenta as isolinhas dos valores de RCS para as misturas S2-RCCr-FEAE, permitindo visualizar a influência individual de cada componente sobre a propriedade RCS. Percebe-se que, na cura de 7 dias, os maiores valores de RCS foram obtidos nas composições localizadas próximas ao vértice da componente FEAE.

Para as equações da Tabela 2.13, em geral, as três componentes influenciaram positivamente no ganho de resistência, com destaque para o FEAE que, em RCS₇, possui o maior coeficiente da equação. Entretanto, as combinações de S2, RCCr2 e FEAE (ternária), em RCS₀, e S2 e FEAE (binária), em RCS₇, são negativamente correlacionadas, contribuindo para a redução da RCS.

2.3.4.2 Modelos do parâmetro índice CBR

Na Figura 2.12, são apresentadas as superfícies de resposta para os valores de índice CBR das misturas S1-RCCr1-FEAE, nos tempos de cura 0 e 7 dias. Na Tabela 2.14, são apresentadas as equações de regressão que correlacionam os valores dos índices CBR₀ e CBR₇ com as proporções de S1, RCCr1 e FEAE nas misturas. Os parâmetros estatísticos dos modelos ajustados também são apresentados.

Figura 2.12: Superfícies de resposta da propriedade índice CBR das misturas S1-RCCr1-FEAE: (a) cura de 0 dias; (b) cura de 7 dias.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Tabela 2.14: Equações de regressão relacionadas a propriedade índice CBR para as misturas S1-RCCr1-FEAE.

Equações de regressão do sistema S1-RCCr1-FEAE	R^2	$R^2_{aj.}$	DP (%)
$CBR_0 (\%) = 7,05S + 34,04R + 351,62E - 1546,99SRE$	0,84	0,75	12
$CBR_7 (\%) = 13,32S + 200,03R + 462,35E - 1181,42RE - 286,03SE$	0,98	0,96	6

S: proporção de S1 na mistura; R: proporção de RCCr1 na mistura; E: proporção de FEAE na mistura; R^2 : coeficiente de determinação; $R^2_{aj.}$: coeficiente de determinação ajustado; DP: desvio padrão da discrepância entre os valores preditos pelos modelos e os valores observados experimentalmente em laboratório.

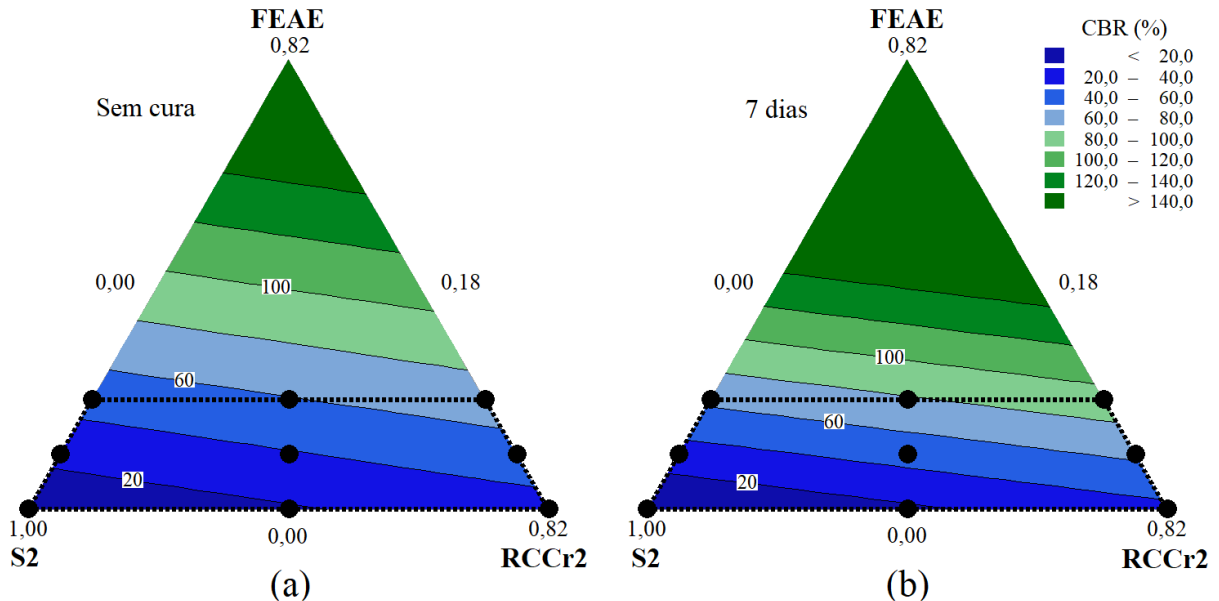
Fonte: Resultado da pesquisa.

Analisando os parâmetros, observa-se que, para R^2 e $R^2_{aj.}$, os modelos ajustados para os índices CBR_0 e CBR_7 não apresentam variabilidades consideráveis: quanto mais perto da unidade estiver o valor de R^2 e quanto mais próximos forem os valores de R^2 e $R^2_{aj.}$, melhor terá sido o ajuste do modelo aos dados observados. De acordo com essa condição, observa-se que o modelo CBR_7 apresentou os melhores parâmetros de ajuste.

Para as equações CBR_0 e CBR_7 , os componentes RCCr1 e FEAE interagem de forma antagônica, isto é, contribuem para a redução do valor de CBR. Em ambos os modelos e como já observados nos ensaios de RCS, fica evidente a grande participação do FEAE no ganho de CBR das misturas. Em menor grau, destaca-se, também, a participação do RCCr1 no ganho de resistência mecânica das misturas.

Na Figura 2.13 são apresentadas as superfícies de resposta para os valores de índice CBR das misturas S2-RCCr2-FEAE, nos tempos de cura 0 e 7 dias. Na Tabela 2.15 são apresentadas as equações de regressão que correlacionam os valores dos índices CBR_0 e CBR_7 com as proporções de S2, RCCr2 e FEAE nas misturas. Os parâmetros estatísticos dos modelos ajustados também são apresentados.

Figura 2.13: Superfícies de resposta da propriedade índice CBR das misturas S2-RCCr2-FEAE: (a) cura de 0 dia; (b) cura de 7 dias.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Tabela 2.15: Equações de regressão relacionadas a propriedade índice CBR para as misturas S2-RCCr2-FEAE.

Equações de regressão do sistema S2-RCCr2-FEAE	R ²	R ² _{aj.}	DP (%)
$CBR_0 (\%) = 3,28S + 38,77R + 226,03E$	0,84	0,78	11
$CBR_7 (\%) = - 1,73S + 42,86R + 327,24E$	0,83	0,78	16

S: proporção de S2 na mistura; R: proporção de RCCr2 na mistura; E: proporção de FEAE na mistura; R²: coeficiente de determinação; R²_{aj.}: coeficiente de determinação ajustado; DP: desvio padrão da discrepância entre os valores preditos pelos modelos e os valores observados experimentalmente em laboratório.

Fonte: Resultado da pesquisa.

Observando o comportamento das isolinhas dos valores de índice CBR e dos coeficientes das equações obtidas para as misturas S2-RCCr-FEAE, verifica-se que a componente FEAE, em maior grau, e a componente RCCr, em menor grau, contribuem significativamente para o ganho de resistência mecânica das misturas, principalmente após o período de cura selada.

De acordo com os resultados observados, o período de cura, a estabilização química, promovida pelo FEAE, e a estabilização granulométrica, devido à presença do RCCr na mistura, parecem ser os principais mecanismos de ganho de resistência das misturas investigadas. Entretanto, as equações obtidas demonstraram que a contribuição mais efetiva para o ganho de resistência foi da componente FEAE.

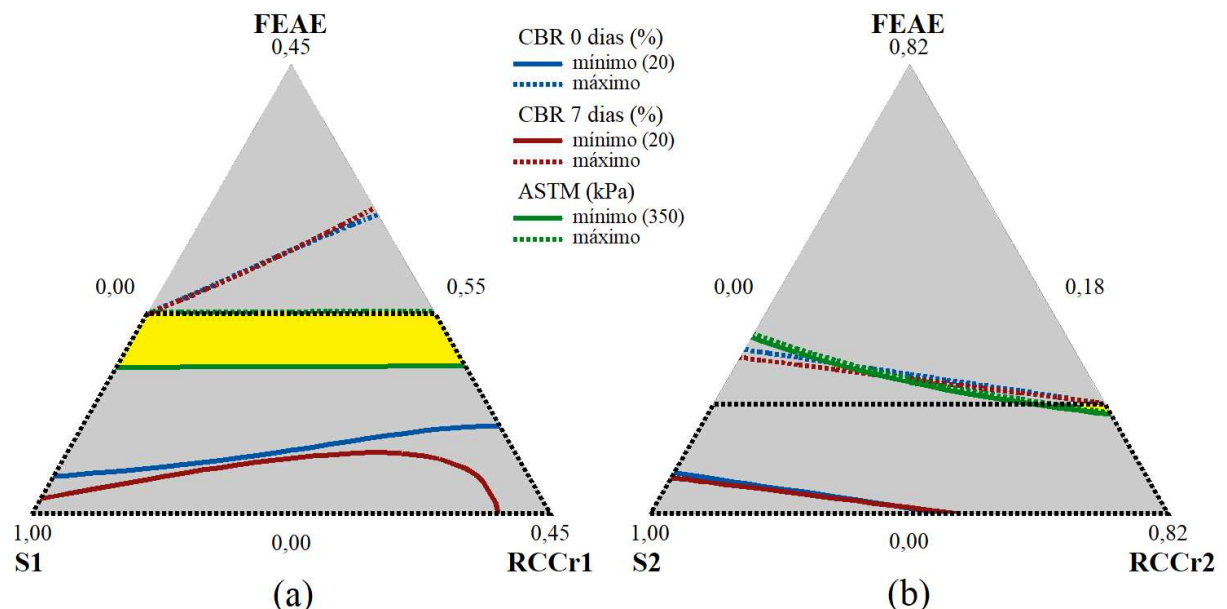
Segundo Brand et al. (2020), esse ganho de resistência sugere que os compostos CaO presentes no FEAE reagiram com as partículas de argilominerais presentes no solo e/ou que as partículas de FEAE estão estabilizando o solo fisicamente. Al-Amoudi et al. (2017) também constataram que o incremento do teor de escória de aciaria elétrica em solos argilosos resultou em propriedades mecânicas de RCS e CBR aprimoradas, devido à cimentação proporcionada pelo mineral wustite, gerando uma estrutura mais densa nos corpos de prova. Outros autores (GU et al., 2018; ISMAIL et al., 2018; MOZEJKO, FRANCISCA, 2020; SALIMI et al., 2020; PARSAEI et al., 2021) também observaram, em misturas solo-escória, a formação de

compostos cimentícios como o CH (hidróxido de cálcio [portlandita]), CSH (silicato de cálcio hidratado), CAH (aluminato de cálcio hidratado) e CASH (sílico-aluminato de cálcio hidratado [etringita]), o que conferiu às misturas maior resistência mecânica. Observaram, também, que o grau de floculação na estrutura da mistura aumentou, devido ao processo de troca catiônica entre os cátions presentes no FEAE e no solo. Portanto, e conforme será confirmada por análise microestrutural, essa contribuição mais significativa do FEAE no ganho de resistência das misturas é devida à formação de compostos cimentícios, formados durante a fase de cura selada em câmara úmida.

2.3.5 Otimização

Uma importante consideração a respeito das superfícies de resposta é a possibilidade de se utilizar processos de otimização para definir, a partir das propriedades de interesse, composições que atendam a critérios determinados. Com esse objetivo, um sistema de inequações, formado pelas equações de regressão (Tabelas 2.13, 2.14, 2.15 e 2.16) e pelas restrições impostas pelas normas técnicas ASTM D 4609 (ASTM, 2008) e DNIT 139-ES (DNIT, 2010b), conduziu a determinação das composições que atendem aos critérios para execução de camadas de pavimentos rodoviários. As restrições impostas para as misturas foram: (i) após 7 dias de cura, apresentar incremento mínimo de 345 kPa nos valores de RCS; (ii) CBR maior do que 20%. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.14.

Figura 2.14: Intersecção das superfícies de resposta das propriedades RCS e CBR das misturas S1-RCCr1-FEAE (a) e S2-RCCr2-FEAE (b), apresentando as regiões de composições que satisfazem às restrições impostas (região otimizada, em amarelo).



Na análise da região otimizada (em amarelo), pode-se observar que, para satisfazer às restrições impostas, as misturas S1-RCCr1-FEAE necessitam, apenas, de um mínimo de aproximadamente 15% de FEAE na sua composição; as misturas S2-RCCr2-FEAE convergiram para a composição da mistura M12 (com 20% de FEAE).

Segundo ORTEGA-LÓPEZ et al. (2014), o uso de finos de escória em solos granulares tem se mostrado mais eficaz do que em solos com maiores teores de argila. Decorre que a resistência da estrutura colóide/cimento é significativamente mais fraca do que a estrutura granular/cimento, sendo os solos mais arenosos os que se estabilizam com menores quantidades de cimento. Para o caso dos solos granulares, estes se estabilizam pela cimentação nos pontos de contato entre os grãos de maiores dimensões que os compõem (FIROOZI et al., 2017; SOUZA et al., 2020).

Pelo exposto e de acordo com os resultados obtidos, provavelmente as maiores relações S1/FEAE e RCCr2/FEAE tenham beneficiado os melhores resultados de RCS e índice CBR dessas misturas.

A partir da obtenção das regiões otimizadas, a função Desejabilidade foi empregada, para determinar a dosagem que maximiza as propriedades mecânicas RCS e índice CBR nas composições solo-resíduos estudadas. A função Desejabilidade irá determinar as melhores condições de ajuste, com base nas restrições impostas, tornando possível a maximização simultânea das múltiplas respostas. A Desejabilidade composta (D) é um índice global, calculado a partir de uma média geométrica dos índices das variáveis de resposta (Desejabilidade individual [d]). O valor de D, pertencente ao intervalo [0-1], é maximizado quando todas as respostas (d) se aproximam de suas especificações. Portanto, quanto mais próximo de 1 estiver D, mais próximas as respostas originais estarão dos seus respectivos limites máximos.

A função Desejabilidade indicou como composições otimizadas as misturas M1 e M12. A Tabela 2.16 apresenta, para as misturas otimizadas, os valores de Desejabilidade individual e composta obtidos para as propriedades mecânicas de interesse.

Tabela 2.16: Desejabilidade individual e composta.

Propriedade mecânica maximizada	Desejabilidade individual		Valores obtidos	
	M1	M12	M1	M12
Incremento de RCS (kPa)	0,75	0,81	486	345
CBR ao 0 dia (%)	1,00	0,74	76	70
CBR aos 7 dias (%)	1,00	0,70	103	92
Desejabilidade composta	0,91	0,77	-	-

Fonte: Resultado da pesquisa.

Analisando-se os resultados da Tabela 2.17, é possível observar que o valor de D é maximizado, quando todas as respostas se aproximaram de suas especificações. Os valores da Desejabilidade composto e individual demonstraram que o processo foi bem otimizado, pois esses índices se encontram muito próximos à condição ótima (1,0). É possível constatar, para os valores obtidos, que: (i) o incremento de RCS para M1 (486 kPa) e M12 (345 kPa) atende o mínimo exigido pela especificação da ASTM D 4609 (ASTM, 2008); (ii) o valor do índice CBR para M1 e M12, no período de cura 0 dia, é superior ao mínimo (20%) exigido pelo DNIT para uso em camadas de sub-base de pavimentos; (iii) o valor do índice CBR para M1 e M12, no período de cura 7 dias, é superior ao mínimo (80%) exigido pelo DNIT para uso em camadas de base de pavimentos; (iv) a mistura M1 apresentou os melhores resultados.

2.3.6 Caracterização das misturas otimizadas

Com objetivo de investigar a ocorrência de reações pozolânicas de médio prazo, as misturas otimizadas M1 e M12 foram submetidas aos ensaios de RCS e CBR, após período de cura selada de 28 dias. Suas características físicas, mineralógicas e microestruturais também foram determinadas.

A Tabela 2.17 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física para as misturas M1 e M12.

Tabela 2.17: Caracterização física das misturas M1 e M12.

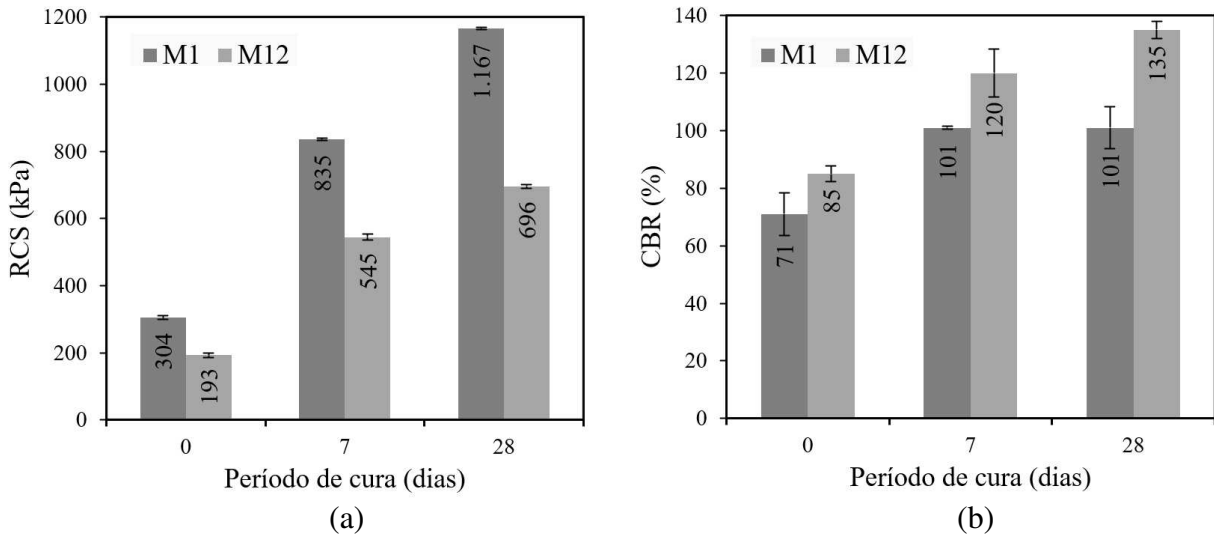
Parâmetros	Mistura	
	M1	M12
% argila ($\emptyset \leq 0,002$ mm)	11	13
% silte ($0,002 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 0,06$ mm)	27	21
% areia fina ($0,06 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 0,2$ mm)	15	10
% areia média ($0,2 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 0,6$ mm)	16	10
% areia grossa ($0,6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 2,0$ mm)	22	9
% pedregulho ($\emptyset \geq 2,0$ mm)	9	37
D10 (mm)	0,001	0,001
D30 (mm)	0,021	0,030
D60 (mm)	0,310	1,100
Classificação TRB	A-2-6	A-1-b
Classificação USC	SW-SC	SW-SC
Classificação MCT	LA'	NA'

Fonte: Resultado da pesquisa.

Para os dados apresentados, observa-se que: (i) a incorporação do RCCr2 ao S2 reduziu a proporção de finos e cresceu a fração areia do material, resultando em uma mistura com melhor distribuição granulométrica; (ii) as curvas granulométricas das misturas são mais contínuas, de modo que os grãos finos preenchem os espaços vazios existentes entre os grãos grossos, estabilizando o solo; (iii) o alto teor de RCCr2 (62%) na M12 reduziu em 78% o índice de plasticidade do S2, mudando o solo de alta para baixa plasticidade; (iv) pela classificação TRB (AASHTO, 2021), espera-se para materiais A-4(1) (M1) e A-2-4(0) (M12), os comportamentos de ruim e excelente, respectivamente, como subleito de estradas; (v) solos LA' (M1) e NA' (M12) tendem a apresentar bom comportamento mecânico, quando adequadamente compactados, podendo servir para compor camada de base de pavimentos (NOGAMI, VILLIBOR, 1995). Conforme o DER-PR (2005b), solos classificados como LA' e NA' são bons materiais para utilização em revestimento primário de vias não pavimentadas.

A Figura 2.15 apresenta os resultados dos ensaios de RCS e CBR das misturas M1 e M12, compactadas na energia do Proctor normal, para os tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.

Figura 2.15: Valores médios de RCS e CBR das misturas M1 e M12, compactadas na energia do Proctor normal, nas curas 0, 7 e 28 dias.



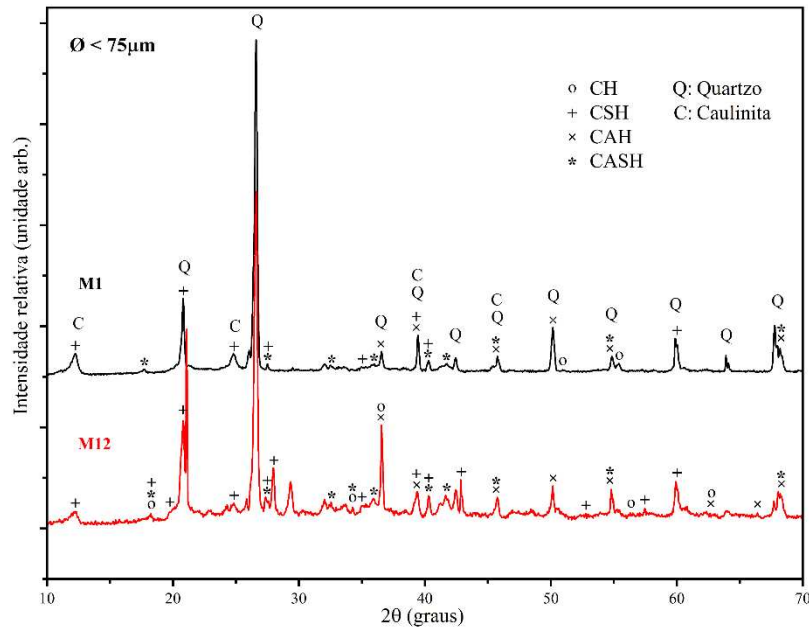
Fonte: Resultado da pesquisa.

Os resultados indicaram que os maiores ganhos de RCS e CBR ocorreram nos primeiros 7 dias de cura, com a mistura M1, obtendo os melhores resultados no ensaio de RCS, e a mistura M12, os melhores resultados no ensaio de índice CBR. Comparativamente à cura de 0 dia, os ganhos médios de RCS para M1 e M12 após os períodos de cura foram de 229% e 222%, respectivamente. Para o ensaio de CBR, o processo de cura gerou, em média, um ganho de 42%, para M1, e 50%, para M12. Conforme Salimi et al. (2020), as reações de ganho de resistência para misturas solo-escória requerem um tempo maior. Um dos catalisadores dessa reação são os compostos cimentantes, resultantes da hidratação da escória, o que justifica os ganhos de resistência observados, após os períodos de cura, nas misturas investigadas.

Para aplicação como base de pavimentos, apenas a mistura M1 ao 0 dia não atingiu o valor mínimo de 80% de CBR determinado pela norma DNIT 141-ES (DNIT, 2010a). Entretanto, todos os valores atenderam ao CBR mínimo de 60% e Expansão máxima de 0,5% exigidos para compor camada de base de estradas de baixo volume de tráfego ($N \leq 5 \times 10^6$).

Uma análise mineralógica por DRX foi realizada em amostras de M1 e M12 reduzidas a frações com diâmetros inferiores a 75 μm . Os difratogramas são apresentados na Figura 2.16.

Figura 2.16: Difratoogramas de M1 e M12 após período de cura selada de 28 dias.

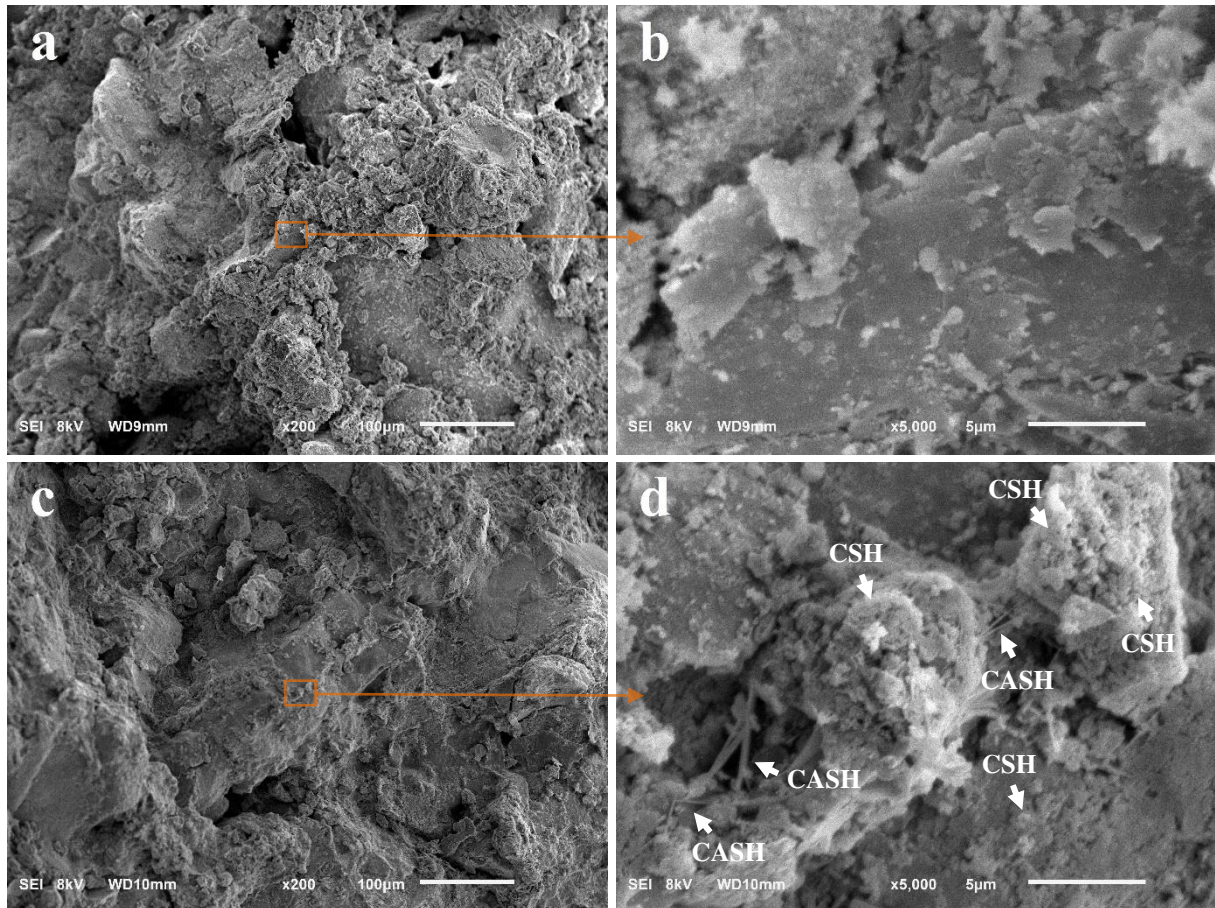


Fonte: Resultado da pesquisa.

A partir da análise dos padrões de DRX (Figura 2.16), identificou-se, nas misturas M1 e M12, a formação de picos de cristalinidade de hidróxido de cálcio (CH), silicato de cálcio hidratado (CSH), aluminato de cálcio hidratados (CAH) e sílico-aluminato de cálcio hidratado (CASH). Esses compostos conferem às misturas uma estrutura mais densa e com maior resistência mecânica, como já comprovado nos resultados de ganho de RCS e índice CBR após os períodos de cura. O CSH e o CAH são conhecidos produtos resultantes das reações primárias de hidratação do cimento Portland, sendo um dos principais responsáveis pelo ganho de resistência em misturas solo-cimento (OLIVEIRA et al., 2019). O CASH (etringita), também gerado durante a fase de hidratação do cimento, é um mineral expansivo, que se desenvolve na presença de sulfato, cálcio e alumínio e em elevados valores de pH (REZENDE et al., 2017). A etringita é responsável por incrementos na resistência de solos tratados com estabilizantes hidráulicos e por ocupar vazios à medida que se expande (OLIVEIRA et al., 2019; PARSAEI et al., 2021). Esses compostos, aqui identificados, também foram observados em outros estudos envolvendo misturas solo-escória (ISMAIL et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019; MOZEJKO, FRANCISCA, 2020).

Com objetivo de avaliar os processos de estabilização das misturas solo-resíduos, uma análise microestrutural foi realizada pela técnica de MEV em amostras de M1 e M12 nos tempos de cura 0 e 28 dias. Nas Figuras 2.17 e 2.18, são apresentados os resultados obtidos.

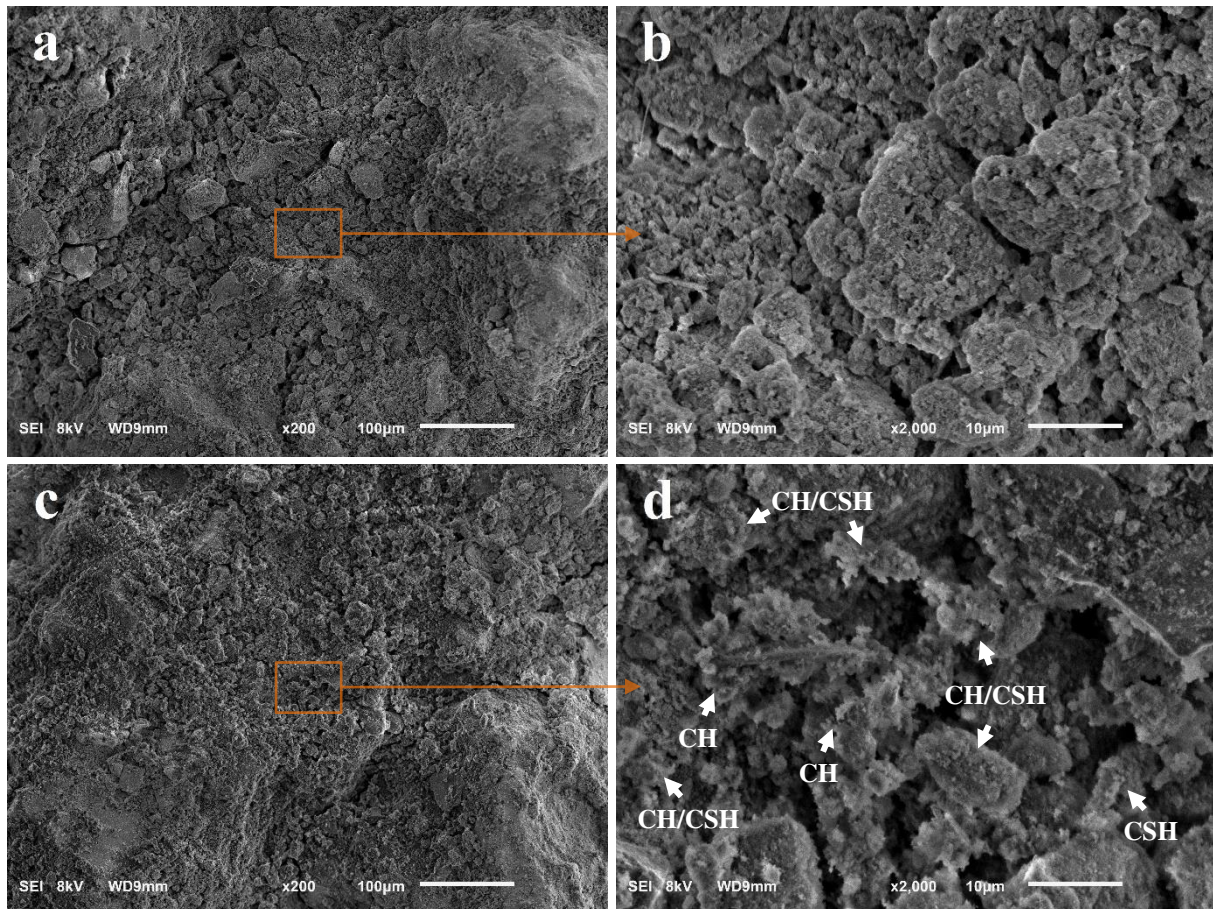
Figura 2.17: Fotomicrografias de M1 obtidas por MEV: (a) organização microestrutural de M1 ao 0 dia de cura; (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe de foliações de partículas lamelares dispersas; (c) organização microestrutural de M1 aos 28 dias de cura, exibindo uma distribuição de grãos mais coesa; (d) ampliação de “c”, com detalhe da formação dos compostos cimentantes de CSH e CASH.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Para M1, as Figuras 2.17b e 2.17d são ampliações de 5.000 vezes. As imagens indicam, após cura de 28 dias, a formação de compostos de CSH e CASH, corroborando os resultados já obtidos pelo ensaio de DRX.

Figura 2.18: Fotomicrografias de M12 obtidas por MEV: (a) organização microestrutural de M12 ao 0 dia de cura; (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe de partículas dispersas; (c) organização microestrutural de M12 aos 28 dias de cura, exibindo uma composição mais densa; (d) ampliação de “c”, com detalhe da formação dos compostos cimentantes de CH e CSH.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Para M12, as Figuras 2.18b e 2.18d são ampliações de 2.000 vezes. As imagens indicam, após cura de 28 dias, a formação de compostos CH e CSH, corroborando os resultados já obtidos pelo ensaio de DRX.

Esses compostos, observados nas Figuras 2.17d e 2.18d, provavelmente foram formados a partir da troca catiônica e atividade pozolânica resultante do CaO, presente em altas concentrações nos FEAF, e a sílica e óxido de alumínio presentes nos solos e RCCr. Verifica-se que os compostos cimentícios CH, CSH e CSAH estão recobrando a superfície das partículas de solo/RCCr, preenchendo os espaços intergranulares e aumentando o contato entre grãos, o que fortalece a floclulação/aglomeração entre as partículas.

Segundo Mozejko e Francisca (2020), quando a água é adicionada nas composições de solos e finos de escória, o processo de hidratação irá promover a formação dos compostos de CSH e CAH, e o excesso de hidróxido de cálcio (portlandita) será liberado. A formação de CSH e CAH ocorre nas fases iniciais, com formação de cristais algumas horas depois que a água é adicionada à composição solo-escória. Os cristais continuarão a se formar enquanto as partículas de escória que não reagiram e a água livre permanecerem na mistura (ISMAL et al., 2018). Portanto, os constituintes cimentícios presentes no FEAE, quando hidratados no processo de compactação, geram compostos cimentantes que aumentam a resistência da composição solo-RCCr-FEAE, como observado nos resultados de RCS e CBR das

composições S1-RCCr1-FEAE e S2-RCCr2-FEAE, com 10% e 20% de FEAE. Os resultados aqui obtidos corroboram os estudos de Gu et al. (2018), Smail et al. (2018), Oliveira et al. (2019), Mozejko e Francisca (2020), Brand et al. (2020), Salimi et al. (2020), Parsaei et al. (2021), Lopes et al. (2022, 2023), entre outros.

2.4 Conclusão

Nesta pesquisa foi avaliada a influência da incorporação de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil e finos de escória oxidante de aciaria elétrica em dois solos típicos da região da Zona da Mata Norte de Minas Gerais. Utilizando a metodologia de Planejamento de Experimentos na dosagem de misturas, foram analisadas composições dos componentes solo, RCCr e FEAE que permitam seu uso como camadas estruturais de pavimentos rodoviários. Com base nos resultados da pesquisa, pode-se concluir que:

- i. a utilização do delineamento de misturas pela metodologia de Planejamento de Experimentos mostrou-se adequada para o estudo de composições solo-resíduos, possibilitando a obtenção de modelos matemáticos ajustados e estatisticamente significativos, que descrevem o comportamento das variáveis dependentes RCS e índice CBR em função das variáveis explicativas solo, RCCr e FEAE;
- ii. comparativamente aos solos *in natura*, as adições de RCCr e FEAE contribuíram significativamente para o ganho de resistência mecânica das misturas estudadas;
- iii. o FEAE foi o principal agente no ganho de resistência com o incremento do tempo de cura. A adição de FEAE e o processo de hidratação levaram a uma notável reação de formação de produtos cimentícios. Os ensaios de DRX e MEV das misturas otimizadas, tratadas com 20% de FEAE, confirmaram a existência de produtos típicos de reações pozolânicas, como hidróxido de cálcio (CH), silicato de cálcio hidratado (CSH) e sílico-aluminato de cálcio hidratado (CASH);
- iv. as misturas com maiores relações solo/FEAE e RCCr/FEAE geraram os melhores resultados de RCS e índice CBR;
- v. os RCCr e FEAE apresentaram grande potencial para as misturas analisadas, considerando que a adição dos resíduos ao solo e o incremento do tempo de cura propiciou ganho de resistência mecânica e redução da Expansão CBR;
- vi. considerando os parâmetros CBR obtidos, uma gama de composições de S1-RCCr1-FEAE e S2-RCCr2-FEAE atenderam, nos tempos de cura 0, 7 e 28 dias, aos critérios do DNIT exigíveis para execução de camadas de base e/ou sub-base e/ou reforço de subleito de pavimentos rodoviários;
- vii. para as composições S1-RCCr1-FEAE, a mistura otimizada foi de 80% de solo arenoso, 0% de RCCr1 e 20% de FEAE. Para as composições S2-RCCr2-FEAE, a mistura otimizada foi de 18% de solo argiloso, 62% de RCCr2 e 20% de FEAE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRELA, F. et al. Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 58, p. 98–106, 2012.
- AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: a global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, 2018.
- 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**, v. 7, n. 1, 2017.
- ALANEME, G. U.; ATTAH, I. C.; ETIM, R. K.; DIMONYEKA, M. U. Mechanical properties optimization of soil-cement kiln dust mixture using extreme vertex design. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 15, p. 719–750, 2022.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS: **AASHTO M 145-91**. Standard specification for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. 2021, 10p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM D 2487-17e1**. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, Pensilvânia, 2017. 10p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM D 4609**. Evaluating effectiveness of chemicals for soil stabilization. ASTM International, Pensilvânia, 2008. 5p.
- ARIOĞLU AKAN, M. Ö.; DHAVALE, D. G.; SARKIS, J. Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain. **Journal of Cleaner Production**, 167, p. 1195–1207, 2017.
- ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M. M.; BO, M. W. Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 8, p. 1077–1088, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018**. São Paulo: ABRELPE, 2019. 64p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6502**: Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995. 18p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos. Rio de Janeiro, 2004a. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas de pavimentação – procedimentos. Rio de Janeiro, 2004b. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c. 21p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019. 3p.
- 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 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016b. 12p.
- 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 6508**: Solo – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016e. 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, 2016f. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7182**: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016g. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (n.º 200). Rio de Janeiro, 2012a. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012b. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12023**: Solo-cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012c. 11p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 27**: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001. 7p.
- 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 NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL – ANEPAC. **Revista areia e brita**. Edição n. 69, 2016. Disponível em < <https://www.anepac.org.br/publicacoes/revista-areia-e-brita/item/355-edicao-69-2016-out-nov-dez> >. Acesso em 20 set. 2017.

- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558p.
- BARROS, R. T. V. **Elementos de gestão de resíduos sólidos**. Belo Horizonte: Tessitura, 2012. 424p.
- BEGUN, R. A.; SIWAR, C.; PEREIRA, J. J.; JAAFAR, A. H. A. A benefit-cost analysis on the economic feasibility of construction waste minimization: the case of Malaysia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 48, p. 86–98, 2006.
- BEJA, I. A.; MOTTA, R.; BERNUCCI, L. B. Application of recycled aggregates from construction and demolition waste with Portland cement and hydrated lime as pavement subbase in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 258, 119520, 2020.
- BRAGA, A. M.; SILVESTRE, J. D.; BRITO, J. Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates, **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 529–543, 2017.
- BRANCA, T. A. et al. Reuse and Recycling of By-Products in the Steel Sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. **Metals**, v. 10, n. 3, p. 1–18, 2020.
- BRAND, A.S.; SINGHVI, P.; FANIJO, E.O.; TUTUMLUER, E. Stabilization of a clayey soil with ladle metallurgy furnace slag fines. **Materials**, v. 13, n. 19, 2020.
- BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Sumário Mineral 2017**. Brasília: ANM, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017. Acesso em: 12 fev. 2020.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília- DF, 2002.
- BRAVO, M.; DE BRITO, J.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 59–74, 2015.
- CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de experimentos usando o Statistica**. E-papers Serviços Editoriais: Rio de Janeiro, 2003. 261p.
- CARDOSO, R.; SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. **Waste Management**, v. 49, p. 131–145, 2016.
- CARASEK, H.; GIRARDI, A. C. C.; ARAÚJO, R. C.; ANGELIM, R.; CASCUDO, O. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, v. 64, n. 370, p. 288–300, 2018.
- CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética e competitividade. **BNDES Setorial**, v. 41, p. 181–236, 2016.
- CHOMICZ-KOWALSKA, A.; MACIEJEWSKI, K. Multivariate optimization of recycled road base cold mixtures with foamed bitumen. **Procedia Engineering**, v. 108, p. 436–444, 2015.
- CORNELL, J. A. **Experiments with mixtures: designs, models, and the analysis of mixture data**. John Wiley & Sons, 2011. 680p.

- COSTA, R. V. G. da; ATHAYDE JÚNIOR, G. B.; OLIVEIRA, M. M. Taxa de geração de resíduos da construção civil em edificações na cidade de João Pessoa. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 127–137, 2014.
- DARKO, A.; CHAN, A. P. C.; OWUSU-MANU, D.; AMEYAW, E. E. Drivers for implementing green building technologies: An international survey of experts. **Journal of Cleaner Production**, v. 145, p. 386–394, 2017.
- DELONGUI, L.; MATUELLA, M.; NÚÑEZ, W. P.; FEDRIGO, W.; SILVA FILHO, L. C. P. DA; CERATTI, J. A. P. Construction and demolition waste parameters for rational pavement design. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 105–112, 2018.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO – DER-SP. **ET-DE-P00/007**: Sub-base ou base de solo-brita-cimento. São Paulo, 2006. 28p.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ – DER-PR. **ES-P-14/05**: Pavimentação: solo-cal-cimento. Curitiba, 2005a. 14p.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ – DER-PR. **ES-T-07/05**: Terraplenagem: revestimento primário. Curitiba, 2005b. 9p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 180**: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro, 1994a. 11p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-PRO 003**: Coleta de amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994b. 4p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 258**: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV, Solos, Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994c. 14p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 256**: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão, Solos, Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994d. 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 202**: Solo-cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994e. 7p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 201**: Solo-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994f. 4p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-PRO 199**: Redução de amostras de campo de agregados para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 1996a. 5p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-CLA 259**: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996b. 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-PRO 120**: Procedimento – coleta de amostra de agregado. Rio de Janeiro, 1997. 5p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 035**: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998. 6p.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3ª. Ed. Rio de Janeiro, 2006. 274p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 141-ES**: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010a. 9p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 139-ES**: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010b. 8p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 172-ME**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016. 17p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 134/2018-ME**: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018a. 16p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 179/2018-IE**: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro, 2018b. 20p.
- DINIZ, D. H.; de CARVALHO, J. M. F.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n 9, 2017.
- DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.
- EMMANUEL, E. et al. Simplex Lattice Strength Optimization of Lime-micro Silica Stabilized Coir Fiber-reinforced Soil. **Journal of Natural Fibers**, p. 1–17, 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional 2019 – Relatório Síntese: ano base 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2019. 67p.
- EUROSTAT. **Waste statistics**. 2021. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Waste_treatment. Acesso em: 30 ago. 2021.
- FEDRIGO, W.; KLEINERT, T. R.; SCHREINERT, G. G.; CASTAÑEDA LÓPEZ, M. A.; NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P. Procedimento para dosagem de misturas de reciclagem profunda de pavimentos asfálticos com adição de cimento Portland. **Revista Pavimentação**, v. 46, p. 4–19, 2017.
- FEDRIGO, W.; NÚÑEZ, W. P.; CASTAÑEDA LÓPEZ, M. A.; KLEINERT, T. R.; CERATTI, J. A. P. A study on the resilient modulus of cement-treated mixtures of RAP and aggregates using indirect tensile, triaxial and flexural tests. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 161–169, 2018.
- FERREIRA, R. L. S.; ANJOS, M. A. S.; NÓBREGA, A. K. C.; PEREIRA, J. E. S.; LEDESMA, E. F. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, n. 208, p. 601–612, 2019a.
- FERREIRA, R. L. S. et al. Avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina (<150 µm) do agregado reciclado de RCD. **Cerâmica**, v. 65, n. 373, p. 139–146, 2019b.

- FIROOZI, A. A.; GUNEY OLGUN, C.; FIROOZI, A. A.; BAGHINI, M. S. Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 8, 2017.
- FREITAS, S. M. A. C. **Escória de Aciaria: caminhos para uma gestão sustentável**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2018.
- GHANBARI, M.; ABBASI, A. M.; RAVANSHADNIA, M. Production of natural and recycled aggregates: the environmental impacts of energy consumption and CO₂ emissions. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 2, p. 810–822, 2017.
- GILJUM, S.; DITTRICH, M.; LIEBER, M.; LUTTER, S. Global patterns of material flows and their socio-economic and environmental implications: A MFA study on all countries world-wide from 1980 to 2009. **Resources**, v. 3, n. 1, p. 319–339, 2014.
- GRABIEC, A. M.; KLAMA, J.; ZAWAL, D.; KRUPA, D. Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition. **Construction and Building Materials**, n. 34, p. 145–150, 2012.
- GU, X.; YU, B.; DONG, Q.; DENG, Y. Application of secondary steel slag in subgrade: Performance evaluation and enhancement. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 102–108, 2018.
- GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria básica**. 5^a ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 924p.
- HABERT, G. et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 11, p. 559–573, 2020.
- HANRAHAN, G.; LU, K. Application of Factorial and Response Surface Methodology in Modern Experimental Design and Optimization. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, v. 36, p. 141–151, 2006.
- HARDER, J. Slag recycling. Recovery: recycling technology worldwide, 2020. Disponível em: https://www.recovery-worldwide.com/©/artikel/slag-recycling_3528047.html. Acesso em: 22 out. 2020.
- HASANBEIGI, A. Infographic: the iron and steel industry's energy use and emissions. Global Efficiency Intelligence. 11 jul. 2017. Disponível em: <https://www.globalefficiencyintel.com/new-blog/2017/nfographic-steel-industry-energy-emissions>. Acesso em: 21 fev. 2020.
- HUANG, B.; WANG, X.; KUA, H.; GENG, Y.; BLEISCHWITZ, R.; REN, J. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 36–44, 2018.
- HOSSAIN, M. U.; WU, Z.; POON, C. S. Comparative environmental evaluation of construction waste management through different waste sorting systems in Hong Kong. **Waste Manag.**, v. 69, p. 325–335, 2017.
- INSTITUTO AÇO BRASIL – IABR. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2018. 84p. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 28 jun. 2019.

- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil: relatório de pesquisa**. Brasília: Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. IPEA, 2012. 42p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – **ISO 13320:2020**. Particle size analysis - Laser diffraction methods, the International Organization for Standardization, 2020. 59p.
- 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**, v. 37, p. 401–411, 2018.
- IWAŃSKI, M.; BUCZYŃSKI, P.; MAZUREK, G. Optimization of the road binder used in the base layer in the road construction. **Construction and Building Materials**, v. 125, p.1044–1054, 2016.
- JAMES O’CONNOR et al. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 419, 126478, 2021.
- JIAO, D.; SHI, C.; YUAN, Q.; AN, X.; LIU, Y. Mixture design of concrete using simplex centroid design method. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 76–88, 2018.
- JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; AGRELA, F.; LÓPEZ, M.; GALVÍN, A. P. Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 58, p. 88–97, 2012.
- JIMÉNEZ, J. R. Applications of recycled aggregates from construction and demolition waste: Recycled aggregates (Ras) for roads. In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V.; LABRINCHA, J.; DING, Y.; BRITO, J. **Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste**. p. 351-377, 2013.
- KAMBOLE, C.; PAIGE-GREEN, P.; KUPOLATI, W. K.; NDAMBUKI, J. M.; ADEBOJE, A. O. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in 73ntemper Africa. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 618–631, 2017.
- KAMPF, N.; MARQUES, J. J.; CURI, N. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. 1381p.
- KATZ, A.; BAUM, H. A novel methodology to estimate the evolution of construction waste in construction sites. **Waste Management**, v. 31, n. 2, p. 353–358, 2011.
- KLEINERT, T. R.; FEDRIGO, W.; CATEN, C. S. T.; NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P. Aplicação da metodologia de projeto de experimentos na dosagem de misturas de reciclagem de pavimentos com adição de cimento. **Transportes (RIO DE JANEIRO)**, v. 27, p. 111–127, 2019.
- LAFAYETTE, K. P. V.; PAZ, D. H. F; HOLANDA, M. J.; COSTA, L. A. R. C. Analysis of generation and characterization of construction and demolition waste on construction sites in the city of Recife, Brazil. **Revista Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, 2018.
- LEITE, F. da C.; MOTTA, R. dos S.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, n 6, p. 2972–2979, 2011.

- LI, J.; ZUO, J.; CAI, H.; ZILLANTE, G. Construction waste reduction behavior of contractor employees: © extended theory of planned behavior model approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1399–1408, 2018.
- LLATAS, C. A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. **Waste Management**, v. 31, n. 6, p. 1261–1276, 2011.
- LOCKREY, S.; NGUYEN, H.; CROSSIN, E.; VERGHESE, K. Recycling the construction and demolition waste in Vietnam: opportunities and challenges in practice. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 757–766, 2016.
- LOPES, E. C. et al. Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n.14, p. 5003-5014, 2022.
- LOPES, E. C. et al. Stabilisation of clayey and sandy soils with ladle furnace slag fines for road construction. **Road Materials and Pavement Design**, v. 24, n. 1, p. 247-266, 2023.
- LUKIANCHUKI, J. A. 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**, v. 39, p. 919–942, 2021.
- MAHPOUR, A. Prioritizing barriers to adopt circular economy in construction and demolition waste management. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 134, p. 216–227, 2018.
- MARTINEZ-ARGUELLES, G.; ACOSTA, M. P.; DUGARTE, M.; FUENTES, L. Life cycle assessment of natural and recycled concrete aggregate production for road pavements applications in the northern region of Colombia: case study. **Transportation Research Record**, v. 2673, n. 5, p. 397–406, 2019.
- MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, A. C. F. Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 1–25, 2004.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; BALESTRA, C. E.; LIMA, M. G. Applicability of recycled aggregates in concrete piles for soft soil improvement. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 1, p. 56–64, 2016.
- MÁLIA, M.; BRITO, J. de; BRAVO, M. Indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais novas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 117–130, 2011.
- MONTEIRO, N. B. R.; MOITA NETO, J. M.; SILVA, E. A. Bibliometric study of the crushed stone mining sector. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 39, n. 4, p. 235–249, 2018.
- MOREIRA, E. B.; BALDOVINO, J. J. A.; IZZO, R. L. S.; ROSE, J. L. Impact of sustainable granular materials on the behavior sedimentary silt for road application. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, n. 1, p. 917–933, 2020.
- MOZEJKO, C. A.; FRANCISCA, F. M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 239, 117901, 2020.
- MUJTABA, H.; AZIZ, T.; FAROOQ, K.; SIVAKUGAN, N.; DAS, B. M. Improvement in engineering properties of expansive soils using ground granulated blast furnace slag. **Journal of the Geological Society of India**, v. 92, p. 357–362, 2018.

- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995. 240p.
- NOVAES, C. G. et al. Otimização de métodos analíticos usando metodologia de superfícies de resposta – Parte I: Variáveis de Processo. **Revista Virtual Química**, v. 9, n. 3, p. 1184–1215, 2017.
- NUNES, K. R. A.; MAHLER, C. F. Comparison of construction and demolition waste management between Brazil, European Union and USA. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 4, p. 415–422, 2020.
- OBERLE, B. et al. **Panorama de los Recursos Globales 2019: Recursos naturales para el futuro que queremos**. Un informe del Panel Internacional de Recursos. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Nairobi, Kenia, 2019. 35p.
- OLIVEIRA JÚNIOR, A. A; PIMENTEL, M. G.; PICANÇO, M. S. Propriedades mecânicas e análise microestrutural de um concreto produzido com agregado da região Amazônica brasileira. **Revista Matéria**, v.00, n.0, 2019.
- OLIVEIRA, C. F.; PIRES, P. J. M.; TEIXEIRA, J. E. S. L. Physical, mechanical, and microstructure investigation of tropical clayey soils stabilised with desulfurisation slag for pavement application. **Road Materials and Pavement Design**, v. 22, n. 6, p. 1442–1453, 2019.
- ORLANDINI, S.; GOTTI, R.; FURLANETTO, S. Multivariate optimization of capillary electrophoresis methods: A critical review. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, v. 87, p. 290–307, 2014.
- ORTEGA-LÓPEZ, V.; MANSO, J. M.; CUESTA, I. I.; GONZÁLEZ, J. J. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 455–464, 2014.
- OSMANI, M.; GLASS, J.; PRICE, A. D. F. Architects' perspectives on construction waste reduction by design. **Waste Management**, v. 28, n. 7, p. 1147–1158, 2008.
- OUDA, O. K. M.; PETERSON, H. P.; REHAN, M.; SADEF, Y.; ALGHAZO, J. M.; A. S. NIZAMI. A Case Study of Sustainable Construction Waste Management in Saudi Arabia. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, n. 12, p. 2541–2555, 2017.
- PARSAEI, M.; VAKILI, A. H.; SALIMI, M.; FARHADI, M. S.; FALAMAKI, A. 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**, v. 80, n. 8, p. 6303–6320, 2021.
- PÉREZ, P.; AGRELA, F.; HERRADOR, R.; ORDOÑEZ, J. Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 593–599, 2013.
- PICKIN, D. J.; RANDELL, P. **Australian National Waste Report 2016**. Department of the Environment and Energy, 2017. 74p.
- PIRES, P. M.; SUDO LUTIF TEIXEIRA, J. E.; NEPOMUCENO, D. V.; FURIERI, E. C. Laboratory and field evaluation of KR slag-stabilized soil for paving applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 9, 04019182, 2019.
- PITANGA, H. N.; SILVA, T. O.; SANTOS, A. L.; SILVA, A. C. B.; LIMA, D. C. MCT classification for compacted mixtures of soil-steel slag-fly ash for application in forest roads. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 40, n. 5, p. 911–919, 2016.

- POH, H. Y.; GHATAORA, G. S.; GHAZIREH, N. Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, n. 2, p. 229–240, 2006.
- PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Decreto municipal n.º 48.075, de 28 de dezembro de 2006**. Disponível em: <https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/decreto-48075-de-28-de-dezembro-de-2006>. Acesso em: 15 de out. 2017.
- PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **PMS/SP ETS-001**: camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil. São Paulo, 2003. 14p.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE BAURU – ESTADO DE SÃO PAULO. **Índice do Decreto n.º 11.689, de 21 de outubro de 2011**. 32p.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO GONÇALO. Atos Oficiais, em 21 de julho de 2017. **Lei n.º 714/2017**. 7p.
- RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 1, p. 71–81, 2007.
- REIS, J. H. C.; SOARES SILVA, S.; ILDEFONSO, J. S.; YSHIBA, J. K. Evaluation of Soil, Cement and Construction and Demolition Waste (CDW) Mixtures for Use in Road Pavement Base and Sub-Base Applications. **Key Engineering Materials**, v. 634, p. 247–255, 2014.
- REZENDE, L. R. et al. Laboratory Study of Phosphogypsum, Stabilizers, and Tropical Soil Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 1, 2017.
- RODRIGUES, M. H. R. et al. The simplex-lattice method application to optimize the design of soil-slag-fly ash mixtures. In: LI J. et al. **Characterization of minerals, metals, and materials 2021**. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham., 2021. 626p.
- RÖHM, D. G.; MARQUES NETO, J. C.; RÖHM, S. A. Gestão dos Resíduos da Construção Civil (RCC) em Canteiros de Obras de Empresas Construtoras da Cidade de São Carlos-SP, Brasil. **Engenharia Civil**, n. 45, p. 21–36, 2013.
- ROSSI, E.; SALES, A. Carbon footprint of coarse aggregate in Brazilian construction. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 333–339, 2014.
- SÁEZ, P. V.; MERINO, M. D. R.; AMORES, C. P.; GONZÁLEZ, A. S. A. Assessing the accumulation of construction waste generation during residential building construction works. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 93, p. 67–74, 2014.
- SALIMI, M.; ILKHANI, M.; VAKILI, A. H. Stabilization treatment of Na-montmorillonite with binary mixtures of lime and steelmaking slag, **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 14, n. 3, p. 295–301, 2020.
- SANTOS, E. C. G.; PALMEIRA, E. M.; BATHURST, R. J. Behaviour of a geogrid reinforced wall built with recycled construction and demolition waste backfill on a collapsible foundation. **Geotextiles and Geomembranes**, n. 39, p. 9–19, 2013.
- SANTOS, E. C. G.; PALMEIRA, E. M.; BATHURST, R. J. Performance of two geosynthetic reinforced walls with recycled construction waste backfill and constructed on collapsible ground. **Geosynthetics International**, v. 21, n. 4, p. 256–269, 2014.

- SHARKAWI, A. M.; EL MOFTY, S. E.-D. M.; SHOWAIB, E. A.; ABBASS, S. M. Feasible Construction Applications for Different Sizes of Recycled Construction Demolition Wastes. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 4, p. 3351–3366, December 2018.
- SILVA, T. O.; PITANGA, H. N.; SANTOS, A. L. D.; LIMA, D. C.; SILVA, A. C. B. Use of steel waste for the application in urban paving. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 41, n. 1, e37596, 2019.
- SNELLINGS, R., et al. RILEM TC-238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages. **Materials and Structures**, v. 6, n. 51, 2018.
- SOLÍS-GUZMÁN, J.; MARRERO, M.; MONTES-DELGADO, M. V.; RAMÍREZ-DE-ARELLANO, A. A Spanish Model For Quantification and Management of Construction Waste. **Waste Management**, v. 29, n. 9, p. 2542–2548, 2009.
- SOUZA, J. M.; RUDNICK, R. C.; LUKIANTCHUKI, J. A. Evaluation of the incorporation of construction waste (CW) for the stabilization of soil-cement mixtures. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 261–280, 2020.
- TAM, V. W. Y.; WANG, K.; TAM, C. M. Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 2, p. 703–714, April 2008.
- TANGTINTHAI, N.; HEIDRICH, O.; MANNING, D. A. C. Role of policy in managing mined resources for construction in Europe and emerging economies. **Journal of Environmental Management**, v. 236, p. 613–621, 2019.
- TOJO, N.; FISCHER, C. **Europe as a Recycling Society**. European Recycling Policies in relation to the actual recycling achieved. ETC/SCP working paper 2/2011, mar. 2011. Disponível em: http://waste-prevention.gr/waste/wp-content/uploads/2015/10/2011_Europe%20as%20a%20Recycling%20Society_EN.pdf. Acesso em: 25 dez. 2019.
- TOWNSEND, T. G.; INGWERSEN, W. W.; NIBLICK, B.; JAIN, P.; WALLY, J. CDDPath: A method for quantifying the loss and recovery of construction and demolition debris in the United States. **Waste Management**, v. 84, p. 302–309, February 2019.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Advancing sustainable materials management: 2014 Fact Sheet**. Office of Land and Emergency Management (5306P). Washington, DC. 2016. 22p.
- VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 103, p. 192–204, 2015.
- VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M.; LOPES, M. L. Recycled Construction and Demolition Wastes as filling material for geosynthetic reinforced structures. Interface properties. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 299–311, 2016.
- YILMAZ, M.; BAKIŞ, A. Sustainability in Construction Sector. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v. 195, p. 2253–2262, 2015.
- YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Subgrade stabilisation mixtures with EAF steel slag: an experimental study followed by field implementation. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 6, p. 1754–1767, 2022.

- YUAN, D.; NAZARIAN, S.; HOYOS, L. R.; PUPPALA, A. J. Evaluation and mix design of cement-treated base materials with high content of reclaimed asphalt pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2212, n. 1, p. 110–119, 2011.
- YÜKSEL, İ. A review of steel slag usage in construction industry for sustainable development. **Environment, Development and Sustainability**, v. 19, n. 2, p. 369–384, 2016.
- ZHAO, W.; REN, H.; ROTTER, V. S. A system dynamics model for evaluating the alternative of type in construction and demolition waste recycling center – the case of Chongqing, China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 11, p. 933–944, 2011.
- ZHENG, L. et al. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 405–413, 2017.

CAPÍTULO 3

ESTUDO DA RESPOSTA MECÂNICA DE DOIS SOLOS TROPICAIS MELHORADOS COM FINOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.

Resumo

O crescente consumo de recursos naturais e os elevados volumes de resíduos industriais alertam sobre a importância do reuso de materiais. Entre os muitos subprodutos industriais reaproveitáveis, o uso de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (RCCr) e finos de escória vem sendo adotado como uma maneira de reduzir os impactos ocasionados pela geração e disposição inadequada desses resíduos em todo o mundo. Este trabalho avaliou a utilização de RCCr e finos de escória oxidante de aciaria elétrica (FEAE) como agentes estabilizantes de dois solos tropicais. O método de planejamento de experimentos aliado à técnica de superfícies de resposta foi utilizado para obtenção dos teores ideais dos componentes que maximizam as propriedades geotécnicas das misturas solo-resíduos investigadas. Ensaios de caracterização física, química, mineralógica e morfológica dos materiais e das misturas otimizadas foram realizados. Os solos naturais e as misturas otimizadas foram avaliados por ensaios de resistência à compressão simples (RCS), CBR (*California Bearing Ratio*) e módulo de resiliência (MR) nas energias de compactação do Proctor normal e intermediária, nos tempos de cura 0, 7 e 28 dias. Os resultados obtidos comprovam que as composições solo-resíduos e o incremento do período de cura proporcionam redução da expansão e ganhos consideráveis de RCS, CBR e MR em relação aos solos em seu estado natural. A incorporação dos resíduos aos solos A-2-7 (1) e A-7-5 (13) proporcionou valores da ordem de 304–877 kPa e 193–557 kPa para RCS, 71–202% e 85–212% para CBR e 365–492 MPa e 330–427 MPa para MR, respectivamente. Os ganhos observados nas propriedades mecânicas foram atribuídos aos efeitos da correção granulométrica proporcionada pelo RCCr e pelas reações cimentícias promovidas pelos FEAE, melhorando o desempenho dos solos e permitindo seu uso para execução de camadas de base, sub-base e reforço de subleito de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave: Melhoramento geotécnico de solos. Resíduo de construção civil. Finos de escória. Módulo de resiliência. Planejamento de experimentos.

3.1 Introdução

Em projetos de engenharia geotécnica, é fundamental a realização do estudo do solo onde se pretende realizar o empreendimento. Esta etapa precede o projeto estrutural, pois o solo que servirá de fundação pode não apresentar as características requeridas para a obra a ser executada. Entre os problemas comumente encontrados, pode-se citar o fato do solo ser pouco resistente, muito compressível ou colapsível, quando submetido a certas condições de tensões atuantes. Como solução, pode-se aceitar o material original e ajustar o projeto às restrições por ele impostas, substituí-lo por material mais competente ou tentar melhorar as propriedades de engenharia desse solo, lançando mão de técnicas de estabilização (FIROOZI et al., 2017; MUJTABA et al., 2018; AMHADI, ASSAF, 2019).

Estabilizar um solo significa realizar modificações controladas da sua textura, estrutura e/ou propriedades físico-mecânicas, alterando seu comportamento com a finalidade de melhorar suas propriedades, tais como resistência mecânica, permeabilidade, compressibilidade, estabilidade e durabilidade, permitindo o seu emprego em obras de engenharia (HALL et al., 2012; BEHNOOD, 2018). Na prática da engenharia geotécnica, a estabilização de solos é tradicionalmente realizada por técnicas de compactação (estabilização mecânica), misturas solo-agregado (estabilização granulométrica) ou com uso de um aglomerante hidráulico (estabilização química). Na estabilização mecânica, a resistência do solo é melhorada pelo aumento da sua densidade, via processo de compactação. A estabilização granulométrica consiste em realizar correções da granulometria do solo, com adição ou subtração das frações constituintes do solo natural, seguida de compactação mecânica. A estabilização química é realizada pela adição de materiais cimentícios ou pozolânicos para melhorar as propriedades do solo (HALL et al., 2012; AMHADI, ASSAF, 2019; IKEAGWUANI, NWONU, 2019). Os aditivos típicos são cal, cimento Portland e asfalto betuminoso (HALL et al., 2012; FIROOZI et al., 2017).

A estabilização de solos é amplamente utilizada em muitas aplicações de obras de terra, como blocos de construção, camadas de pavimentos, barragens, fundações, pontes, aterros, muros de contenção, entre outras (HALL et al., 2012; FIROOZI et al., 2017; BEHNOOD, 2018). Na construção de camadas de pavimentos, em particular, oferece vários benefícios, como aumentos na resistência ao cisalhamento e à compressão, estabilidade volumétrica, reduções no índice de plasticidade, redução de deformações, aumentos no módulo de resiliência e melhorias na resistência a condições ambientais adversas, como ciclos de gelo-degelo, erosão e intempéries (BEHNOOD, 2018).

Em oposição aos materiais tradicionalmente utilizados, estudos recentes têm avaliado o uso de resíduos industriais na estabilização de solos (YOOBANPOT et al., 2020; VIJAYAN, PARTHIBAN, 2020; NOOLU et al., 2021; IKECHUKWU et al., 2021; IBRAHIM et al., 2021; PARIHAR, GUPTA, 2021; ALANEME et al., 2022). Uma vez que são uma solução promissora, mais sustentável e ecologicamente correta, o uso de resíduos tem ganho destaque, quer seja pelas suas vantagens econômicas, sociais, ambientais ou tecnológicas. Entre os vários subprodutos industriais reaproveitáveis, estudos científicos têm demonstrado a viabilidade do uso de resíduos de construção civil e finos de escória em camadas de pavimentos rodoviários (LEITE et al., 2011; JIMÉNEZ et al., 2012; JIMÉNEZ, 2013; ARULRAJAH et al., 2013; ORTEGA-LÓPEZ et al., 2014; REIS et al., 2014; VIEIRA, PEREIRA, 2015; CARDOSO et al., 2016; PITANGA et al., 2016; DELONGUI et al., 2018; ISMAIL et al., 2018; MUJTABA et al., 2018; SILVA et al., 2019; PIRES et al., 2019; BEJA et al., 2020; EMMANUEL et al., 2020; MOREIRA et al., 2020; ZHAO et al., 2021; LUKIANTCHUKI et al., 2021; PARSAEI et al., 2021; YILDIRIM, PREZZI, 2022; LOPES et al., 2022, 2023).

Os resíduos de construção civil são definidos como os provenientes das operações de construção, reformas, reparos, ampliação, alteração, manutenção, demolição de obras de construção civil e outras infraestruturas ou os resultantes da preparação e da escavação de terrenos. São compostos por materiais como tijolos, telhas, blocos cerâmicos, concreto, solos, rochas, metais, resinas, madeiras, argamassa, gesso, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, entre outros. São normalmente designados por resíduos de construção e demolição, entulhos de obras, calça ou metralha (COMMISSION DECISION 2000/532/EC, 2000; BRASIL, 2002). Portanto, esses resíduos consistem em tipos distintos de materiais, sendo um resíduo heterogêneo que pode conter qualquer material que faça parte de uma edificação ou infraestrutura, bem como quaisquer outros materiais utilizados durante as obras (VIEIRA, PEREIRA, 2015).

Segundo estimativas, mais de 3 bilhões de toneladas de resíduos de construção civil são gerados anualmente em todo o mundo, sendo China, Índia e Estados Unidos (EUA) os maiores produtores (AKHTAR, SARMAH, 2018). No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), os RCC coletados pelos municípios registraram aumento quantitativo considerável na última década, passando de 33 milhões de toneladas, em 2010, para 44,5 milhões, em 2019. Com isso, a quantidade coletada *per capita* cresceu de 174,3 kg para 213,5 kg por habitante, por ano (ABRELPE, 2020).

Um outro tipo de resíduo que merece destaque é a escória, um subproduto complexo produzido pela indústria siderúrgica. É gerada durante a etapa de adição de materiais de fluxo para extração de impurezas das cargas durante o processo de fabricação e refino do aço. As indústrias siderúrgicas produzem quatro tipos principais de escória, denominadas de acordo com os processos a partir dos quais são produzidas: *blast furnace* (BF), *basic oxygen furnace* (BOF), *electric arc furnace* (EAF) e *ladle furnace* (LF), onde a escória produzida irá depender do tipo de aço fabricado (YILDIRIM, PREZZI, 2011; JAMES O'CONNOR et al., 2021).

Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), no ano de 2017, a quantidade de aço bruto produzida no mundo foi de 1,67 bilhão de toneladas, totalizando 2,8% a mais comparativamente ao ano anterior, sendo os países asiáticos (China, Japão, Índia e Coreia do Sul) responsáveis por 66,2% da produção. No Brasil, no mesmo período, essa produção foi de 34,4 milhões de toneladas de aço bruto, o que lhe garantiu a posição de nono maior produtor mundial (2,1%) e maior produtor da América Latina (53,5%) (BRASIL, 2019). Estimativas apontam que, no mundo, para cada tonelada de aço bruto produzida, são gerados, em média, 180 a 360 kg de escória/agregado siderúrgico (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2020). No Brasil, em 2017, segundo dados do Instituto Aço Brasil (2018), para cada tonelada de aço produzida, foram gerados 607 kg de resíduos e coprodutos diretos.

Com o intuito de contribuir no reaproveitamento de resíduos da indústria da construção civil e do aço, esta pesquisa avaliou o comportamento mecânico e microestrutural de dois solos tropicais estabilizados com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (RCCr) e finos de escória oxidante de aciaria elétrica (FEAE) para aplicação em camadas de pavimentos. O diferencial deste trabalho, em relação às pesquisas já desenvolvidas, consiste na adoção da técnica de Planejamento de Experimentos (*Design of Experiment* [DOE]) aliado a Metodologia de Superfícies de Resposta na avaliação da dosagem das misturas. Esses resultados, estatisticamente válidos, são mais robustos comparativamente às técnicas empíricas consagradas utilizadas. Ressalta-se que, apesar de existir uma ampla variedade de pesquisas que têm como objetivo analisar o desenvolvimento de tecnologias de reaproveitamento dos RCCr e FEAE e sua reinserção no ciclo produtivo, ainda há uma lacuna na literatura de trabalhos que utilizam a técnica proposta e o uso concomitante desses resíduos na estabilização de solos. Assim, os objetivos deste trabalho foram: (i) compor misturas solo-resíduos por técnica de DOE e avaliar, na energia do Proctor normal, as respostas mecânicas resistência à compressão simples (RCS) e CBR (*California Bearing Ratio*) por meio da

Metodologia de Superfícies de Resposta nos tempos de cura 0 e 7 dias; (ii) avaliar as misturas otimizadas, na energia do Proctor normal e intermediária, nos tempos de cura 0, 7 e/ou 28 dias, via ensaios de RCS, CBR e módulo de resiliência (MR); (iii) investigar a influência dos resíduos nas propriedades mecânicas e microestruturais dos solos.

3.1.1 Planejamento experimental de misturas

Experimentos com misturas são aqueles nos quais dois ou mais componentes (fatores) são misturados, em várias combinações de diferentes teores, e propriedades de interesse (respostas), resultantes da interação destes componentes, são medidas. Assume-se que as respostas são função somente dos teores dos componentes na mistura, e não de suas concentrações (NOVAES et al., 2017). Assim, os teores de cada componente na mistura devem ser tratados como uma variável do sistema, que não é independente das demais, pois o somatório destes teores não deve exceder a 1 (ou a unidade) (CALADO, MONTGOMERY, 2003; CORNELL, 2011). Tal condição causa uma interdependência entre os componentes da mistura. A Equação 1 demonstra essa condição.

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1 \quad (1)$$

onde: x_i é o componente da mistura; q é o número de componentes.

Em experimentos de misturas o objetivo principal é, a partir de uma abordagem estatística, descrever, dentro dos limites experimentais e com número reduzido de ensaios, como os fatores influenciam a resposta (ORLANDINI et al., 2014; MYERS et al., 2016). Essas respostas (propriedades) são, então, avaliadas e, quando satisfatórias, permitem inferir quais teores dos componentes na mistura atendem à condição de interesse. Para que se possa prever qual mistura causa um determinado posicionamento da resposta, são criadas, a partir de modelos polinomiais estimados, superfícies de respostas (MYERS et al., 2016; NOVAES et al., 2017). A Metodologia de Superfícies de Resposta consiste em um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas que se baseiam no ajuste de modelos empíricos aos dados experimentais obtidos em relação ao delineamento experimental. Com este objetivo, funções polinomiais lineares ou quadrática são empregadas para descrever o sistema estudado e, assim, explorar condições experimentais até sua otimização (CANDIOTI et al., 2014; ORLANDINI et al., 2014; MYERS et al., 2016). São muito úteis em quantificar e interpretar as relações entre as respostas e os fatores.

Tradicionalmente, em prospecção de novos materiais para a área de pavimentação, estudos envolvendo dosagens de misturas são realizados, analisando um fator por vez (DNER, 1994a; DER-PR, 2005a; DER-SP, 2006; YUAN et al., 2011; REIS et al., 2014; PITANGA et al., 2016; REZENDE et al., 2017; FEDRIGO et al., 2018; SILVA et al., 2019; SOUZA et al., 2020; LUKIANTCHUKI et al., 2021). Nestes estudos, um dos fatores é alterado dentro de um intervalo apropriado (ou níveis), enquanto os outros são mantidos constantes. Além de demandar um grande número de experimentos, essa abordagem não permite avaliar a existência de interação entre os fatores, o que pode levar a uma condução inadequada do desenvolvimento e otimização (BEZERRA et al., 2008; CANDIOTI et al., 2014). Para superar essas limitações, o DOE pode fornecer melhores resultados com poucos experimentos, permitindo uma melhor compreensão da relação entre os níveis dos fatores sob investigação e suas correlações com as respostas de interesse (BEZERRA et al., 2008; CANDIOTI et al., 2014; FUKUDA et al., 2018; ALANEME et al., 2022).

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Coleta e preparação dos materiais

Na execução do estudo, foram utilizados dois solos tropicais típicos da Zona da Mata Mineira, região do Estado de Minas Gerais, Brasil. O primeiro, um solo arenoso (S1) residual jovem de gnaiss, foi coletado no horizonte C de um talude de corte na zona rural do Município de Cajuri-MG. Ele é procedente da jazida de empréstimo denominada “Nô da Silva”. O segundo, um solo argiloso (S2) residual maduro de gnaiss, foi coletado na zona rural do Município de Viçosa-MG, às margens da BR-120, no horizonte B de um talude de corte.

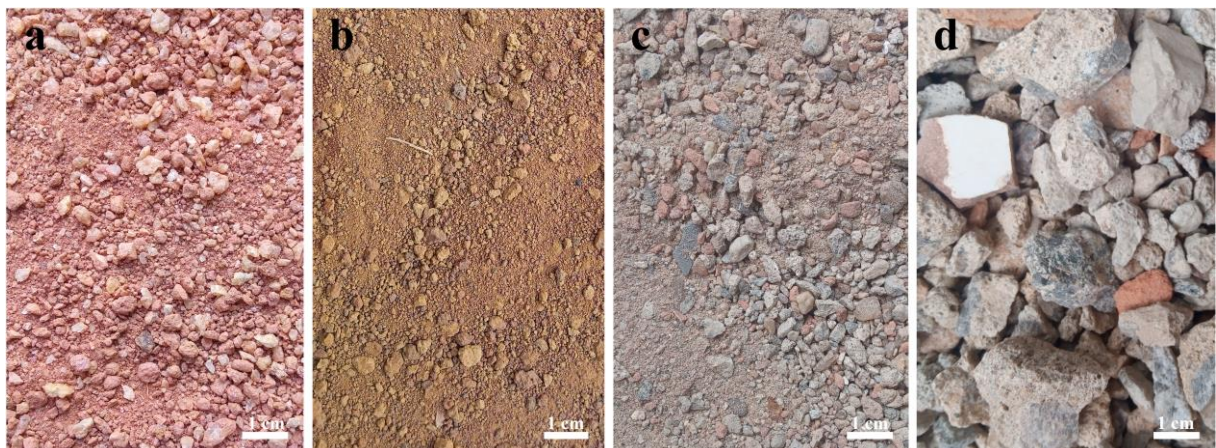
Os solos foram coletados na condição deformada, em conformidade com as orientações constantes na norma DNER-PRO 003 (DNER, 1994b) do DNIT. As amostras foram dispostas em sacos plásticos devidamente vedados e transportadas até o Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LEC-UFV), campus Viçosa-MG, onde foram secas ao ar e destorroadas.

O RCCr utilizado na pesquisa é proveniente da usina de beneficiamento Ecovia Reciclagem de Resíduos da Construção Civil, localizada na cidade de Varginha-MG, Brasil. A usina se enquadra na definição de usina fixa e, para a britagem, utiliza um britador de mandíbulas. Os resíduos são recolhidos em caçambas por toda a cidade e, ao chegar na usina, são acomodados em pilhas e separados conforme a composição predominante (RCC de composição mista e RCC de concreto). O RCC passa, então, por processo de triagem manual para eliminação dos materiais indesejáveis (madeiras, plásticos, pneus, vidros, entre outros). Após esse processo, os RCC são encaminhados para o britador, que realiza a cominuição dos agregados, e os resíduos são, então, categorizados por um conjunto de peneiras de diferentes aberturas.

O RCCr foi coletado segundo as normas DNER-PRO 120 (DNER, 1997) e NBR 10007 (ABNT, 2004a). A amostra foi acondicionada em tonéis vedados e transportada até o LEC-UFV. Após processo de homogeneização, o RCCr foi separado por peneiramento em duas frações granulométricas: (i) RCCr graúdo ($4,80 \text{ mm} < \varnothing \leq 19,0 \text{ mm}$); (ii) RCCr miúdo ($\varnothing \leq 4,80 \text{ mm}$). Tal procedimento se fez necessário devido ao fenômeno de segregação do RCCr miúdo, quando armazenado conjuntamente ao RCCr graúdo.

Nas Figuras 3.1 e 3.2 são apresentadas as amostras dos solos e do RCCr preparados para os ensaios de caracterização.

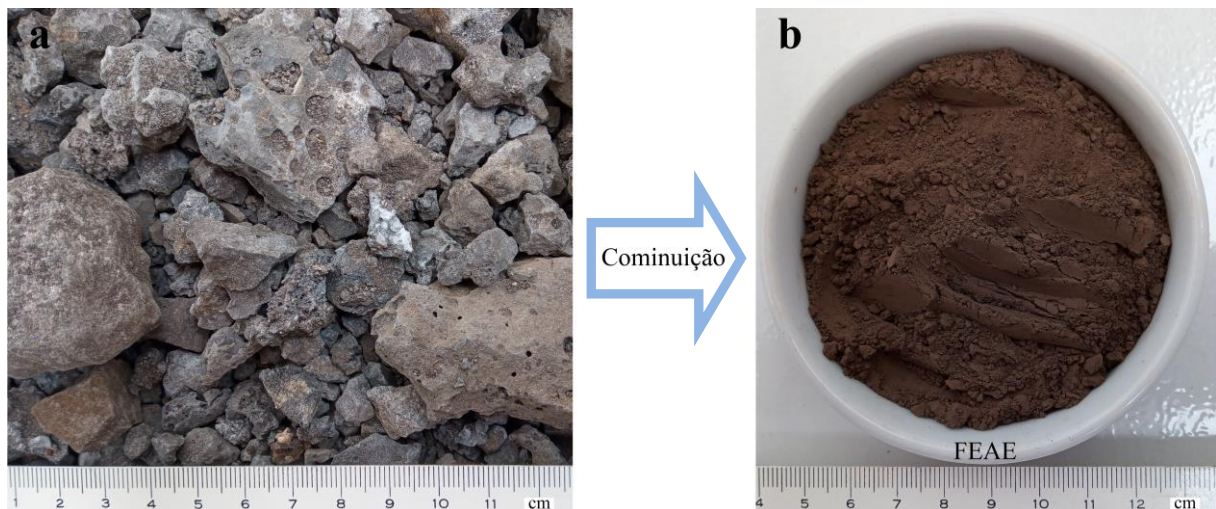
Figura 3.1: Amostras de S1 (a), S2 (b), RCCr miúdo (c) e RCCr graúdo (d).



Fonte: Acervo do autor.

A escória de aciaria elétrica utilizada no programa experimental foi coletada, no estado bruto, no pátio de estocagem a céu aberto da unidade siderúrgica da VSB (Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil), localizada no município de Jeceaba-MG, Brasil. A escória é proveniente do forno elétrico a arco (escória oxidante) e foi coletada segundo as exigências da NBR 10007 (ABNT, 2004a). A amostra foi acondicionada em tonéis vedados e transportada até o laboratório de Engenharia Civil da UFV. Com objetivo de aumentar a área superficial específica do material, a escória foi pulverizada em um moinho de bolas cilíndrico até que todo o material passasse integralmente na peneira #0,15 mm (peneira n.º 100). A Figura 3.2 apresenta a escória utilizada na pesquisa.

Figura 3.2: Escória no estado bruto (a) e após processo de cominuição (b).



Fonte: Acervo do autor.

3.2.2 Caracterização dos materiais

Os procedimentos de redução e preparo das amostras para os ensaios seguiram as normas NBR NM 27 (ABNT, 2001) e NBR 6457 (ABNT, 2016a), para os solos, e DNER-PRO 199 (DNER, 1996a), para os resíduos.

Os ensaios de caracterização física realizados nos materiais foram: solos: análise granulométrica (ABNT, 2016b), limites de Atterberg (ABNT, 2016c; ABNT, 2016d) e massa específica (ABNT, 2016e); (ii) RCCr: análise granulométrica (ABNT, 2016b), índice de forma (ABNT, 2019), abrasão Los Angeles (DNER, 1998) e massa específica (ABNT, 2016e; ABNT, 2016f); (iii) FEAE: análise granulométrica (ISO, 2020), índice de finura (ABNT, 2012a), superfície específica (ABNT, 2015), massa específica (ABNT, 2017) e perda ao fogo (ABNT, 2012b). Os solos e o RCCr miúdo também foram classificados segundo os sistemas TRB (*Transportation Research Board*) (AASHTO, 2021), USC (*Unified Soil Classification*) (ASTM, 2017) e MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) (DNER, 1994c, 1994d, 1996b).

As avaliações química, mineralógica e morfológica dos materiais foram realizadas pelas técnicas de fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Os ensaios de FRX foram realizados no equipamento EDX-720 *Shimadzu Rayny*. A análise foi realizada em amostras com tamanho de partícula inferior a 75 μm , obtidas por cominuição. Os ensaios por DRX foram realizados no equipamento D8 *Discover* com sistema

de reconhecimento automático de componentes. As características dos ensaios foram radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), tensão de trabalho de 40 kV e corrente elétrica de 40 mA. As amostras foram escaneadas de 5° a 80° (2θ), com um tamanho de passo de $0,05^\circ$ e um tempo acumulado por passo de 1 segundo. As imagens por MEV foram realizadas em equipamento da marca JEOL, modelo JSM-6010LA, magnificação de 8X a 300.000X e voltagem de aceleração de 500 V a 20 kV.

A granulometria dos FEAE foi realizada por método de difração a laser (ISO, 2020). O equipamento utilizado foi o granulômetro *Mastersizer 2000*, da Malvern Instruments Ltda, com capacidade de leitura de $0,02 \mu\text{m}$ a $2.000 \mu\text{m}$.

3.2.3 Caracterização das misturas

Os ensaios de caracterização física realizados nas misturas solo-resíduos foram: análise granulométrica (ABNT, 2016b), limites de Atterberg (ABNT, 2016c; ABNT, 2016d), massa específica (ABNT, 2016e; ABNT, 2016f). As misturas otimizadas foram classificadas segundo os sistemas TRB (*Transportation Research Board*) (AASHTO, 2021), USC (*Unified Soil Classification*) (ASTM, 2017) e MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) (DNER, 1994c, 1994d, 1996b).

As avaliações mineralógica e morfológica das misturas otimizadas foram realizadas pelas técnicas de DRX e MEV. Os equipamentos utilizados foram os mesmos já citados na subseção 3.2.2.

Neste trabalho, com objetivo de interromper os processos de hidratação e preservar as amostras das misturas de interesse em um tempo de cura escolhido, inibindo, assim, a continuidade de reações pozolânicas, adotou-se conservar os espécimes em álcool isopropílico (SNELLINGS et al., 2018).

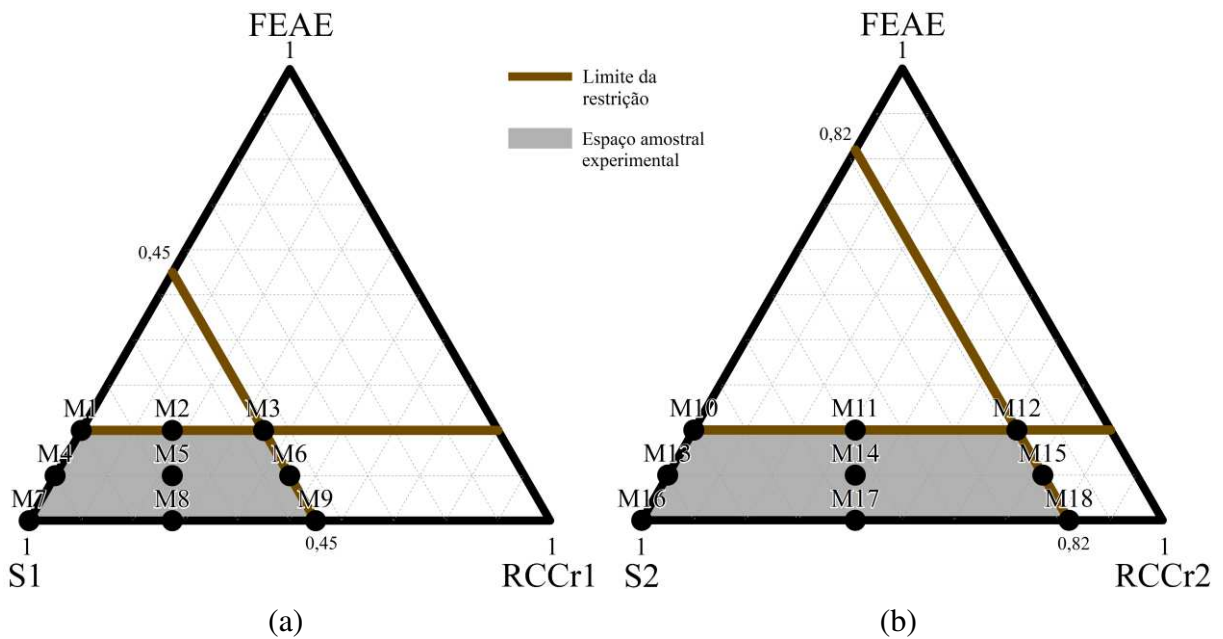
3.2.4 Preparação das misturas

O presente estudo teve como objetivo o uso de um projeto de mistura em rede simplex na concepção dos experimentos, avaliação dos resultados e otimização dos teores de solo, RCCr e FEAE para melhorar as propriedades geotécnicas de dois solos residuais. Os teores de solo, RCCr e FEAE e suas correlações com as respostas RCS e CBR nas misturas foi investigado por análise de equações de regressão e Metodologia de Superfícies de Resposta. Porém, o espaço amostral das composições possíveis sofreu restrições, sendo adotados limites máximos e/ou mínimos para os teores dos componentes nas misturas. No caso dos FEAE, um limite superior de 20% foi definido com base nos estudos desenvolvidos por Pitanga et al. (2016), Silva et al. (2019) e Pires et al. (2019). Para os componentes solo e RCCr, a restrição foi definida considerando-se que a composição binária destes deveria atender à faixa granulométrica “D” especificada na norma DNIT 141-ES (DNIT, 2010a), a qual contempla os critérios para a execução da camada de base de pavimentos utilizando solos estabilizados granulometricamente. Para atender a essa restrição, a dosagem do solo com o RCCr miúdo e RCC graúdo foi realizada de modo à composição gerar o melhor ajuste possível a faixa granulométrica “D” do DNIT (DNIT, 2010a). Como na obtenção das composições solo-RCCr, os componentes solo, RCCr miúdo e RCCr graúdo foram ajustados separadamente, esse procedimento gerou distintas dosagens de RCCr miúdo e RCCr graúdo para S1 e S2. A relação RCCr miúdo/RCCr graúdo, em massa seca dos materiais, para as composições com S1 e S2, foram de 0,3 (RCCr1) e 1,4 (RCCr2), respectivamente. Assim, os limites superior e inferior de

cada componente ficaram estabelecidos da seguinte forma: (i) S1-RCCr1-FEAE: $100\% \leq S1 \leq 55\%$, $0 \leq \text{RCCr1} \leq 45\%$ e $0 \leq \text{FEAE} \leq 20\%$; (ii) S2-RCCr2-FEAE: $100\% \leq S2 \leq 18\%$, $0 \leq \text{RCCr2} \leq 82\%$ e $0 \leq \text{FEAE} \leq 20\%$.

Devido às limitações impostas aos teores dos componentes na mistura, o arranjo simplex-vértices extremos foi o modelo adotado neste estudo. Os resultados do planejamento experimental, realizado no software de análise estatística Minitab, são apresentados na Figura 3.3 e na Tabela 3.1.

Figura 3.3: Planejamento experimental de mistura em rede simplex-vértices extremos para os efeitos dos componentes solo, RCCr e FEAE: (a) diagrama de composição para os componentes S1, RCCr1 e FEAE; (b) diagrama de composição para os componentes S2, RCCr2 e FEAE.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Tabela 3.1: Planejamento experimental de mistura para os sistemas solo-RCCr-FEAE.

Mistura	Teores dos componentes (%)			Mistura	Teores dos componentes (%)		
	S1	RCCr1	FEAE		S2	RCCr2	FEAE
M1	80,0	0,0	20,0	M10	80,0	0,0	20,0
M2	67,5	12,5	20,0	M11	49,0	31,0	20,0
M3	55,0	25,0	20,0	M12	18,0	62,0	20,0
M4	90,0	0,0	10,0	M13	90,0	0,0	10,0
M5	72,5	17,5	10,0	M14	54,0	36,0	10,0
M6	55,0	35,0	10,0	M15	18,0	72,0	10,0
M7	100,0	0,0	0,0	M16	100,0	0,0	0,0
M8	77,5	22,5	0,0	M17	59,0	41,0	0,0
M9	55,0	45,0	0,0	M18	18,0	82,0	0,0

Fonte: Resultado da pesquisa.

O DOE em arranjo simplex-vértices extremo para os sistemas S1-RCCr1-FEAE e S2-RCCr2-FEAE é representado por um trapézio (área cinza) no espaço bidimensional (Figura 3.3). Para este estudo, o DOE de três componentes resultou em quatro pontos localizados nos vértices, quatro localizados nos pontos médios das arestas e um no centroide do espaço amostral. As misturas foram nomeadas como M1, M2,..., M18, nas quais M7 e M16 representam, respectivamente, os componentes S1 e S2 puros.

As misturas foram processadas conforme os teores dos componentes listados na Tabela 3.1, calculados em relação à massa seca dos materiais. Em seguida, foram realizados ensaios de compactação, conforme as metodologias previstas nas NBR 7182 (ABNT, 2016g) e NBR 12023 (ABNT, 2012c). Todos os corpos de prova foram compactados sob a energia do Proctor normal. Os resultados permitiram a construção das curvas de compactação e obtenção dos parâmetros teor de umidade ótimo (W_{ot}) e peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) para as misturas investigadas. Por fim, todas as misturas foram avaliadas, via Metodologia de Superfícies de Resposta, na energia do Proctor normal e no W_{ot} , quanto às respostas RCS e CBR nas idades de cura 0 e 7 dias.

3.2.5 Modelagem matemática

As respostas experimentais RCS e CBR (variáveis dependentes) foram utilizadas na análise do comportamento das misturas (variáveis independentes) por Metodologia de Superfície de Resposta. Para tal, os dados experimentais foram ajustados a modelos matemáticos polinomiais, em que os coeficientes estimados foram avaliados a um nível de 10% de significância. O nível de 10% foi adotado em virtude de os valores médios de RCS e CBR, obtidos dos ensaios em triplicata, apresentarem grande variabilidade. Dessa forma, o nível de confiança das equações estimadas é igual a 90% ($P\text{-valor} = 0,10$). A qualidade do ajustamento dos modelos estimados foi avaliada a partir dos coeficientes de determinação (R^2)². Este indica qual a proporção da variável dependente está sendo explicada pelas variáveis independentes da equação estimada.

As superfícies de resposta foram geradas no software Minitab. Cada superfície representa o comportamento das respostas experimentais RCS e CBR, em função dos componentes, para cada tempo de cura. Adotou-se, para modelagem numérica, o modelo cúbico especial (CALADO, MONTGOMERY, 2003). O modelo é apresentado no seu modo completo conforme Equação 2.

$$y = \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i<j}^k \sum_j^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j}^k \sum_{j<k}^k \sum_k^k b_{ijk} x_i x_j x_k \quad (2)$$

em que: y é a estimativa da resposta RCS ou CBR; k é número de componentes na mistura; b são os coeficientes dos componentes puros e suas interações, a serem determinados nas equações; x são os componentes da mistura.

Para esses resultados preliminares, realizou-se a análise estatística a partir do ajuste dos dados experimentais aos modelos polinomiais, respeitando-se a significância dos termos ($P\text{-valor} \leq 0,10$). A fim de se obter resultados mais robustos, utilizou-se o método *Stepwise*, em

² Uma propriedade importante do coeficiente de determinação, R^2 , é que a medida em que se acrescenta variáveis explicativas (independentes) ao modelo, há uma tendência de aumento no seu valor. O R^2 ajustado, também é utilizado como medida de avaliação da qualidade do ajustamento do modelo, sendo que, este é ajustado pelos graus de liberdade, ou seja, penalizado pelo acréscimo de variáveis explicativas no modelo. Para informações mais detalhadas a respeito dos coeficientes de determinação, R^2 e R^2 ajustado, ver Gujarati (2011), pp. 217-218.

que os coeficientes estimados que apresentaram resultados estatisticamente não significativos (P-valor > 0,10) foram retirados dos modelos. Portanto, os coeficientes das equações obtidas, são todos estatisticamente significativos a um nível de até 10% de significância.

3.2.6 Otimização dos modelos

Realizadas as análises no Minitab, a otimização numérica com base na abordagem da função Desejabilidade, conforme apresentado na Equação 3 (EMMANUEL et al., 2020), foi utilizada para maximizar as respostas RCS e CBR em função dos modelos numéricos obtidos.

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_m)^{1/m} = \prod_{i=1}^m d_i \quad (3)$$

em que: D é a Desejabilidade composta; d é a Desejabilidade individual das respostas; m é o número de respostas utilizadas no estudo de otimização.

A função Desejabilidade irá determinar as melhores condições de ajuste, com base nas restrições impostas, tornando possível a maximização simultânea das múltiplas respostas. A Desejabilidade composta é um índice global, calculado a partir de uma média geométrica dos índices das variáveis de resposta (Desejabilidade individual). O valor de D , pertencente ao intervalo [0-1], é maximizado quando todas as respostas se aproximam de suas especificações; quanto mais próximo de 1 estiver D , mais próximas as respostas originais estarão dos seus respectivos limites máximos. Portanto, a função Desejabilidade irá determinar os teores ideais dos componentes, nos sistemas S1-RCCr1-FEAE e S2-RCCr2-FEAE, que maximizam as respostas RCS e CBR.

3.2.7 Ensaios de caracterização mecânica

3.2.7.1 Compactação

A determinação dos respectivos pontos de ótimo de compactação das misturas foi realizada segundo os métodos de ensaio das NBR 7182 (ABNT, 2016g) e NBR 12023 (ABNT, 2012c) nas energias do Proctor normal e intermediária. Para todas as 18 misturas, o cilindro metálico grande [$\varnothing 15,24 \times 17,78$ cm (cilindro CBR)] foi utilizado na determinação das curvas de compactação. Obtidas as curvas, os valores de W_{ot} e $\gamma_{dm\acute{a}x}$ foram adotados como referência na moldagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios de RCS, CBR e MR.

3.2.7.2 RCS

O ensaio de RCS (DNER-ME 202 [DNER, 1994e]; DNER-ME 201 [DNER, 1994f]) foi realizado em corpos de prova de dimensões $\varnothing 10 \times 12,73$ cm. Três amostras foram preparadas para cada mistura nos diferentes tempos de cura (ensaio em triplicata). Após a etapa de moldagem, os corpos de prova foram extraídos dos cilindros de compactação, envelopados em plástico filme e acondicionados em câmara úmida, para preservar o teor de umidade. Os corpos de prova ficaram acondicionados nesse ambiente por 7 e 28 dias. Os corpos de prova com 0 dia de cura foram submetidos ao ensaio de RCS logo após o procedimento de compactação. Não foi adotada, previamente à realização dos ensaios, a imersão dos corpos de prova em água por 4 horas.

Para o ensaio, utilizou-se prensa MARSHALL automática digital microprocessada (marca SOLOTEST) com velocidade de deformação de 1,00 mm por minuto. A prensa possui célula de carga tipo S de 5.000 kgf de capacidade e LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) de 50 mm com resolução de 0,01 mm.

3.2.7.3 CBR

O ensaio CBR foi realizado conforme norma DNIT 172-ME (DNIT, 2016). Três amostras foram preparadas para cada mistura nos diferentes tempos de cura. Após a etapa de moldagem, os corpos de prova foram envelopados em plástico filme e acondicionados em câmara úmida por 7 e 28 dias. As amostras com 0 dia de cura foram submetidas ao ensaio logo após o procedimento de compactação. Os corpos de prova, imediatamente após o processo de cura, permaneceram imersos em água por período de 96 horas (quatro dias). Terminado o período de embebição, os corpos de prova foram retirados da imersão e submetidos aos procedimentos de ensaio. Para todos os corpos de prova foram determinados os valores de Expansão e índice CBR.

Para o ensaio, foi utilizada prensa com motor elétrico (marca SOLOTEST) com velocidade de deformação de 1,27 mm por minuto. A prensa possui anel dinamométrico de 5.000 kgf de capacidade, sensível a 2,5 kgf, extensômetro com resolução de 0,001 mm, para medir as deformações do anel dinamométrico, e extensômetro com resolução de 0,01 mm, para medir a penetração do pistão no CP.

3.2.7.4 Módulo de Resiliência (MR)

Os solos e as misturas otimizadas foram submetidos ao ensaio de módulo de resiliência (MR) conforme os procedimentos da norma DNIT 134-ME (DNIT, 2018). Os corpos de prova (Ø10 x 20 cm), confeccionados com 10 camadas de mesma espessura, por compactação dinâmica, foram produzidos em triplicata. As amostras de solo foram submetidas ao ensaio imediatamente após a etapa de compactação. As misturas otimizadas, após a compactação, foram extraídas do cilindro, envelopados em plástico filme e acondicionados em câmara úmida por período de cura de 7 e 28 dias.

No presente trabalho, o MR foi calculado a partir do modelo matemático proposto por Pezo et al. (1992). Segundo Klinsky et al. (2014), ele fornece uma boa previsão do comportamento resiliente dos solos, independentemente da granulometria do material, já que considera a influência simultânea da tensão confinante e tensão desvio, utilizando os coeficientes experimentais k_1 , k_2 e k_3 . Esse modelo, apresentado na Equação 4, é geralmente aplicado para prever a MR de solos finos e granulares.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (4)$$

em que: σ_3 é a tensão confinante; σ_d é a tensão desvio; k_1 , k_2 e k_3 são os parâmetros experimentais; MR é o módulo de resiliência.

Para o ensaio, a frequência adotada, para as cargas repetidas na tensão vertical (tensão desvio), foi de 1 Hz (60 ciclos por minuto). O equipamento utilizado foi o modelo LoadTrac II fabricado pela empresa GEOCOMP, EUA. É constituído por prensa de aplicação de carga, compressor hidráulico, servo-válvula com cilindro hidráulico e unidade externa de aquisição de dados. Os componentes hidráulicos consistem de um cilindro associado a uma servo-válvula e

de um atuador hidráulico alimentado por compressor a ar. A aplicação da tensão confinante sobre o corpo de prova é realizada por um regulador de pressão eletropneumático que ajusta a tensão na célula, monitorando-a continuamente. Para medição dos deslocamentos axiais do corpo de prova sob carregamento repetido, foi utilizado apenas 1 (um) LVDT. O LVDT é preso solidariamente ao pistão de transmissão de carga e apoiado, para realização das leituras, na base superior externa da câmara triaxial.

3.2.8 Controle de qualidade

Todos os corpos de prova foram moldados em triplicata para possibilitar a aplicação de análise estatística na determinação dos valores de RCS, CBR e MR. Os critérios de aceitação dos corpos de prova compactados foram:

- A. RCS e CBR: (i) valor de umidade de compactação entre $\pm 1\%$ da W_{ot} obtida da curva de compactação das misturas; (ii) grau de compactação (GC) entre 97% e 103%; (iii) coeficiente de variação (Equação 3) dos parâmetros RCS e CBR, calculado para três corpos de prova, menor ou igual a 15%;
- B. MR: (i) valor de umidade de compactação entre $\pm 1\%$ da W_{ot} obtida da curva de compactação do solo/mistura; (ii) GC entre 99% e 101%; (iii) coeficiente de determinação (R^2) da equação do MR $\geq 0,70$.

O coeficiente de variação (CV), métrica utilizada para avaliações de repetitividade e reprodutibilidade, foi determinado a partir da equação:

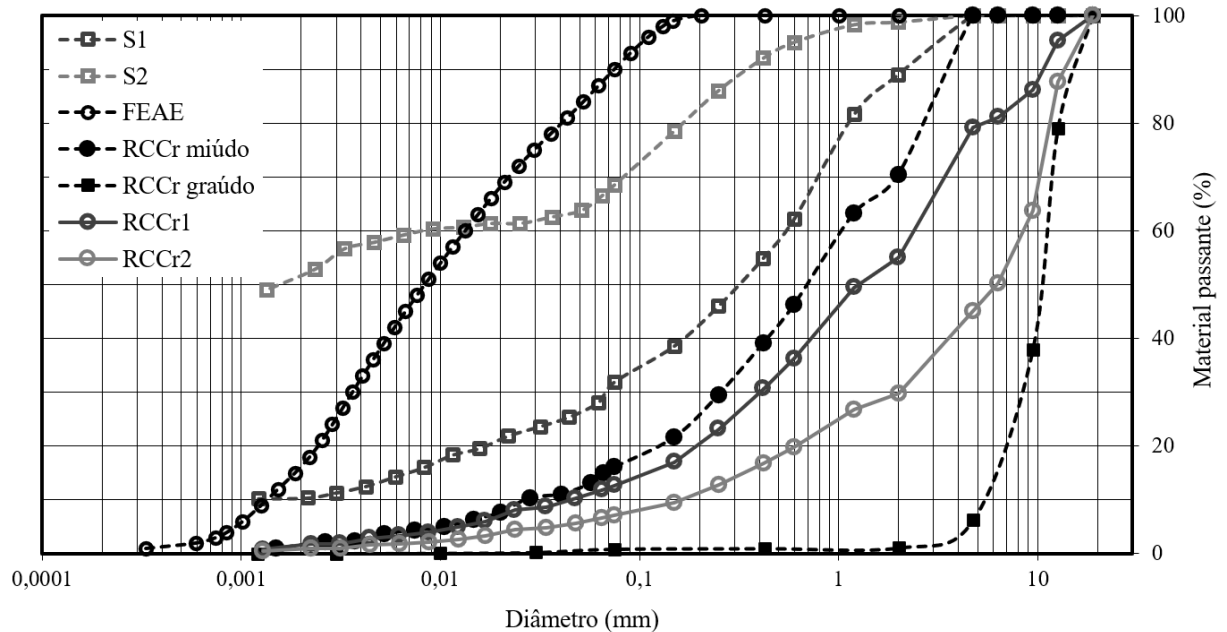
$$CV = \left(\frac{\text{Desvio Padrão}}{\text{Média}} \right) \cdot 100\% \quad (5)$$

3.3 Resultados e discussões

3.3.1 Caracterização física, química, mineralógica e morfológica dos materiais

Na Figura 3.4 e Tabela 3.2 estão apresentadas as características granulométricas do S1, S2, RCCr miúdo, RCCr graúdo, RCCr1, RCCr2 e FEAE.

Figura 3.4: Curvas granulométricas dos materiais.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Tabela 3.2: Caracterização granulométrica dos solos e do RCCr.

Parâmetros	Materiais			
	S1	S2	RCCr miúdo	RCCr graúdo
% argila ($\varnothing \leq 0,002$ mm)	10	52	2	0
% silte ($0,002$ mm $\leq \varnothing \leq 0,06$ mm)	17	14	11	1
% areia fina ($0,06$ mm $\leq \varnothing \leq 0,2$ mm)	15	17	12	0
% areia média ($0,2$ mm $\leq \varnothing \leq 0,6$ mm)	20	12	21	1
% areia grossa ($0,6$ mm $\leq \varnothing \leq 2,0$ mm)	27	4	24	1
% pedregulho ($\varnothing \geq 2,0$ mm)	11	1	30	97

\varnothing : Diâmetro.

Fonte: Resultado da pesquisa.

A Tabela 3.3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica dos solos e do RCCr.

Tabela 3.3: Síntese dos resultados das caracterizações física e mecânica dos solos e do RCCr.

Parâmetros	Materiais			
	S1	S2	RCCr miúdo	RCCr graúdo
Limite de liquidez (%)	40	58		
Limite de plasticidade (%)	26	40	Não plástico	-
Índice de plasticidade (%)	14	18		
Peso específico (kN/m ³)	27,27	27,57	28,94	25,90
Classificação TRB	A-2-7(0)	A-7-5(13)	A-1-b	-
Classificação USC	SC	CH	SW-SM	-
Classificação MCT	NA'	LG'	NA'	-
Wot (%)	EN/EI	14,1/12,3	28,3/27,0	-
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	EN/EI	18,2/19,1	14,6/15,3	-
CBR (%)	EN/EI	17/17	7/10	-
Expansão CBR (%)	EN/EI	0,2/0,1	1,4/0,5	-
RCS (kPa)	EN/EI	191/193	261/308	-
Abrasão Los Angeles (%)				42
Índice de forma				3

EN: Energia normal; EI: Energia intermediária.

Fonte: Resultado da pesquisa.

Verifica-se que os solos são bem distintos, com predomínio da fração areia (62%) em S1 e da fração argila (52%) em S2. Em relação à plasticidade, os dois solos foram caracterizados como de média plasticidade. No sistema de classificação TRB, S1 foi enquadrado no grupo A-2-7(0) e S2 no grupo A-7-5(13). Segundo essa classificação, aos solos granulares do subgrupo A-2-7 se atribui comportamento excelente a bom como camada do subleito de pavimentos rodoviários. Aos solos do subgrupo A-7-5 se atribui previsão de péssimo comportamento como subleito rodoviário, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume (DNIT, 2006; AASHTO, 2021). Pelo sistema USC, S1 e S2 foram classificados como SC (areia com finos) e CH (argilas de alta plasticidade), respectivamente. Segundo a classificação MCT, S1 foi identificado como de comportamento Arenoso Não-Laterítico (NA'), caracterizando-o como um material que pode oferecer condições adequadas para uso como bases de pavimentos (NOGAMI, VILLIBOR, 1995). S2 foi identificado como Laterítico Argiloso (LG') que, segundo o DER-PR (2005b), costumam apresentar excelente durabilidade, podendo ser utilizado como revestimento primário de vias não pavimentadas. Conforme os critérios do DNIT (DNIT, 2006), os parâmetros CBR observados em S1 e S2, compactados nas energias do Procto normal e intermediária, permitem suas aplicações em subleito e reforço de subleito de pavimentos.

O RCCr miúdo é constituído, principalmente, pelas frações areia e pedregulho. Devido à baixa presença de finos em sua composição, o RCCr miúdo não apresentou limites de liquidez e plasticidade e, portanto, não possui índice de plasticidade. O comportamento não plástico em resíduos de construção civil também foi observado em outros estudos (JIMÉNEZ et al., 2012; SOUZA et al., 2020; MOREIRA et al., 2020). Segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004b), a amostra de RCCr graúdo foi identificada como agregado de resíduo de concreto (ARC). O material apresenta coloração fortemente cinza (grande quantidade de resíduos de concreto e mármore), média presença de material vermelho e pouca presença de resíduos de madeira, plástico ou metal. Quanto ao desgaste físico sofrido pelos agregados quando submetidos a

cargas abrasivas, o RCCr graúdo apresentou valor de 42% no ensaio de abrasão “Los Angeles”. Este valor está abaixo do valor máximo (55%) estabelecido pela norma DNIT 141-ES (DNIT, 2010a). Ressalva-se que os limites desta especificação técnica foram projetados para agregados naturais e não para agregados reciclados. Para o ensaio de índice de forma, o agregado graúdo apresentou valor 3. A NBR 15116 (ABNT, 2004b) estabelece, como critério de aceitação, valores menores ou igual a 3. Partículas planas e alongadas são mais suscetíveis à quebra durante o processo de compactação (LEITE et al., 2011). Em relação aos contaminantes, o agregado reciclado apresentou 0,8% de materiais não minerais de características distintas, ficando abaixo do limite de 3% estabelecido pela NBR 15116 (ABNT, 2004b).

A Tabela 3.4 apresenta os resultados da caracterização física realizada nos FEAE.

Tabela 3.4: Propriedades físicas dos FEAE.

Peso Específico (kN/m ³)	Superfície Específica (m ² /kg)	Índice de Finura (%)	Material retido na peneira #45 µm (%)	PF (%)
37,95	263,0	21,0	32,0	0,18

*PF: Perda ao fogo.

Fonte: Resultado da pesquisa.

As propriedades físicas observadas nos FEAE (Tabela 3.4) são similares às obtidas por Pitanga et al. (2016), Pires et al. (2019) e Silva et al. (2019). A análise granulométrica dos FEAE apresentou grande presença de partículas finas ($\varnothing < 75 \mu\text{m}$). Os valores de material retido na peneira de #45 µm e perda ao fogo estão em conformidade com as exigências da NBR 12653 (ABNT, 2014).

Os resultados da caracterização química dos solos, do RCCr miúdo e dos FEAE, realizada por meio da técnica de FRX, são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Composição química dos materiais por ensaio de FRX.

Elemento	Unidade	Concentração				Elemento	Unidade	Concentração			
		S1	S2	RCCr*	FEAE			S1	S2	RCCr*	FEAE
V ₂ O ₅	ppm	852	1.000	2.565	926	TiO ₂	%	2,0	3,3	1,4	0,6
Cl	ppm	652	600	2.016	430	CaO	%	0,1	0,2	15,6	40,6
ZrO ₂	ppm	525	683	10.650	119	MnO	%	0,1	0	0,2	6,3
ZnO	ppm	125	110	5.854	0	MgO	%	-	-	1,3	2,8
SrO	ppm	0	24	9.150	1.340	P ₂ O ₅	%	0,5	0,5	-	-
Bi ₂ O ₃	ppm	52	17	1.005	-	SO ₃	%	0,2	0,1	2,4	0,2
Al ₂ O ₃	%	30,9	37,3	15,1	3,7	K ₂ O	%	0,3	0,1	2,1	-
SiO ₂	%	44,6	34,7	39,9	11,8	Cr ₂ O ₃	%	0,1	0,1	-	1,6
Fe ₂ O ₃	%	20,9	23,5	17,5	32,2	Outros	%	0,1	0,1	1,4	0,0

*RCCr miúdo.

Fonte: Resultado da pesquisa.

A composição química dos solos é predominantemente composta por SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ e, em menores teores, TiO₂ e P₂O₅, elementos normalmente encontrados em solos sedimentares e que participam ativamente do processo de estabilização do solo. Segundo Nogami e Villibor (1995), nos solos lateríticos (S2) os óxidos de ferro e de alumínio hidratados possuem propriedades cimentantes, desempenhando papel importante na formação de torrões (grumos) e concreções. No caso dos solos saprolíticos (S1), os argilo-minerais e,

eventualmente, outros minerais presentes não se apresentam recobertos por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, como no caso dos solos lateríticos.

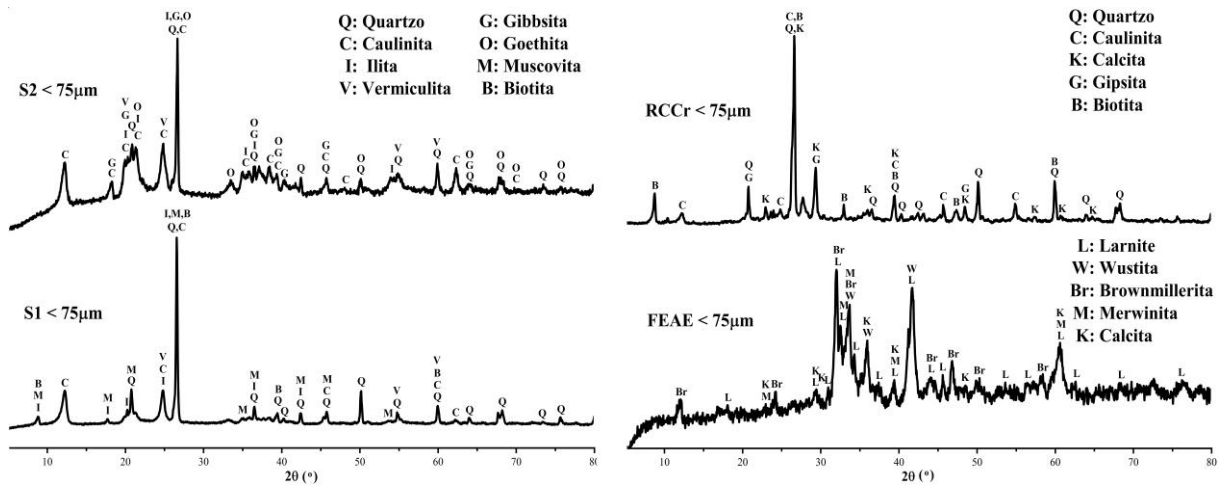
Para os valores apresentados na Tabela 3.5, a relação entre os teores de sílica e alumina ($[\%SiO_2 \cdot 1,7]/[\%Al_2O_3]$), ou valor K_i , é usualmente utilizada como um indicador do grau de intemperismo dos solos. Solos altamente intemperizados caracterizam-se pedogeneticamente pela remoção de sílica e acúmulo de alumínio nos seus perfis (DONAGEMA et al., 2011). Por essa relação, os valores de K_i calculados para S1 e S2 são, respectivamente, 2,45 e 1,58. Esses valores indicam, como esperado, ser S1 um solo residual jovem e S2 um solo residual maduro.

O RCCr apresentou, em maior concentração, a presença de sílica. Quantidades significativas de óxidos de ferro, cálcio e alumínio também foram observadas. A maior ocorrência destes elementos na composição do RCCr confirma o que foi observado macroscopicamente, onde resíduos de argamassa e concreto são predominantes. Os óxidos de ferro, alumínio e cálcio justificam, como se verá mais adiante, a presença de minerais como caulinita, biotita, calcita e gibsita no RCCr.

Os FEAE são compostos, basicamente, por CaO, Fe_2O_3 , SiO_2 e, em menores proporções, MnO, Al_2O_3 e MgO. Normalmente, os teores de CaO, FeO, SiO_2 , Al_2O_3 e MgO das escórias de aciaria elétrica estão entre 22–60%, 10–40%, 6–34%, 3–14% e 3–13%, respectivamente (YILDIRIM, PREZZI, 2011). Outros componentes menores incluem outras impurezas oxidadas, como MnO e SO_3 . Importante observar que cal, óxido de ferro e sílica são elementos usuais da composição química do cimento Portland. Conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), o teor de $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ (47,6%) dos FEAE está próximo do mínimo exigido (50%) e os percentuais de SiO_3 (0,2%) e Na_2O (0,0%) estão abaixo dos valores máximos toleráveis. Por grande parte da composição (75,6%) dos FEAE ser de óxidos básicos (CaO, FeO, MgO), ela é caracterizada como escória básica (JAMES O'CONNOR et al., 2021). A presença majoritária de CaO, SiO e, em menores proporções, MgO, e sua elevada relação CaO/ SiO_2 (3,5), são indicativos da reatividade potencial do material como um ligante hidráulico (POH et al., 2006). Yildirim e Prezzi (2022) afirmam que os elevados teores CaO em escórias é um dos principais fatores para seu uso potencial na estabilização química de solos. Por processos de cominuição, a escória pode atingir uma granulometria semelhante à inferior ao cimento e ser aplicada na forma de pó (CARVALHO et al., 2019; MARTINS et al., 2021). Quando finamente moída e/ou ativada com um material alcalino (tipicamente cal hidratada), produz materiais convencionais de silicato de cálcio hidratado (KAMBOLE et al., 2017).

As análises mineralógicas por DRX dos materiais foram realizadas em amostras com diâmetros inferiores a 75 μm . Os resultados obtidos são apresentados e discutidos a seguir.

Figura 3.5: Difratomogramas dos materiais.



Fonte: Resultado da pesquisa.

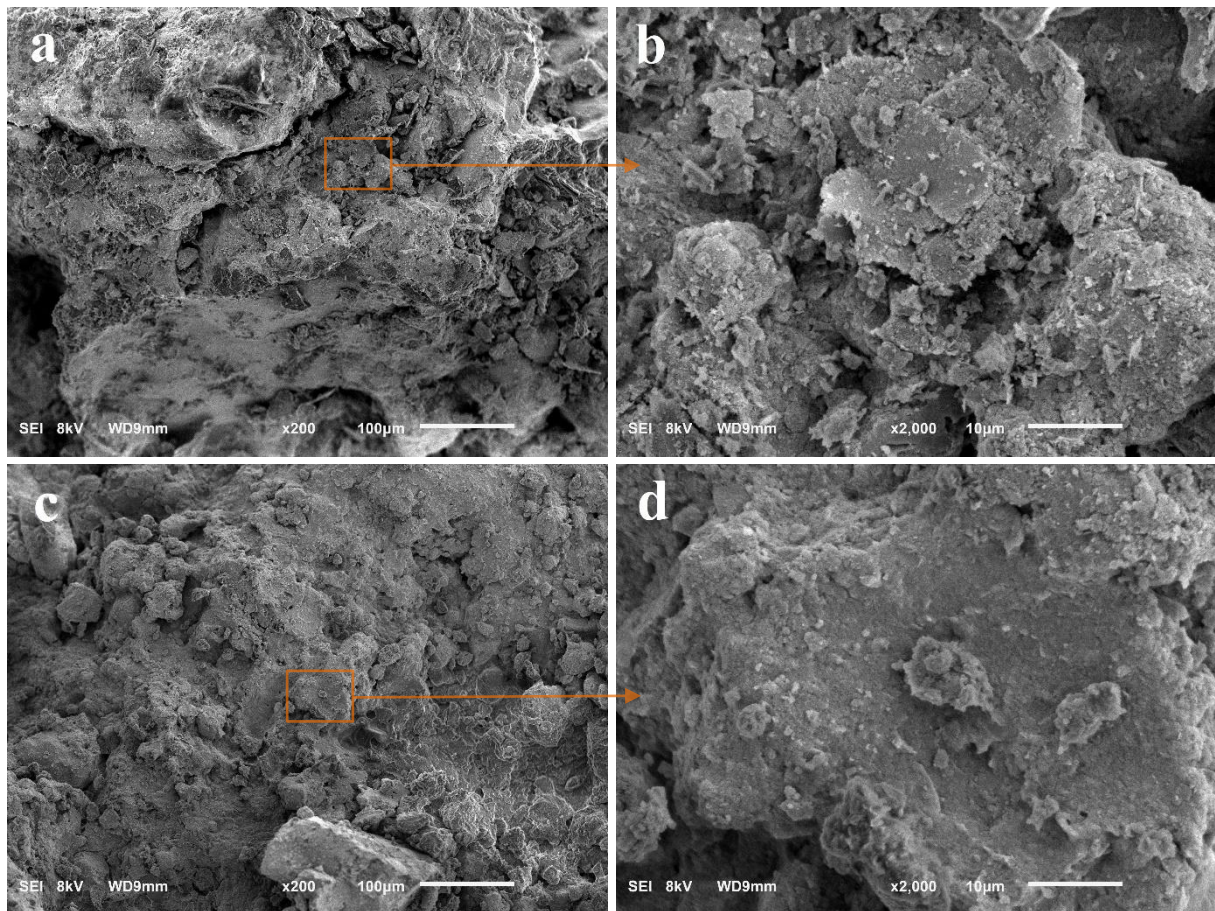
Os ensaios de DRX dos solos revelaram presença de caulinita (mineral 1:1) e quartzo, minerais primários de elevada resistência à intemperização (KAMPF et al., 2019). A caulinita, principal mineral da fração argila de solos desenvolvidos sob condições tropicais úmidas, é comumente encontrada em solos lateríticos e saprolíticos do Brasil (NOGAMI, VILLIBOR, 1995). S1 apresentou características de um solo jovem, com picos bem definidos de muscovita, illita e biotita. S2 apresentou características pedológicas de um solo em avançado estágio de intemperização, com presença de gibbsita, goethita e vermiculita, cuja ocorrência é favorecida em condições de longo tempo de exposição do solo aos agentes bioclimáticos.

A análise por DRX do RCCr demonstrou a presença de quartzo, caulinita, calcita, gipsita e biotita. O quartzo deriva da presença de rochas naturais, já a calcita pode ter diferentes origens, como, por exemplo, a partir de agregados naturais e de componentes carbonatados (FERREIRA et al., 2019) utilizados em concretos e argamassas, como a cal e o cimento. A presença de gipsita também foi observada em outras pesquisas (JIMÉNEZ et al., 2012; FERREIRA et al., 2019). A origem da biotita pode estar relacionada com os resíduos de granito presentes no RCCr.

Para os FEAE, os minerais identificados foram larnita (Ca_2SiO_4), wustita (FeO), brownmillerita ($\text{Ca}_2[\text{Al,Fe}]_2\text{O}_5$), merwinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}[\text{SiO}_4]_2$) e calcita (CaCO_3). Os minerais encontrados nesta análise estavam de acordo com os resultados observados na literatura (KAMBOLE et al., 2017; PIRES et al., 2019; BRANCA et al., 2020; JAMES O'CONNOR et al., 2021). A mineralogia da escória pode variar amplamente, a depender da matéria-prima utilizada, do tipo de aço produzido, das condições de funcionamento do forno, dos tratamentos empregados e da forma de resfriamento (YILDIRIM, PREZZI, 2011; JAMES O'CONNOR et al., 2021). Segundo Yildirim e Prezzi (2011), o processo de fabricação de aço em forno elétrico a arco é essencialmente um processo de reciclagem de sucata de aço. Portanto, a composição química da escória produzida depende significativamente das propriedades do aço reciclado. Geralmente, essa característica, torna complexa a identificação dos minerais constituintes devido os muitos picos sobrepostos refletindo as diferentes fases cristalinas dispersas presentes na matriz amorfa do material.

A análise morfológica dos materiais foi realizada com auxílio de fotomicrografias obtidas por MEV, com aplicações de 200x até 4.000x. As imagens obtidas são apresentadas nas Figuras 3.6 e 3.7.

Figura 3.6: Fotomicrografias dos solos obtidas por MEV: (a) organização microestrutural de S1; (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe das microagregações e foliações de partículas lamelares; (c) organização microestrutural de S2; (d) ampliação de “c”, com detalhe da estruturação de um torrão e do plasma argiloso que permeia a amostra.



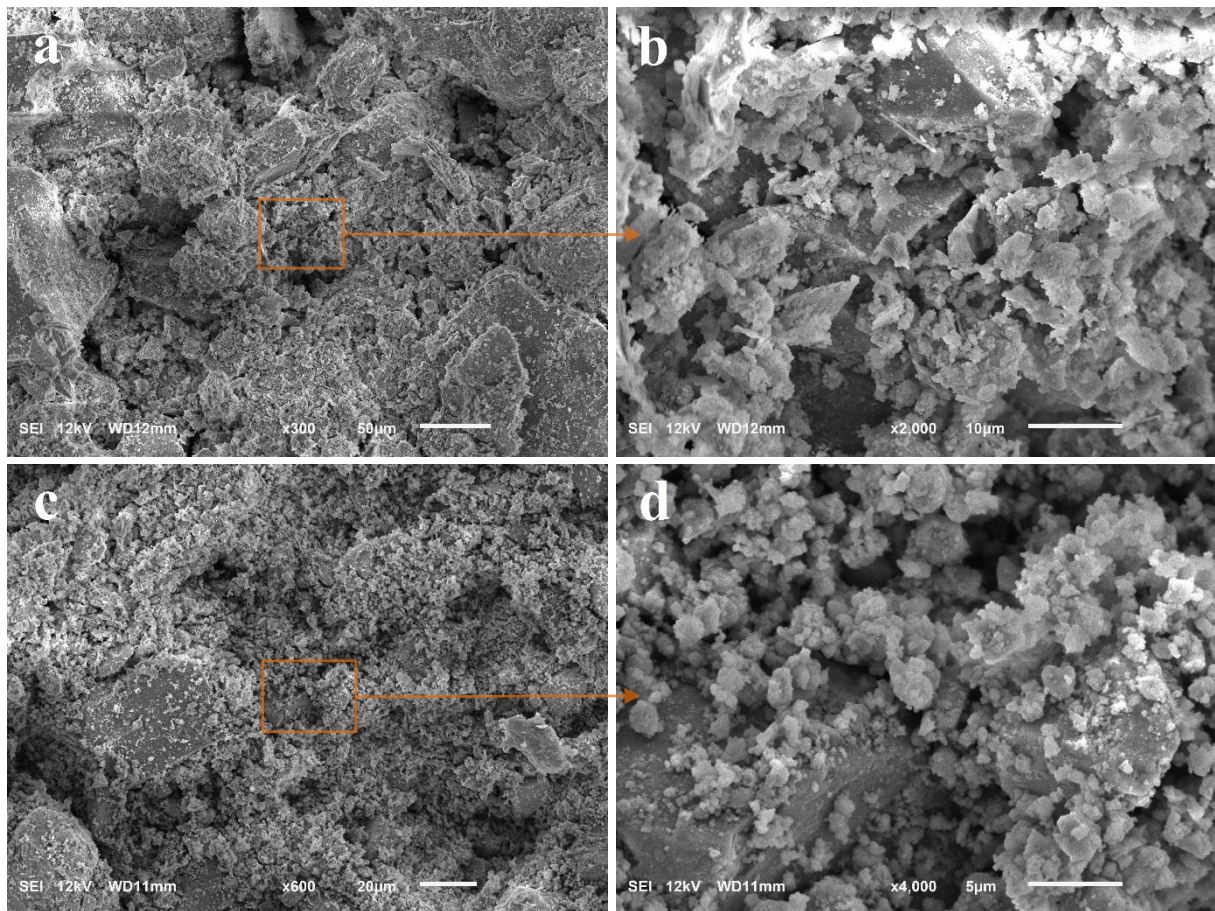
Fonte: Resultado da pesquisa.

Na Figura 3.6a (S1), é possível identificar a estruturação lamelar das camadas de deposição em uma grande partícula, provavelmente, de sílica. Observa-se, também, forte estruturação microgranular com presença de grãos volumétricos de diferentes formatos, textura rugosa, aspecto poroso e arestas vivas. Os macroporos, principalmente na forma de canais com diâmetros da ordem de 30 μm , estão preenchidos com pequenas partículas de dimensões variadas, provavelmente quartzo. Na imagem de ampliação (Figura 3.6b), as microagregações observadas, foliações formadas por partículas lamelares com formatos variados e espessura inferiores a 1 μm , podem ser compostos de caulinita. Por ser um solo jovem, pouco intemperizado, é comum possuir grande quantidade de minerais primários e secundários, guardando características herdadas da rocha original.

Na Figura 3.6c (S2), nota-se uma estrutura mais compacta e regular, característica de solos com grande presença de argilominerais. Estes aglomerados são constituídos, basicamente, por agentes cimentantes presentes nos solos, como a sílica, óxidos de ferro e de alumínio (NOGAMI, VILLIBOR, 1995), confirmando os resultados obtidos no ensaio de FRX (Tabela

3.5). Na imagem com maior ampliação (3.6d), observa-se a estruturação de um torrão (grumo) e detalhe do plasma argiloso que permeia a amostra. Sua estrutura condiz com um ambiente de gênese sedimentar, onde a agregação das moléculas se dá por ligações iônicas.

Figura 3.7: Fotomicrografias do RCCr e FEAE obtidas por MEV: (a) morfologia do RCCr fino ($\varnothing \leq 0,15$ mm); (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe de partículas com dimensões inferiores à 10 μm ; (c) morfologia dos FEAE; (d) ampliação de “c”, com detalhe do grande número de partículas, inferiores 5 μm , aderidas às partículas maiores.



Fonte: Resultado da pesquisa.

O RCCr ($\varnothing \leq 0,15$ mm) apresentou morfologia irregular, com partículas de diversos tamanhos, formas variadas e de arestas e vértices angulares (Fig. 3,7a e b), o que se justifica em função do processo de britagem do RCCr (FERREIRA et al., 2019). Na imagem com maior ampliação (3.7b), observa-se um grande número de partículas, de dimensões inferiores à 10 μm , apresentando estruturas volumétricas e lamelares, de superfície porosa com textura moderadamente rugosa e áspera, provavelmente provenientes de argamassas e concretos.

Analisando as imagens dos FEAE (Figuras 3.7c e d), pode-se observar grãos de tamanhos variados, consideravelmente menores que os grãos observados no RCCr, onde as partículas maiores são predominantemente volumétricas, moderadamente rugosas e possuem bordas levemente arredondadas. O grande número de pequenas partículas, inferiores 5 μm , aderidas às partículas maiores, contribui para a elevada superfície específica (263 m^2/kg) dos FEAE, o que auxilia na maior capacidade de interação química dos finos de escória com os solos e o RCCr.

3.3.2 Caracterização das misturas

A Tabela 3.6 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados nas misturas previstas no programa experimental.

Tabela 3.6: Propriedades físicas das misturas previstas no programa experimental.

Mistura	Wot* (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}^*$ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	Iv	(%)			Mistura	Wot* (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}^*$ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	Iv	(%)		
					LL	LP	IP						LL	LP	IP
M1	12,7	19,22	28,90	0,50	24	15	9	M10	25,5	15,58	29,17	0,87	39	31	8
M2	13,0	19,11	28,79	0,51	24	17	7	M11	19,9	17,27	29,18	0,69	28	21	7
M3	13,3	19,54	28,68	0,47	23	19	4	M12	14,7	19,00	29,18	0,54	22	18	4
M4	13,0	19,06	28,06	0,47	29	20	9	M13	27,2	14,87	28,35	0,91	38	35	3
M5	13,4	19,11	27,92	0,46	29	20	9	M14	20,5	16,87	28,36	0,68	41	29	12
M6	12,6	19,21	27,78	0,45	27	19	8	M15	14,5	18,80	28,37	0,51	26	20	6
M7	14,1	18,22	27,27	0,50	40	26	14	M16	28,3	14,58	27,57	0,89	58	40	18
M8	12,2	19,11	27,10	0,42	32	24	8	M17	21,6	16,38	27,58	0,68	47	35	12
M9	12,3	19,22	26,93	0,40	33	23	10	M18	15,2	18,20	27,59	0,52	NP		

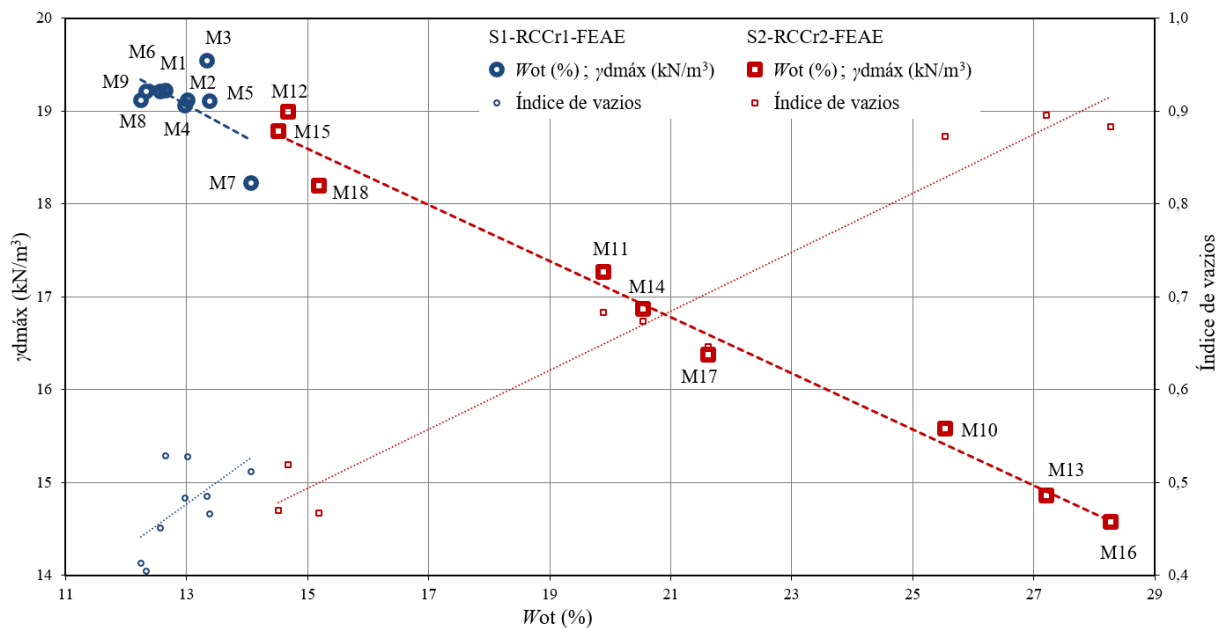
*Valores referentes a compactação na energia do Proctor normal.

Wot: Teor de umidade ótimo; $\gamma_{dm\acute{a}x}$: Peso específico aparente seco máximo; γ_s : Peso específico dos sólidos; Iv: Índice de vazios; LL: Limite de liquidez; LP: Limite de plasticidade; IP: Índice de plasticidade.

Fonte: Resultado da pesquisa.

A Figura 3.8 apresenta, graficamente, o comportamento do teor de umidade ótimo, peso específico aparente seco máximo e índice de vazios das misturas.

Figura 3.8: Variação dos parâmetros Wot, $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e índice de vazios das misturas investigadas.



Fonte: Resultado da pesquisa.

A incorporação dos resíduos aos solos proporcionou, devido ao método de dosagem adotado (composição binária solo-RCCr atender a faixa D do DNIT [DNIT, 2010a]), misturas

com melhor distribuição granulométrica. Essa condição leva um melhor imbricamento entre as partículas, reduz o volume vazio entre os grãos e, conseqüentemente, aumenta a densidade do material estabilizado. Mediante emprego de energia de compactação adequada, essas características auxiliam no ganho de resistência das misturas. À medida que as proporções dos RCCr e FEAE nos solos aumenta, o $\gamma_{dm\acute{a}x}$ das misturas aumenta. Pode-se, portanto, presumir que um aumento no $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ocorre devido à adição dos resíduos. Isso decorre em razão dos maiores pesos específicos dos resíduos e preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas existentes nos FEAE (efeito *filler*). A distribuição granulométrica dos FEAE indicou que 55% em massa desse material possui diâmetro inferior a 10 μm (Figura 3.4), o que contribui no melhor empacotamento dos grãos. Este comportamento, normalmente associado a ganhos de resistência mecânica, já foi observado em estudos envolvendo misturas solo-escória (DINIZ et al. 2017; MUJTABA et al., 2018; PIRES et al., 2019) e solo-RCCr (SOUZA et al., 2020; MOREIRA et al., 2020). De forma mais significativa, destaca-se que os ganhos de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ nas misturas M3, M6 e M9, em relação ao S1, e M12, M15 e M18, em relação ao S2, foram de 7%, 5% e 5% e 30%, 29% e 25%, respectivamente. Importante observar o maior teor de RCCr presente nas misturas M12 (62% RCCr), M15 (72% RCCr) e M18 (82% RCCr). A adição dos resíduos influenciou o índice de plasticidade dos solos; os incrementos de RCCr e FEAE provocaram redução dessa propriedade nas misturas. Para a mistura M18, não foi possível determinar os limites de liquidez e plasticidade, caracterizando-a como não plástica.

3.3.3 Ensaios de caracterização mecânica

3.3.3.1 RCS e CBR

As Tabelas 3.7 e 3.8 apresentam os valores médios dos parâmetros RCS e CBR das amostras de solo tratadas com os vários teores de RCCr e FEAE após as curas de 0 e 7 dias. Os valores dos CV (Equação 5), utilizados como critério de aceitação dos resultados observados, também são apresentados.

Tabela 3.7: Valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.

Mist.	Período de cura (dias)				Mist.	Período de cura (dias)			
	0		7			0		7	
	TR (kPa)	CV (%)	TR (kPa)	CV (%)		TR (kPa)	CV (%)	TR (kPa)	CV (%)
M1	304,31	5,6	834,89	3,3	M10	220,04	4,0	331,72	0,4
M2	273,59	6,6	758,95	3,5	M11	112,45	5,8	435,00	1,2
M3	288,03	1,0	799,72	4,7	M12	192,60	5,8	544,74	8,5
M4	240,00	0,6	411,31	7,4	M13	193,39	2,9	281,82	4,6
M5	169,82	4,0	372,20	4,6	M14	172,45	7,6	298,18	2,9
M6	173,56	4,4	344,20	7,5	M15	173,71	9,7	262,75	4,5
M7	190,93	1,5	190,93	1,5	M16	261,06	5,9	261,06	5,9
M8	142,65	3,2	142,65	3,2	M17	164,33	4,9	164,33	4,9
M9	71,47	7,9	71,47	7,9	M18	68,43	5,5	68,43	5,5

Mist.: Mistura; TR: Tensão de ruptura; CV: Coeficiente de variação.

Fonte: Resultado da pesquisa.

Tabela 3.8: Valores médios dos parâmetros CBR das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.

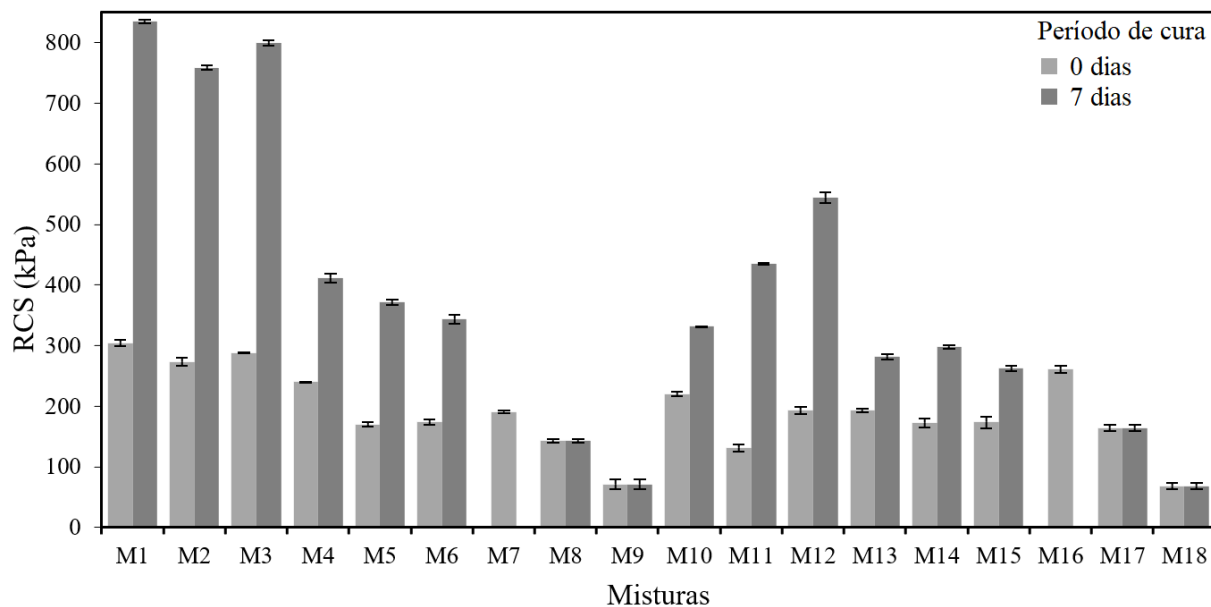
Mist.	Período de cura (dias)						Mist.	Período de cura (dias)					
	0		7		0	7		0		7		0	7
	CBR (%)	CV (%)	Expan. (%)	CBR (%)				CV (%)	Expan. (%)				
M1	71	101	7,4	0,6	0,0	0,0	M10	38	58	9,8	5,8	0,0	0,0
M2	68	82	7,7	8,0	0,1	0,0	M11	58	64	6,6	5,6	0,0	0,0
M3	41	49	10,3	4,5	-0,1	0,0	M12	85	120	2,8	8,3	0,0	0,0
M4	39	54	6,0	4,0	0,1	0,0	M13	32	36	10,0	2,1	0,1	0,0
M5	13	30	3,6	11,1	-0,1	0,0	M14	39	43	1,0	9,3	0,3	0,3
M6	16	26	6,4	8,2	0,3	0,0	M15	35	46	8,8	1,8	0,2	0,2
M7	17	17	3,1	3,1	0,2	0,2	M16	7	7	2,8	2,8	1,4	1,4
M8	5	5	10,0	10,0	-0,2	-0,2	M17	14	14	5,5	5,5	0,2	0,2
M9	28	28	9,3	9,3	0,0	0,0	M18	37	37	4,8	4,8	0,1	0,1

Mist.: Misturas; CV: Coeficiente de variação; Expan.: Expansão CBR.

Fonte: Resultado da pesquisa.

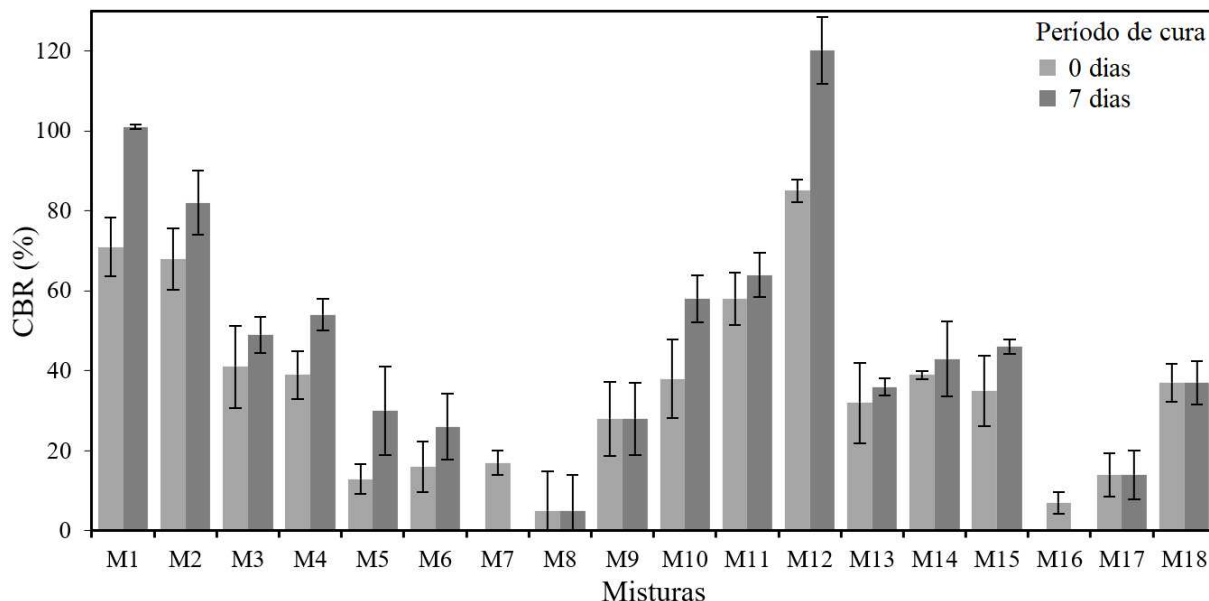
As Figuras 3.9 e 3.10 apresentam, graficamente, os valores médios dos parâmetros RCS e CBR das amostras de solo tratadas com os vários teores de RCCr e FEAE após as curas de 0 e 7 dias.

Figura 3.9: Valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Figura 3.10: Valores médios do índice CBR das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Conforme os valores observados, os solos *in natura*, após a adição dos resíduos e o processo de cura selada, apresentaram incrementos nos valores de RCS e CBR em praticamente todas as misturas investigadas. Os valores de RCS observados nas composições solo-resíduos variaram de 71,47 kPa (ao 0 dia) a 834,89 kPa (aos 7 dias), para as misturas com S1, e de 68,43 kPa (ao 0 dia) a 544,74 kPa (aos 7 dias), para as misturas com S2. Já os valores de CBR das amostras de S1 e S2 tratadas com os resíduos variaram de 5% (ao 0 dia) a 101% (aos 7 dias) e 14% (ao 0 dia) a 120% (aos 7 dias), respectivamente. Os destaques são as misturas M1 (80%S1 + 0%RCCr + 20%FEAE) e M12 (18%S2 + 62%RCCr + 20%FEAE), que registraram os maiores valores de RCS e CBR.

Os ganhos de resistência observados nos solos após as adições dos resíduos e processo de cura selada, podem ser atribuídos às seguintes razões: (i) melhoria das características granulométricas dos solos devido à incorporação do RCCr. Por consequência, o uso de estabilizadores hidráulicos, como o FEAE, em solos granulares, é mais efetivo do que em solos finos, levando a maiores ganhos de resistência mecânica (FIROOZI et al., 2017; SOUZA et al., 2020; LOPES et al., 2022); (ii) troca de cátions entre os íons Ca^{2+} presentes no FEAE e íons presentes nas superfícies das partículas dos solos. Tal reação resulta na aglomeração e floculação das partículas dos solos no estágio inicial de cura, tornando-os mais granulares e menos plásticos e, portanto, colaborando na resistência ao atrito da matriz do solo (MUJTABA et al., 2018; PARS AEI et al., 2021); (iii) devido às reações pozolânicas que ocorrem entre os íons Ca^{2+} do FEAE e a sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3) presentes nos solos e no RCCr, formando géis de silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratados (CAH), agentes importantes para o incremento da resistência mecânica em misturas solo-escória (SALIMI et al., 2020; PARS AEI et al., 2021).

3.3.4 Ajuste dos modelos e otimização

Os modelos de regressão para as respostas RCS e CBR, obtidos a partir do projeto de mistura e considerando um nível de significância de 10% (P-valor < 0,10), são apresentados na Tabela 3.9. A magnitude e o sinal de cada coeficiente estimado nas equações de regressão indicam o efeito de cada componente no modelo, bem como as correlações entre eles.

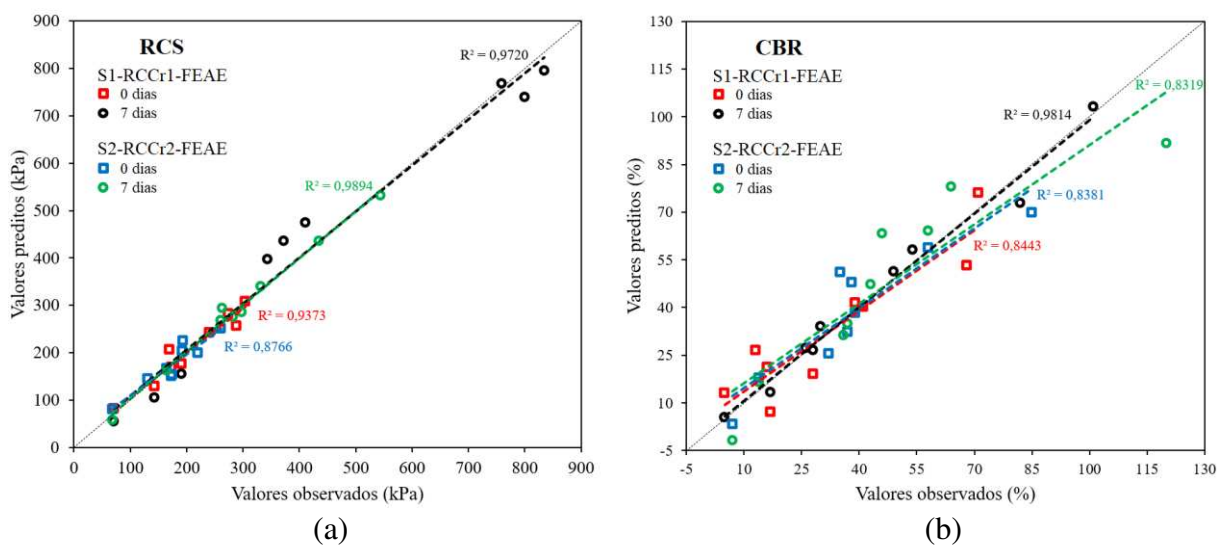
Tabela 3.9: Equações de regressão relacionadas às propriedades RCS e índice CBR.

Equações de regressão do sistema S1-RCCr1-FEAE	R ²	R ² _{aj.}	DP
RCS ₀ (kPa) = 176,31S – 32,94R + 839,82E	0,94	0,92	22 kPa
RCS ₇ (kPa) = 154,80S – 67,24R + 3357,96E	0,96	0,94	57 kPa
CBR ₀ (%) = 7,05S + 34,04R + 351,62E – 1546,99SRE	0,84	0,75	12 %
CBR ₇ (%) = 13,32S + 200,03R + 462,35E – 286,03SE – 1181,42RE	0,98	0,96	6 %
Equações de regressão do sistema S2-RCCr2-FEAE	R ²	R ² _{aj.}	DP
RCS ₀ (kPa) = 251,24S + 43,83R – 6,65E + 1594,12RE – 2918,54SRE	0,88	0,75	27 kPa
RCS ₇ (kPa) = 267,72S + 11,49R + 2887,96E – 2827,79SE	0,99	0,98	18 kPa
CBR ₀ (%) = 3,28S + 38,77R + 226,03E	0,84	0,78	11 %
CBR ₇ (%) = – 1,73S + 42,86R + 327,24E	0,83	0,78	16 %

S: proporção de S1 ou S2 na mistura; R: proporção de RCCr1 ou RCCr2 na mistura; E: proporção de FEAE na mistura; R²: coeficiente de determinação; R²_{aj.}: coeficiente de determinação ajustado; DP: desvio padrão da discrepância entre os valores preditos pelos modelos e os valores observados experimentalmente em laboratório.
Fonte: Resultado da pesquisa.

Utilizando os modelos expressos na Tabela 3.9, foram gerados gráficos dos valores de RCS e CBR preditos pelos modelos e os observados experimentalmente em laboratório, a fim de se verificar, visualmente, o ajuste dos dados. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 3.11.

Figura 3.11: Gráficos exibindo, para as misturas investigadas, os valores de RCS e CBR preditos pelos modelos e os observados experimentalmente em laboratório.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Conforme constatado na Figura 3.11, os modelos apresentaram alto coeficiente de determinação ($R^2 \geq 0,83$) e os pontos se distribuíram nas vizinhanças da reta diagonal correspondente aos valores preditos = valores observados. Esse padrão de distribuição é característico de modelos com bom poder preditivo. Entretanto, observou-se, para os valores de CBR, uma maior dispersão dos dados (Figura 3.11b). Segundo Leite et al. (2011), o ensaio CBR costuma ser um teste dispersivo com uma repetibilidade bastante difícil. De fato, percebe-se, conforme os valores apresentados nas Tabelas 3.6 e 3.7, que os coeficientes de variação dos valores de CBR foram, em média, 42% (0 dia) e 33% (7 dias) maiores que os coeficientes de variação observados nos valores obtidos nos ensaios de RCS.

A partir dos resultados obtidos, um sistema de inequações, formado pelas equações de regressão (Tabelas 3.9) e restrições impostas pelas normas técnicas ASTM D 4609 (ASTM, 2008) e DNIT 139-ES (DNIT, 2010b), foi determinado. As restrições impostas para as misturas foram: (i) após 7 dias de cura, apresentar incremento mínimo de 345 kPa nos valores de RCS; (ii) CBR maior que 20%. Obtidas as regiões otimizadas, a função Desejabilidade foi empregada para determinar a dosagem que maximiza as propriedades mecânicas RCS e CBR nos sistemas S1-RCCr1-FEAE e S2-RCCr2-FEAE.

A função Desejabilidade indicou como composições otimizadas as misturas M1 e M12. A Tabela 3.10 apresenta, para as misturas otimizadas, os valores de Desejabilidade individual e composta obtidos para as propriedades mecânicas de interesse.

Tabela 3.10: Desejabilidade individual e composta.

Propriedade mecânica maximizada	Desejabilidade individual		Valores obtidos	
	M1	M12	M1	M12
Incremento de RCS (kPa)	0,75	0,81	486	345
CBR ao 0 dia (%)	1,00	0,74	76	70
CBR aos 7 dias (%)	1,00	0,70	103	92
Desejabilidade composta	0,91	0,77	-	-

Fonte: Resultado da pesquisa.

Analisando-se os resultados da Tabela 3.10, é possível observar que a Desejabilidade composta é maximizada quando as respostas RCS e CBR se aproximam de suas especificações. Os valores da Desejabilidade composto e individual demonstram que o processo foi eficiente, pois seus índices se encontram muito próximos à condição ótima (1,0).

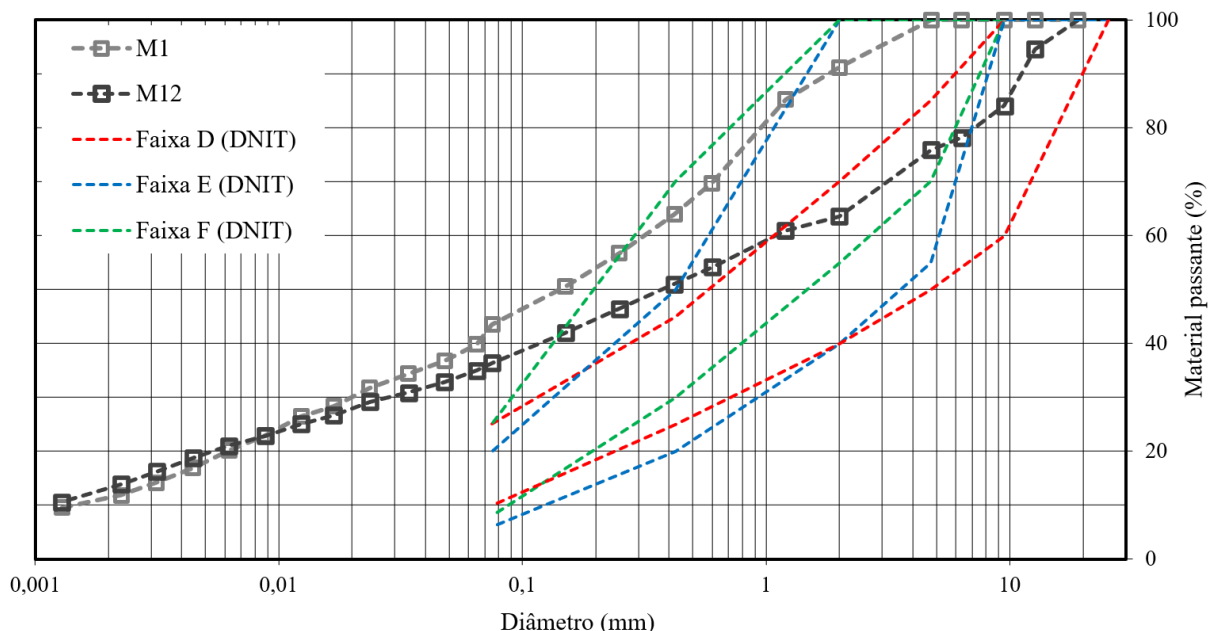
3.3.5 Caracterização das misturas otimizadas

Com objetivo de investigar os efeitos das reações pozolânicas de médio prazo, as misturas otimizadas M1 e M12 foram submetidas aos ensaios de RCS e CBR após período de cura selada de 28 dias. Amostras dos solos *in natura* e das misturas M1 e M12 foram avaliadas quanto ao seu comportamento resiliente. As amostras de S1 e S2 foram testadas imediatamente após a compactação, enquanto as misturas M1 e M12 foram submetidas aos períodos de cura de 7 e 28 dias antes dos ensaios de MR. As características físicas, mineralógicas e microestruturais das misturas também foram determinadas.

3.3.5.1 Caracterização física das misturas otimizadas

A Figura 3.12 apresenta as curvas granulométricas das misturas M1 e M12.

Figura 3.12: Curvas granulométricas de M1 e M12.



Fonte: Resultado da pesquisa.

A Tabela 3.11 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física para as misturas M1 e M12.

Tabela 3.11: Caracterização física das misturas M1 e M12.

Parâmetros	Mistura	
	M1	M12
% argila ($\emptyset \leq 0,002$ mm)	11	13
% silte ($0,002$ mm $\leq \emptyset \leq 0,06$ mm)	27	21
% areia fina ($0,06$ mm $\leq \emptyset \leq 0,2$ mm)	15	10
% areia média ($0,2$ mm $\leq \emptyset \leq 0,6$ mm)	16	10
% areia grossa ($0,6$ mm $\leq \emptyset \leq 2,0$ mm)	22	9
% pedregulho ($\emptyset \geq 2,0$ mm)	9	37
D10 (mm)	0,001	0,001
D30 (mm)	0,021	0,030
D60 (mm)	0,310	1,100
Limite de liquidez (%)	24	22
Índice de plasticidade (%)	9	4
Coefficiente de curvatura	1,4	0,8
Classificação TRB	A-4(1)	A-2-4(0)
Classificação USC	SW-SC	SM
Classificação MCT	LA'	NA'
Wot (%)	EN/EI	12,65/11,43
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	EN/EI	19,22/19,84

EN: Energia normal; EI: Energia intermediária.

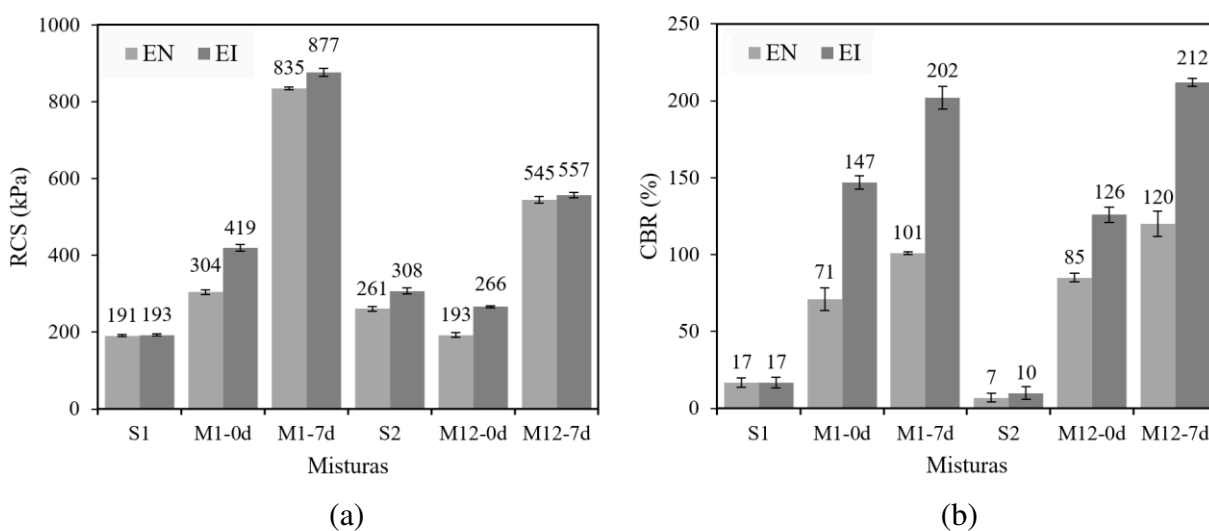
Fonte: Resultado da pesquisa.

Para os dados apresentados, observa-se que: (i) a incorporação do RCCr2 ao S2 reduziu a proporção de finos e cresceu a fração areia do material, resultando em uma mistura com melhor distribuição granulométrica; (ii) as curvas granulométricas das misturas são mais contínuas, de modo que os grãos finos preenchem os espaços vazios existentes entre os grãos grossos, estabilizando o solo; (iii) o alto teor de RCCr2 (62%) na M12 reduziu em 78% o índice de plasticidade do S2, mudando o solo de alta para baixa plasticidade; (iv) pela classificação TRB (AASHTO, 2021), espera-se para materiais A-4(1) (M1) e A-2-4(0) (M12), os comportamentos de ruim e excelente, respectivamente, como subleito de estradas; (v) solos LA' (M1) e NA' (M12) tendem a apresentar bom comportamento mecânico quando adequadamente compactados, podendo servir para compor camada de base de pavimentos (NOGAMI, VILLIBOR, 1995). Segundo o DER-PR (2005b), solos classificados como LA' e NA' são bons materiais para utilização em revestimento primário de vias não pavimentadas.

3.3.5.2 RCS, CBR e MR

Os resultados de RCS e CBR dos solos e das misturas otimizadas são apresentados na Figura 3.13. As energias de compactação Proctor normal e intermediária foram utilizadas.

Figura 3.13: Valores médios de RCS (a) e CBR (b) dos solos e misturas M1 e M12 nas curas de 0 e 7 dias, compactadas nas energias do Proctor normal e intermediária.



EN: Energia normal; EI: Energia intermediária.
Fonte: Resultado da pesquisa.

Os dados demonstraram que a capacidade de carga das misturas aumenta quando o esforço de compactação aumenta e que há um incremento de resistência, em ambas as misturas, após os 7 dias de cura, ocasionado pelas propriedades cimentícias do FEAE. Os maiores valores de RCS foram observados em M1 na idade de 7 dias, que apresentou um aumento de 644 kPa, na energia normal, e 684 kPa, na energia intermediária (M1-7d), comparativamente a RCS de S1. Para M12, observou-se na RCS um aumento de 284 kPa, na energia normal, e 249 kPa, na energia intermediária, aos 7 dias (M12-7d), comparativamente a RCS de S2. Os incrementos de resistência observados em M1 foram, em média, 2,5 vezes superiores aos incrementos de resistência verificados em M12. No entanto, M12 foi consideravelmente bem estabilizada pelo FEAE, apresentando, aos 7 dias de cura, valores médios de RCS 1,9 vezes maiores que os observados em S2; neste caso, a eficiência do FEAE foi significativa. Por ser M1 classificada

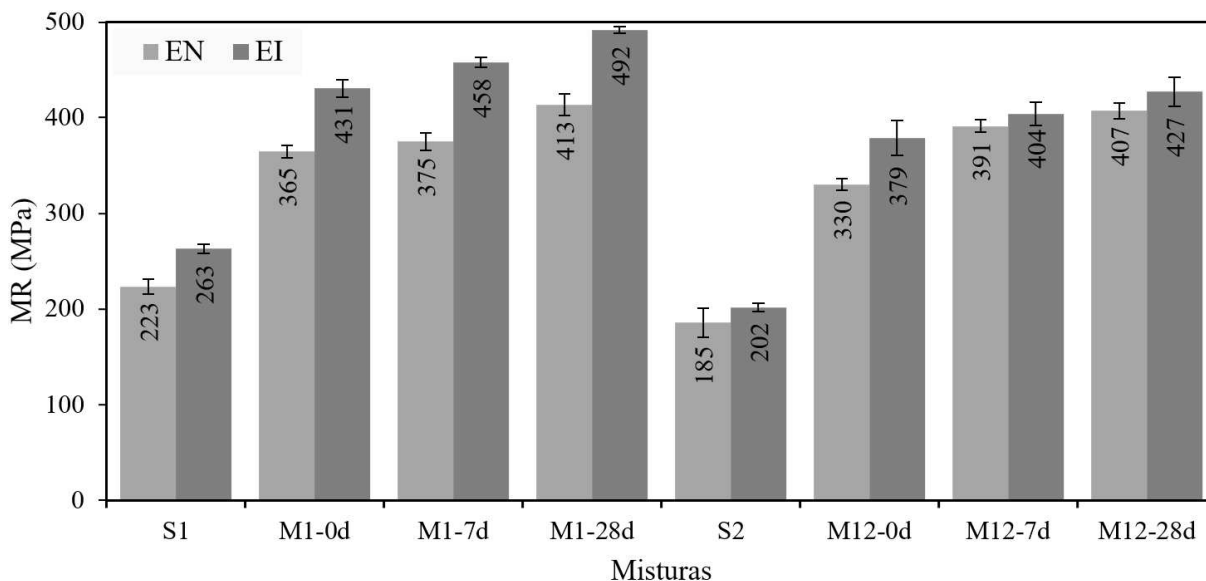
como A-4(1) e M12 como A-2-4(0), esperava-se que M12, material mais granular, apresentasse os maiores ganhos de resistência. Tal fato pode estar relacionado à alta porosidade do RCCr presente em maior quantidade na M12 (62% de RCCr2). Essa elevada porosidade, ocasionada pelos resíduos de argamassa e concreto presentes no RCCr, pode ocasionar carreamento das minúsculas partículas do FEAE para dentro da matriz do RCCr, reduzindo a sua eficiência como agente estabilizante. Em solos granulares, a hidratação de silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio de FEAE tende a criar pontes de contato intergranulares, levando a maiores valores de resistência devido ao aumento da coesão do material (SALIMI et al., 2020; PARSAEI et al., 2021). A formação desses compostos é relativamente rápida, ocorrendo algumas horas depois que a água e o FEAE são misturados (FIROOZI et al., 2017). Esse ganho de resistência em solos granulares tem se mostrado mais eficaz, pois são necessárias menores quantidades de FEAE (ORTEGA-LÓPEZ et al., 2014; LOPES et al., 2022).

Importante observar que a mistura M10 (80%S2 + 20%FEAE) apresentou, aos 7 dias de cura (energia normal), uma RCS de 332 kPa (Tabela 3.7), valor 1,6 vezes menor que a RCS de M12-7d (545 kPa). Isso evidencia a importância do RCCr na melhora da resistência mecânica observada na M12. Comparativamente a outros estudos, Souza et al. (2020) observaram uma RCS de 1549 kPa aos 7 dias de cura em um solo A-7-5 tratado com 50% de RCC e 6% de cimento Portland. REIS et al. (2014), observaram uma RCS de 2770 kPa após 7 dias de cura de uma mistura composta por 50% de RCC e 50% de argila silto-arenosa (A-7-5) melhorada com 6% de cimento Portland.

A Figura 3.13 (b) apresenta os resultados experimentais do ensaio CBR dos solos e das misturas M1 e M12 nas curas de 0 e 7 dias. O maior valor de CBR (212%) foi observado para a mistura M12 na idade de 7 dias na energia intermediária de compactação. Observa-se, pelos resultados, que o valor do CBR aumenta consideravelmente com o maior esforço de compactação e que o FEAE atua no incremento do CBR com o tempo de cura. Para cura de 7 dias, a M1 apresentou valores de CBR 5,9 (energia normal) e 11,9 (energia intermediária) vezes maiores do que os observado em S1. No mesmo período, a M12 aumentou em 17,1 vezes, na energia normal, e 21,2 vezes, na energia intermediária, a capacidade de suporte CBR do S2. Ambas as misturas apresentaram, nas idades de 0 e 7 dias, Expansão CBR inferiores a 0,5%. A baixa expansão observada em M1 e M12 pode ser atribuída às reações de troca iônica dos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} presentes no FEAE e os argilominerais presentes nos solos. Esses cátions induzem a redução da dupla camada difusa, permitindo a aglutinação das partículas de argila. Assim, os solos perdem suas propriedades coesivas e passam a se comportar como materiais granulares com melhores propriedades geotécnicas, com reduções do índice de plasticidade e da propensão a expansão (ORTEGA-LÓPEZ et al., 2014; SALIMI et al., 2020). À exceção do M1-0d na energia normal de compactação, todos os tratamentos aplicados melhoraram os solos para valores de CBR aceitáveis no emprego como material de base ($\text{CBR} \geq 80\%$) de camadas estruturais de pavimentos flexíveis (DNIT, 2010a). Outro fato observado foi o incremento percentual de resistência obtido pelas misturas, nos valores de CBR aos 7 dias, muito superiores aos observados no ensaio de RCS.

A Figura 3.14 apresenta os valores médios de MR de corpos de prova compactados na Wot das energias de compactação do Proctor normal e intermediário, nos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias. Um par de tensões médias ($\sigma_3 = 0,05$ MPa e $\sigma_d = 0,10$ MPa) foi selecionado do método de ensaio DNIT 134-ME (DNIT, 2018), para fins de comparação. Segundo Santos et al. (2019), esses pares de tensão representam um possível estado de tensão atuando em subleitos de rodovias.

Figura 3.14: Valores médios de MR ($\sigma_3 = 0,05$ MPa; $\sigma_d = 0,10$ MPa) dos solos e misturas M1 e M12 nas curas de 0, 7 e 28 dias, compactadas nas energias do Proctor normal e intermediária.



EN: Energia normal; EI: Energia intermediária.

Fonte: Resultado da pesquisa.

A Tabela 3.12 apresenta os parâmetros do modelo composto e valores de MR calculados.

Tabela 3.12: Parâmetros do Modelo Composto e MR ($\sigma_3 = 0,05$ MPa; $\sigma_d = 0,10$ MPa) das misturas investigadas.

Energia de Compactação	Material	k_1	k_2	k_3	R ²	MR (MPa)
Normal	S1	873,15	0,41	0,06	0,92	223
	S2	275,33	0,19	-0,07	0,74	185
	M1-0d	1.703,82	0,23	0,38	0,90	365
	M1-7d	568,93	0,06	0,11	0,70	375
	M1-28d	1.028,77	0,16	0,19	0,86	413
	M12-0d	1.542,63	0,23	0,38	0,90	330
	M12-7d	1.125,68	0,15	0,26	0,81	391
	M12-28d	1.493,75	0,18	0,33	0,95	407
	Intermediária	S1	948,70	0,33	0,12	0,96
S2		357,94	0,22	-0,03	0,77	202
M1-0d		1.428,19	0,32	0,11	0,84	431
M1-7d		751,30	0,14	0,04	0,74	458
M1-28d		1.506,96	0,16	0,28	0,94	492
M12-0d		1.143,05	0,19	0,22	0,92	379
M12-7d		934,94	0,17	0,15	0,78	404
M12-28d		1.274,49	0,24	0,16	0,96	427

Fonte: Resultado da pesquisa.

Conforme ilustra a Figura 3.14, o módulo de resiliência aumentou com o incremento da energia de compactação e o tempo de cura, com a M1 apresentando os maiores valores de MR. Os resultados também revelaram um aumento significativo nos valores de MR devido à maior rigidez fornecida pelos FEAE. Para a M1, os MR variaram, nos distintos tempos de cura, entre 365–413 MPa e 431–492 MPa nas energias de compactação normal e intermediária,

respectivamente. Na M12, observou-se uma variação de 330–407 MPa e 379–427 MPa nas energias normal e intermediária de compactação, respectivamente. Consequentemente, usando um esforço de compactação mais intenso, o comportamento resiliente das misturas revelaram um maior aumento de rigidez ao longo do tempo. Conforme observa-se nos dados da Tabela 3.12, a incorporação dos resíduos nos solos proporcionou, em média, aumentos nos valores de MR, aos 0, 7 e 28 dias, da ordem de 63%, 71% e 86%, para o S1, e de 83%, 106% e 116%, para o S2, respectivamente. Os incrementos nos valores de MR ocorreram, principalmente, após a adição dos resíduos aos solos.

Em outro estudo com os mesmos solos e FEAE aqui utilizados, Lopes et al. (2022) observaram, para 15% de adição de FEAE aos solos e após 28 dias de cura, um MR de 352 MPa, para S1, e 320 MPa, para S2. Segundo esses autores, a adição de 15% de FEAF melhorou consideravelmente o comportamento resiliente de ambos os solos, uma vez que aumentos de 45% e 30% foram observados no MR dos solos S1 e S2, respectivamente. Esses valores corroboram a capacidade do RCCr em melhorar as características mecânicas do S2, quando utilizado concomitantemente com os FEAE. Lopes et al. (2023), também analisaram o uso de finos de escória de forno panela (*ladle furnace* [LF]) na estabilização de S1 e S2. Os resultados obtidos apresentaram incrementos significativos nos valores de MR de ambos os solos contendo finos de escória, uma vez que a aplicação do teor de 15% de LF aumentou a MR dos solos S1 e S2 em, aproximadamente, 116% e 125%, respectivamente. Os MR obtidos, após cura selada de 28 dias, foram de 523 MPa, para S1+15%LF, e 556 MPa, para S2+15%LF. Segundo os autores, os benefícios obtidos podem ser atribuídos, principalmente, a melhorias nas reações cimentícias, capacidade de troca de cátions e efeito de enchimento fornecido pelos finos de escória de forno panela.

Leite et al. (2011), estudando o comportamento resiliente de um agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil, obtiveram, na energia do Proctor intermediária de compactação, um MR de 230 MPa e, na energia do Proctor modificada, um MR de 277 MPa. Com base nesses resultados, os autores inferiram que os MR observados para o agregado reciclado são semelhantes aos esperados para brita. Concluíram que, provavelmente, isso é explicado pelo maior ângulo de atrito interno observado nesse tipo de material, o que contribui para melhorar a resistência ao cisalhamento.

Lima et al. (2017), estudando o comportamento resiliente de uma brita graduada simples, material comumente utilizado como base e sub-base de pavimentos flexíveis, observaram, na energia do Proctor modificada, valores de MR de 251–355 MPa.

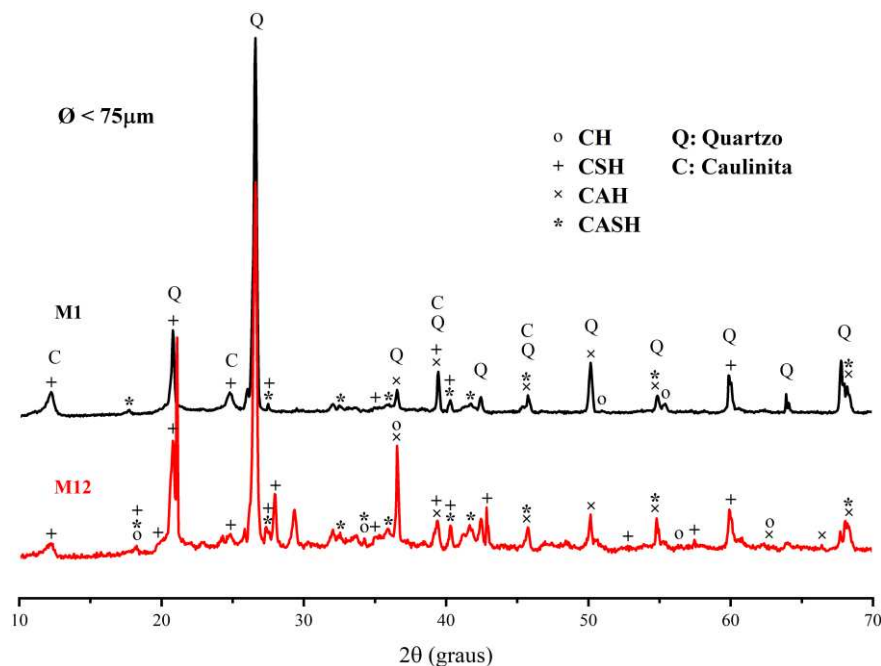
Conforme os valores de MR observados nos estudos anteriormente discutidos, observa-se o destacado desempenho do RCCr e dos FEAE na estabilização de S1 e S2 após as curas de 7 e 28 dias.

Pelos resultados obtidos (Figuras 3.13 e 3.14), é possível constatar que o incremento observado no MR não foi tão expressivo quanto o verificado no valor CBR, assemelhando-se mais ao comportamento observado no ensaio de RCS. Segundo Leite et al. (2011), embora a mesma energia de compactação tenha sido utilizada em ambos os experimentos, alguns fatos podem ter contribuído para o incremento diferenciado observado entre os ensaios de MR e CBR, como segue: (i) os corpos de prova CBR permanecem imersos em água durante 96h antes da realização dos ensaios (ii) a tensão de confinamento no teste CBR não é representativa da tensão de confinamento observada em campo, como a aplicada durante o procedimento de ensaio do módulo de resiliência, e (iii) os deslocamentos medidos no teste de módulo de resiliência estão na região elástica, mas o mesmo não é observado no ensaio CBR.

3.3.5.3 Caracterização mineralógica e morfológica das misturas otimizadas

Uma análise mineralógica por DRX foi realizada em amostras de M1 e M12 aos 28 dias de cura. As amostras foram cominuídas até passarem integralmente na peneira de n.º 200 (#75 μm). Os difratogramas são apresentados na Figura 3.15.

Figura 3.15: Difratogramas de M1 e M12 aos 28 dias de cura.



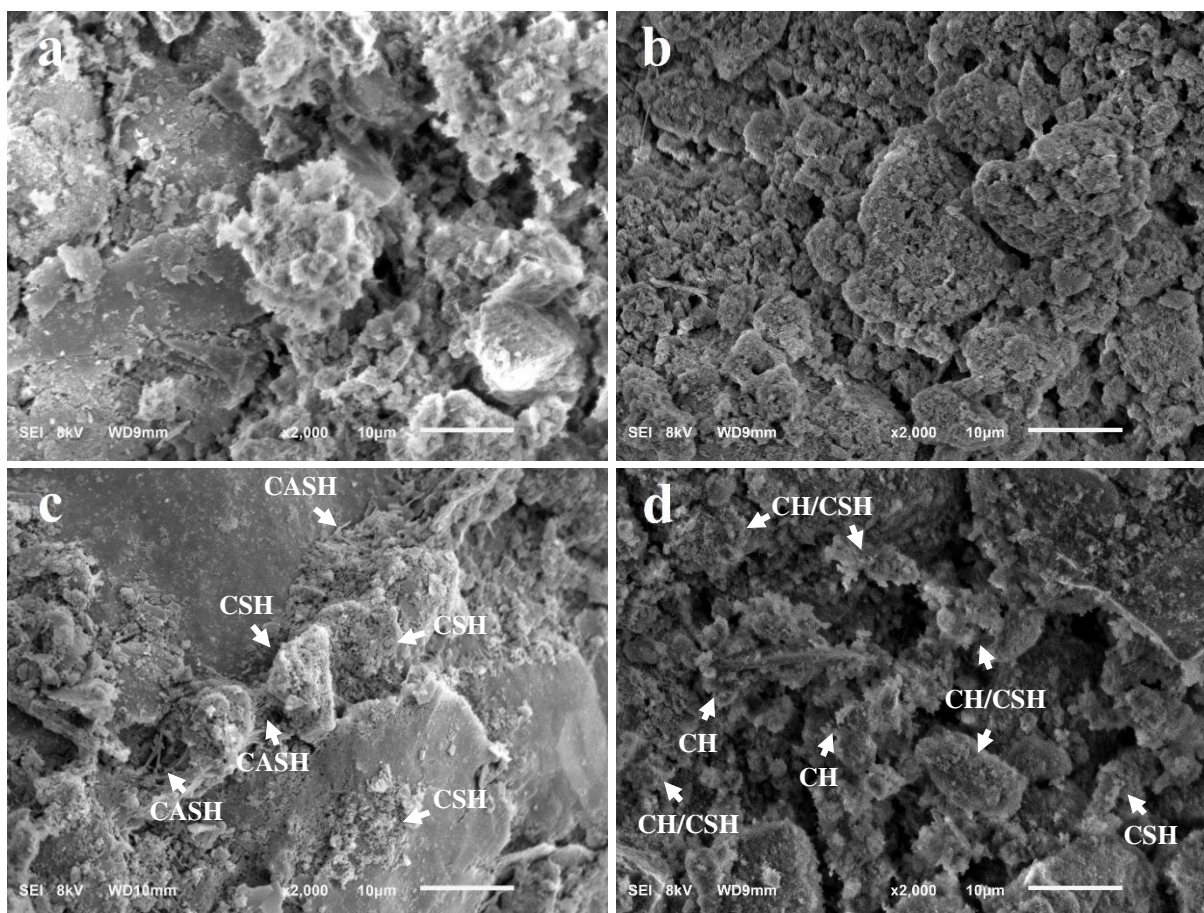
Fonte: Resultado da pesquisa.

Os padrões de DRX (Figura 3.15) das misturas M1 e M12 indicaram picos de cristalinidade de hidróxido de cálcio (CH), silicato de cálcio hidratado (CSH), aluminato de cálcio hidratados (CAH) e sílico-aluminato de cálcio hidratado (CASH). O CSH e o CAH são conhecidos produtos resultantes das reações primárias de hidratação do cimento Portland, sendo um dos principais responsáveis pelo ganho de resistência em misturas solo-cimento (FIROOZI et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2019). Segundo Mozejko e Francisca (2020), quando a água é adicionada nas composições de solos e finos de escória, o processo de hidratação irá promover a formação dos compostos de CSH e CAH e o excesso de hidróxido de cálcio (portlandita) será liberado. A formação de CSH e CAH ocorre nas fases iniciais, com formação de cristais algumas horas depois que a água é adicionada à composição solo-escória. Os cristais continuarão a se formar enquanto as partículas de escória que não reagiram e a água livre permanecerem na mistura (ISMAIL et al., 2018). O CASH (etringita), também gerado durante a fase de hidratação do cimento, é um mineral expansivo que se desenvolve na presença de sulfato, cálcio e alumínio e em elevados valores de pH (REZENDE et al., 2017). A etringita é responsável por incrementos na resistência de solos tratados com estabilizantes hidráulicos e por ocupar vazios à medida que se expande (OLIVEIRA et al., 2019; PARSAEI et al., 2021). Estes compostos, aqui identificados, também foram observados em outros estudos envolvendo misturas solo-escória (ISMAIL et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019; WU et al., 2019; MOZEJKO, FRANCISCA, 2020; PARSAEI et al., 2021).

Presume-se, portanto, que o ganho de resistência observado nas misturas solo-resíduos estudadas é ocasionado, principalmente, em função dos componentes cimentícios presentes nos

FEAE. Com objetivo de avaliar os processos de estabilização das misturas solo-resíduos e identificar a formação de compostos cimentantes identificados no ensaio de DRX, uma análise microestrutural foi realizada pela técnica de MEV em amostras de M1 e M12 aos 28 dias de cura. As Figuras 3.16 apresenta os resultados obtidos.

Figura 3.16: Fotomicrografias de M1 e M12 obtidas por MEV: (a) organização microestrutural de M1 ao 0 dia de cura, apresentando detalhe de foliações e partículas lamelares dispersas; (b) organização microestrutural de M12 ao 0 dia de cura, apresentando detalhe de partículas dispersas; (c) organização microestrutural de M1 aos 28 dias de cura, exibindo uma distribuição de grãos mais coesa e formação dos compostos cimentantes de CSH e CASH aderidas à superfície das partículas; (d) organização microestrutural de M12 aos 28 dias de cura, exibindo uma composição mais densa e formação dos compostos cimentantes de CH e CSH aderidas à superfície das partículas.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Conforme observar-se na Figura 3.16, na cura de 0 dia (Figura 3.16a e 3.16b) a microestrutura das misturas apresenta partículas com baixa ligação intergranular, a dispersão observada é ampla e as ligações entre elas é fraca. Após 28 de cura (Figura 3.16c e 3.16d), partículas grandes se entrelaçam mutuamente e os limites de contato entre as partículas ficam menos nítidos. Os bastonetes de etringita (CASH), as formações de produtos de aspecto esponjosos (CSH) e as folhas de gel (CH) são observadas, em quantidades substanciais, aderidas à superfície das partículas de solo/RCCr. Os produtos de hidratação observados são consistentes com os resultados de DRX obtidos (Figura 3.15). Observa-se que a microestrutura das misturas foi completamente alterada. Os compostos cimentantes, resultantes do processo de hidratação dos FEAE, espalham-se na superfície das partículas e preenchem os espaços

vazios, formam aglomerações, preenchem os poros intergranulares e estabelecem ligações fortes entre os grãos constituintes das misturas. Portanto, com base na investigação realizada pela técnica de DRX e MEV, observa-se que quando um aditivo como os FEAE é usado, a natureza dispersiva do solo e/ou RCCr diminui e sua resistência aumenta. Essa estrutura esquelética densa proporciona, no curto prazo, os ganhos de resistência mecânica observados nos ensaios de RCS, CBR e MR.

3.4 Conclusão

Neste estudo apresentam-se os ensaios experimentais que avaliaram a influência da incorporação de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil e finos de escória oxidante de aciaria elétrica no processo de estabilização de dois solos tropicais típicos da Zona da Mata Mineira, Estado de Minas Gerais, Brasil. Com base nos resultados, as principais conclusões desta pesquisa são:

- i. a utilização do delineamento de misturas pela metodologia de Planejamento de Experimentos e análise por superfícies de resposta mostrou-se adequada para o estudo de composições solo-resíduos, possibilitando a obtenção de modelos matemáticos ajustados e estatisticamente significativos que descrevem adequadamente o comportamento das respostas RCS e CBR em função dos fatores solo, RCCr e FEAE;
- ii. comparativamente aos solos *in natura*, as adições de RCCr e FEAE contribuíram significativamente para o ganho de resistência mecânica das misturas estudadas, sendo que o FEAE foi o principal responsável no ganho de resistência com o incremento do tempo de cura;
- iii. para as composições S1-RCCr1-FEAE, a mistura otimizada foi de 80% de solo arenoso, 0% de RCCr1 e 20% de FEAE. Para as composições S2-RCCr2-FEAE, a mistura otimizada foi de 18% de solo argiloso, 62% de RCCr2 e 20% de FEAE;
- iv. a adição de 20% de FEAF e o incremento da energia de compactação melhorou o comportamento mecânico de ambos os solos, uma vez que aumentos de RCS, CBR e MR consideráveis foram observados nas curas de 7 e 28 dias;
- v. para as misturas otimizadas compactadas na energia do Proctor normal, os incrementos nos valores de RCS e CBR observados após 7 dias de cura, foram de 175% e 42%, para M1, e 182% e 41%, para M12, respectivamente;
- vi. para as misturas otimizadas na energia do Proctor intermediária, os incrementos de RCS e CBR observados após 7 dias de cura, foram de 109% e 37%, para M1, e 109% e 68%, para M12, respectivamente;
- vii. a incorporação dos resíduos nos solos proporcionou, em média, aumentos nos valores de MR, aos 0, 7 e 28 dias de cura, da ordem de 63%, 71% e 86%, para o S1, e de 83%, 106% e 116%, para o S2, respectivamente;
- viii. as misturas de S1-RCCr1-FEAE e S2-RCCr2-FEAE apresentaram, quanto ao índice CBR, nos tempos de cura 0, 7 e 28 dias, composições que atendem aos critérios do DNIT concernentes à parâmetros CBR exigíveis para execução de camadas de base, sub-base e reforço de subleito de pavimentos rodoviários;

- ix. a adição de FEAE e o processo de hidratação levaram à formação de produtos cimentícios. Os ensaios de DRX e MEV das misturas otimizadas tratadas com 20% de FEAE, confirmaram a existência de produtos de reação pozolânicas, como hidróxido de cálcio, silicato de cálcio hidratado e sílico-aluminato de cálcio hidratado.

Este estudo demonstrou que o processo de estabilização de solos é propício ao aproveitamento de resíduos da construção civil e escória de forno elétrico a arco, apresentando uma alternativa viável de uso e destinação para esses materiais. De maneira geral, os resultados desta pesquisa contribuem no entendimento do potencial de aproveitamento dos resíduos aqui utilizados para melhoria, via processo de estabilização química e/ou granulométrica, das propriedades de engenharia de solos tropicais arenosos e argilosos. No contexto ambiental, a reposição parcial do solo contribui para uma destinação mais adequada dos resíduos da construção civil e escória de forno elétrico a arco, oferecendo uma alternativa mais sustentável para a estabilização de solos. A reciclagem de subprodutos das indústrias da construção civil e siderúrgica e a substituição de estabilizadores de solo convencionais (cimento Portland e agregados naturais), reduz a necessidade de exploração dos recursos naturais. Não obstante, pesquisadores estão trabalhando constantemente na busca de materiais duradouros, econômicos e ecologicamente corretos com vistas a minimizar o uso de aditivos à base de cálcio na melhoria das propriedades de engenharia de solos com baixa capacidade de suporte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: a global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, 2018.
- ALANEME, G. U.; ATTAH, I. C.; ETIM, R. K.; DIMONYEKA, M. U. Mechanical properties optimization of soil-cement kiln dust mixture using extreme vertex design. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 15, p. 719-750, 2022.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS: **AASHTO M 145-91**. Standard specification for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. 2021, 10p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM D 2487-17e1**. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, Pensilvânia, 2017. 10p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM D 4609**. Evaluating effectiveness of chemicals for soil stabilization. ASTM International, Pensilvânia, 2008. 5p.
- AMHADI, T. S.; ASSAF, G. J. Overview of soil stabilization methods in road construction. In: EL-BADAWY, S.; VALENTIN, J. **Sustainable Solutions for Railways and Transportation Engineering**. GeoMEast 2018. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, 2019.
- ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M. M.; BO, M. W. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 8, p. 1077-1088, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020. 52p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004a. 21p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos. Rio de Janeiro, 2004b. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019. 3p.
- 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 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016b. 12p.
- 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 6508**: Solo - Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016e. 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, 2016f. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7182**: Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016g. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (n.º 200). Rio de Janeiro, 2012a. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012b. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12023**: Solo-cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012c. 11p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001. 7p.
- 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.
- BEHNOOD, A. Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: a state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. **Transportation Geotechnics**, v. 17, parte A, p. 14-32, 2018.
- BEJA, I. A.; MOTTA, R.; BERNUCCI, L. B. Application of recycled aggregates from construction and demolition waste with Portland cement and hydrated lime as pavement subbase in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 258, 2020.
- BEZERRA, M. A.; SANTELLI, R. E.; OLIVEIRA, E. P.; VILLAR, L. S.; ESCALEIRA, L. A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. **Talanta**, v. 76, n. 5, p. 965-977, 2008.
- BRANCA, T. A.; COLLA, V.; ALGERMISSEN, D.; GRANBOM, H.; MARTINI, U.; MORILLON, A.; PIETRUCK, R.; ROSENDAHL, S. Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. **Metals**, v. 10, n. 3, p. 1-18, 2020.
- BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Sumário Mineral 2017**. Brasília: ANM, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie->

- estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017. Acesso em: 12 fev. 2020.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília- DF, 2002.
- CANDIOTI, L. V.; DE ZAN, M. M.; CÁMARA, M. S.; GOICOECHEA, H. C. Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. **Talanta**, n. 124, p. 123-138, 2014.
- CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de experimentos usando o Statistica**. E-papers Serviços Editoriais: Rio de Janeiro, 2003. 261p.
- CARDOSO, R.; SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. **Waste Management**, v. 49, p. 131-145, 2016.
- CARVALHO, J. M. F. et al. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 397-409, 2019.
- COMMISSION DECISION 2000/532/EC. Commission Decision of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on waste and Council Decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to Article 1(4) of Council Directive 91/689/EEC on hazardous waste. **Official Journal of the European Communities**, L226/3 of 6 September, 2000. 22p.
- CORNELL, J. A. **Experiments with mixtures: designs, models, and the analysis of mixture data**. John Wiley & Sons, 2011. 680p.
- DELONGUI, L.; MATUELLA, M.; NÚÑEZ, W. P.; FEDRIGO, W.; SILVA FILHO, L. C. P.; CERATTI, J. A. P. Construction and demolition waste parameters for rational pavement design. **Construction and Building Materials**, n. 168, p. 105-112, 2018.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO – DER-SP. **ET-DE-P00/007**: Sub-base ou base de solo-brita-cimento. São Paulo, 2006. 28p.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ – DER-PR. **ES-P-14/05**: Pavimentação: solo-cal-cimento. Curitiba, 2005a. 14p.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ – DER-PR. **ES-T-07/05**: Terraplenagem: revestimento primário. Curitiba, 2005b. 9p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-PRO 003**: Coleta de amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994b. 4p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 258**: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV, Solos, Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994c. 14p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 256**: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão, Solos, Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994d. 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 202**: Solo-cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994e. 7p.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 201**: Solo-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994f. 4p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 180**: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro, 1994a. 11p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-PRO 199**: Redução de amostras de campo de agregados para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 1996a. 5p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-CLA 259**: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996b. 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-PRO 120**: Procedimento – coleta de amostra de agregado. Rio de Janeiro, 1997. 5p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Norma DNER-ME 035**: Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 1998. 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3ª. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 141-ES**: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010a. 9p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Norma 139-ES**: Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010b. 8p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 172-ME**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016. 17p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 134/2018-ME**: Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018a. 18p.
- DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.
- DINIZ, D. H.; de CARVALHO, J. M. F.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Blast oxygen furnace slag as chemical soil stabilizer for use in roads. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n 9, 2017.
- EMMANUEL, E. et al. Simplex lattice strength optimization of lime-micro silica stabilized coir fiber-reinforced soil. **Journal of Natural Fibers**, p. 1-17, 2020.
- FEDRIGO, W.; NÚÑEZ, W. P.; CASTAÑEDA LÓPEZ, M. A.; KLEINERT, T. R.; CERATTI, J. A. P. A study on the resilient modulus of cement-treated mixtures of RAP and aggregates using indirect tensile, triaxial and flexural tests. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 161-169, 2018.

- FERREIRA, R. L. S. et al. Avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina (<150 µm) do agregado reciclado de RCD. **Cerâmica**, v. 65, n. 373, p. 139–146, 2019.
- FIROOZI, A. A.; GUNAY OLGUN, C.; FIROOZI, A. A.; BAGHINI, M. S. Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 8, 2017.
- FUKUDA, I. M. et al. Design of experiments (DoE) applied to pharmaceutical and analytical quality by design (QbD). **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**. v. 54, 2018.
- HALL, M. R.; NAJIM, K.B.; KEIKHAEI DEHDEZI, P. Soil stabilisation and earth construction: materials, properties and techniques. **Modern Earth Buildings**, p. 222-255, 2012.
- IBRAHIM, H. H.; MAWLOOD, Y. I.; ALSHKANE, Y. M. Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 15, n. 4, p. 496-503, 2021.
- IKEAGWUANI, C. C.; NWONU, D. C. Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11, n. 2, p. 423-440, 2019.
- IKECHUKWU, A. F.; HASSAN, M. M.; A. MOUBARAK, A. Resilient modulus and microstructure of unsaturated expansive subgrade stabilized with activated fly ash. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 15, n. 8, p. 915-938, 2021.
- INSTITUTO AÇO BRASIL - IABR. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2018. 84p. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 28 jun. 2019.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – **ISO 13320:2020**. Particle size analysis - Laser diffraction methods, the International Organization for Standardization, 2020. 59p.
- 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**, v. 37, p. 401-411, 2018.
- JAMES O’CONNOR et al. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 419, 126478, 2021.
- JIMÉNEZ, J. R. Applications of recycled aggregates from construction and demolition waste: Recycled aggregates (Ras) for roads. In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V.; LABRINCHA, J.; DING, Y.; BRITO, J. **Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste**. p. 351-377, 2013.
- JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; AGRELA, F.; LÓPEZ, M.; GALVÍN, A. P. Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 58, p. 88-97, 2012.
- KAMBOLE, C.; PAIGE-GREEN, P.; KUPOLATI, W. K.; NDAMBUKI, J. M.; ADEBOJE, A. O. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. **Construction and Building Materials**, n. 148, p. 618-631, 2017.

- KLINSKY, L. M. G.; BARDINI, V. S. dos S.; FABBRI, G. T. P. Efeito da adição de areia de fundição residual e cal a solos argilosos no módulo de resiliência. **Transportes**, v. 22, n. 2, p. 1-10, 2014.
- LEITE, F. da C.; MOTTA, R. dos S.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, n 6, p. 2972-2979, 2011.
- LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; GUIMARÃES, A. C. R. Estudo da deformação permanente de britas granito-gnaiss para uso em base e sub-base de pavimentos. **Transportes**, v. 25, n. 2, p. 41-52, 2017.
- LOPES, E. C. et al. Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n.14, p. 5003-5014, 2022.
- LOPES, E. C. et al. Stabilisation of clayey and sandy soils with ladle furnace slag fines for road construction. **Road Materials and Pavement Design**, v. 24, n. 1, p. 247-266, 2023.
- LUKIANCHUKI, J. A. 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**, v. 39, p. 919-942, 2021.
- MARTINS, A. C. P. et al. Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance. **Construction and Building Materials**, v. 291, 123265, 2021.
- MOREIRA, E. B.; BALDOVINO, J. J. A.; IZZO, R. L. S.; ROSE, J. L. Impact of sustainable granular materials on the behavior sedimentary silt for road application. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, n. 1, p. 917-933, 2020.
- MOZEJKO, C. A.; FRANCISCA, F. M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 239, 117901, 2020.
- MUJTABA, H.; AZIZ, T.; FAROOQ, K.; SIVAKUGAN, N.; DAS, B. M. Improvement in engineering properties of expansive soils using ground granulated blast furnace slag. **Journal of the Geological Society of India**, v. 92, p. 357-362, 2018.
- MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. John Wiley & Sons, 2016. 855p.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995. 240p.
- NOOLU, V.; HEERALAL, M.; PILLAI, R. J. Resilient modulus of clayey subgrade soils treated with calcium carbide residue. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 15, n. 3, p. 288-297, 2021.
- NOVAES, C. G. et al. Otimização de métodos analíticos usando metodologia de superfícies de resposta – Parte I: Variáveis de Processo. **Revista Virtual Química**, v. 9, n. 3, p. 1184–1215, 2017.
- OLIVEIRA, C. F.; PIRES, P. J. M.; TEIXEIRA, J. E. S. L. Physical, mechanical, and microstructure investigation of tropical clayey soils stabilised with desulfurisation slag for pavement application. **Road Materials and Pavement Design**, v. 22, n. 6, p. 1442–1453, 2019.

- ORLANDINI, S.; GOTTI, R.; FURLANETTO, S. Multivariate optimization of capillary electrophoresis methods: A critical review. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, v. 87, p. 290-307, 2014.
- ORTEGA-LÓPEZ, V.; MANSO, J. M.; CUESTA, I. I.; GONZÁLEZ, J. J. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 455-464, 2014.
- PARSAEI, M.; VAKILI, A. H.; SALIMI, M.; FARHADI, M. S.; FALAMAKI, A. 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**, v. 80, n. 8, p. 6303-6320, 2021.
- PARIHAR, N. S.; GUPTA, A. K. Chemical stabilization of expansive soil using liming leather waste ash. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 15, n. 8, p. 1008-1020, 2021.
- PEZO, R. F.; CLAROS, G.; HUDSON, W. R.; STOKOE II, K. H. Development of a reliable resilient modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design. **Research Report 1177-4F**. Austin:Center for Transportation Research, 1992.
- PIRES, P. M.; SUDO LUTIF TEIXEIRA, J. E.; NEPOMUCENO, D. V.; FURIERI, E. C. Laboratory and field evaluation of kr slag-stabilized soil for paving applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 9, 2019.
- PITANGA, H. N.; SILVA, T. O.; SANTOS, A. L.; SILVA, A. C. B.; LIMA, D. C. MCT classification for compacted mixtures of soil-steel slag-fly ash for application in forest roads. **Revista Árvore**, v. 40, n. 5, p. 911-919, 2016.
- POH, H. Y.; GHATAORA, G. S.; GHAZIREH, N. Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, n. 2, p. 229–240, 2006.
- REIS, J. H. C.; SOARES SILVA, S.; ILDEFONSO, J. S.; YSHIBA, J. K. Evaluation of soil, cement and construction and demolition waste (CDW) mixtures for use in road pavement base and sub-base applications. **Key Engineering Materials**, v. 634, p. 247-255, 2014.
- REZENDE, L. R. et al. Laboratory Study of Phosphogypsum, Stabilizers, and Tropical Soil Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 1, 2017.
- SALIMI, M.; ILKHANI, M.; VAKILI, A. H. Stabilization treatment of Na-montmorillonite with binary mixtures of lime and steelmaking slag, **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 14, n. 3, p. 295–301, 2020.
- SOUZA, J. M.; RUDNICK, R. C.; LUKIANTCHUKI, J. A. Evaluation of the incorporation of construction waste (CW) for the stabilization of soil-cement mixtures. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 261-280, 2020.
- SANTOS, T. A.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B.; CERATTI, J. A. P.; BRITO, L. A. T. Avaliação da resistência e da deformação resiliente de quatro solos de subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul. **Transportes**, v. 27, n. 1, p. 48–64, 2019.
- SILVA, T. O.; PITANGA, H. N.; SANTOS, A. L. D.; LIMA, D. C.; SILVA, A. C. B. Use of steel waste for the application in urban paving. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 41, n. 1, 2019.

- SNELLINGS, R., et al. RILEM TC-238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages. **Materials and Structures**, v. 6, n. 51, 2018.
- SOUZA, J. M.; RUDNICK, R. C.; LUKIANTCHUKI, J. A. Evaluation of the incorporation of construction waste (CW) for the stabilization of soil-cement mixtures. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 261-280, 2020.
- VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 103, p. 192–204, 2015.
- VIJAYAN, D. S.; PARTHIBAN, D. Effect of solid waste based stabilizing material for strengthening of expansive soil - A review. **Environmental Technology & Innovation**, v. 20, 101108, 2020.
- WU, J. et al. Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways, **Soils and Foundations**, v. 59, n. 4, p. 955-965, 2019.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. **Public policy paper: Steel industry co-products**. 2020. 8p. Disponível em: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:3d1e2c1e-e306-4bac-a364-3672af7e30b9/Co%2520Products%25202020.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- YILDIRIM, I.; PREZZI, M. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. **Advances in Civil Engineering**, v. 2011, 2011.
- YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Subgrade stabilisation mixtures with EAF steel slag: an experimental study followed by field implementation. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 6, p. 1754–1767, 2022.
- YOOBANPOT, N.; JAMSAWANG, P.; KRAIRAN, K.; JONGPRADIST, P.; LIKITLERSUANG, S. Laboratory investigation of the properties of cement fly ash gravel for use as a column-supported embankment. **Construction and Building Materials**, v. 257, 119493, 2020.
- YUAN, D.; NAZARIAN, S.; HOYOS, L. R.; PUPPALA, A. J. Evaluation and mix design of cement-treated base materials with high content of reclaimed asphalt pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2212, n. 1, p. 110–119, 2011.
- ZHAO, Y.; GOULIAS, D.; TEFA, L.; BASSANI, M. Life cycle economic and environmental impacts of CDW recycled aggregates in roadway construction and rehabilitation. **Sustainability**, v. 13, n. 15, 2021.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE DOIS SOLOS TROPICAIS MELHORADOS COM FINOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.

Resumo

Neste trabalho, a resposta à deformação permanente (DP) de dois distintos solos tropicais estabilizados com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (RCCr) e finos de escória oxidante de aciaria elétrica (FEAE) foi estudada. Os ensaios triaxiais de carga repetidas, sob diferentes estados de tensões, foram realizados com frequência de 2 Hz e 30.000 ciclos de carga. As abordagens de Planejamento de Experimentos, Metodologia de Superfícies de Resposta e função Desejabilidade foram utilizadas na otimização dos teores de solo e resíduos que maximizam as respostas mecânicas das misturas. O método estatístico de dosagem e a otimização das variáveis de resposta, resistência à compressão simples (RCS) e índice CBR (*California Bearing Ratio*), demonstraram que as melhores composições, em massa seca dos materiais, são: (i) 80% de solo, 0% de RCCr e 20% de FEAE para o solo arenoso; (ii) 18% de solo, 62% RCCr e 20% de FEAE para o solo argiloso. A composição química, mineralógica e morfológica dos solos e misturas otimizadas foram avaliados por ensaios de FRX, DRX, microscopia óptica e MEV. Por meio dos ensaios de DRX das misturas compactadas, identificaram-se a formação de produtos típicos de reações pozolânicas, como hidróxido de cálcio (CH), silicato de cálcio hidratado (CSH), aluminato de cálcio hidratados (CAH) e sílico-aluminato de cálcio hidratado (CASH). Os resultados obtidos comprovaram que as composições solo-resíduos e o incremento do período de cura proporcionam ganhos consideráveis de resistência em relação aos solos em seu estado natural. Além disso, os parâmetros de deformabilidade Ψ_i foram estimados e os cálculos de DP foram retratados. A incorporação dos resíduos aos solos proporcionou, para as misturas otimizadas, um bom desempenho em relação à DP, apresentando baixas deformações e atingindo o *shakedown* em todos os estados de tensões analisados, fato não observado nos solos *in natura*. As DP específicas máximas observadas para os solos arenoso e argiloso estabilizados com RCCr e FEAE, após 7 dias de cura e aos 30.000 ciclos de aplicação de cargas, foram de 0,6% (DP plástica total de 1,2 mm) e 1,8% (DP plástica total de 3,5 mm), respectivamente.

Palavras-chave: Deformação permanente. Planejamento de experimentos. Resíduo de construção civil. Finos de escória. Estabilização de solos.

4.1 Introdução

Resíduos de construção civil são um problema mundial, pois representam uma parcela significativa dos resíduos sólidos gerados. Devido aos enormes volume e massa produzidos, têm impactos ambientais, econômicos e financeiros para a sociedade e administração pública (ZHENG et al., 2017; MAHPOUR, 2018; AKHTAR, SARMAH, 2018; WANG et al., 2019; HIDALGO et al., 2019; RUIZ et al., 2020; EUROSTAT, 2021).

Segundo estimativas, mais de 3 bilhões de toneladas de resíduos de construção (RCC) são gerados anualmente em todo o mundo, sendo China, Índia e Estados Unidos (EUA) os maiores produtores (AKHTAR, SARMAH, 2018). A China, maior produtor mundial, contribui com mais de 2 bilhões de toneladas de resíduos de construção e demolição anualmente (ZHENG et al., 2017). Somente em Pequim, cerca de 40 milhões de toneladas de RCC foram geradas em 2014 (HUANG et al., 2018). Em metrópoles como Xangai e Shenzhen, a quantidade de RCC foi de até 30 milhões de toneladas por ano (LI et al., 2018). Em Hong Kong, em 2014, a produção de resíduos de construção foi de aproximadamente 20 milhões de toneladas (HOSSAIN et al., 2017).

Os números de produção em outros países também evidenciam a relevância quanto à geração de resíduos no setor de construção civil. Os EUA produzem cerca de 500 milhões de toneladas de RCC por ano (AKHTAR, SARMAH, 2018). Na Austrália, em 2014, a produção de RCC foi de 19,5 milhões de toneladas (PICKIN, RANDELL, 2017). Em Jeddah, cidade da Arábia Saudita, onde reside 14% da população total do país, 4,5–6,4 milhões de toneladas de resíduos de construção são produzidos a cada ano (OUDA et al., 2017). No Vietnã, em 2015, 5,3 milhões de toneladas de RCC foram produzidas (LOCKREY, 2016). Em Bogotá, na Colômbia, segundo projeções, foram gerados, entre 2008 e 2020, cerca de 10 a 12 milhões de toneladas de RCC por ano (ROBAYO SALAZAR et al., 2015).

Na União Europeia, em 2018, o total de resíduos gerados foi de 2,34 bilhões de toneladas, onde as atividades de construção e demolição (839 milhões de toneladas, 36% do total) e mineração e extração de rochas (622 milhões de toneladas, 27% do total) foram os setores econômicos que mais geraram resíduos (EUROSTAT, 2021). No Brasil, de todo resíduo sólido urbano gerado em 2020, 57% (47 milhões de toneladas) correspondiam a RCC. Entretanto, a maioria dos municípios brasileiros contabiliza apenas as informações sobre a coleta executada pelo serviço público que, normalmente, recolhe os RCC lançados ou abandonados nos logradouros públicos. Assim, os dados estão subestimados, pois não consideram, em suas projeções, os RCC provenientes de serviços privados (ABRELPE, 2021).

Mesmo ainda sendo prática comum descartar os RCC em aterros (VIEIRA, PEREIRA, 2015; CARDOSO et al., 2016; AKHTAR, SARMAH, 2018), existem vários casos em que quantidades substanciais de materiais foram recuperadas. Alguns países da Europa apresentam altas taxas de reaproveitamento, com destaque para Holanda (98%), Dinamarca (94%), Estônia (92%), Alemanha (86%), Irlanda (80%), Reino Unido (75%), Bélgica (68%), Lituânia (60%), Letônia (46%) e Luxemburgo (46%). As políticas públicas vigentes, os benefícios econômicos e ambientais e a escassez de agregados naturais nestes países induzem os RCC a uma destinação mais nobre do que a disposição irregular ou o encaminhamento a aterros (VIEIRA, PEREIRA, 2015; AKHTAR, SARMAH, 2018; ZHAO et al., 2021).

No Brasil, a taxa de reaproveitamento ainda é muito baixa, com cerca de 8% dos RCC sendo reciclados ou destinados a aterros de inertes (NUNES, MAHLER, 2020). Entretanto, o uso de resíduos de construção civil tem despertado interesse e, nas últimas décadas, o governo brasileiro vem aprovando normas e legislações concernentes à utilização desses agregados reciclados em obras de pavimentação (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO,

2003, 2006; ABNT, 2004a, 2004b; PREFEITURA MUNICIPAL DE BAURU, 2011; PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO GONÇALO, 2017). Em geral, estas normas estabelecem os requisitos para o emprego dos agregados de resíduos sólidos da construção civil em camadas de reforço de subleito, sub-base e base de pavimentação ou revestimento primário de vias não pavimentadas.

Quando utilizados consociados com solos, um dos principais desafios quanto ao uso para execução de camadas de pavimentos consiste na heterogeneidade do RCC ou no fato do material não atender aos requisitos do projeto (BARBUDO et al., 2012; ARULRAJAH et al., 2013; XUAN et al., 2015; CABALAR et al., 2019). Entretanto, as propriedades físicas e mecânicas da mistura solo-RCC podem ser aprimoradas via estabilização por adição de aglomerante hidráulico, onde em alguns estudos têm-se abordado o uso de misturas solo-RCC melhoradas com cimento Portland (REIS et al., 2014; XUAN et al., 2015; REIS et al., 2018; KLEINERT et al., 2019; SOUZA et al., 2020; LUKIANTCHUKI et al., 2021). No entanto, esse agente de estabilização apresenta deficiências próprias, como impactos ambientais em termos de emissão de CO₂, consumo de energia e custo (ARIOĞLU AKAN et al., 2017; BEHNOOD, 2018; CARVALHO et al., 2019).

Nesse sentido, pesquisadores tentam encontrar materiais cimentícios alternativos. Esses materiais alternativos representam ganhos ainda mais significativos em ecoeficiência se, além de reduzir o uso de aditivos convencionais, contribuir no consumo de resíduos industriais. Assim, o uso de finos de escórias como material cimentante em solos têm sido tema de diversos estudos recentes (GU et al., 2018; ISMAIL et al., 2018; MUJTABA et al., 2018; WU et al., 2019; PIRES et al., 2019; MOZEJKO, FRANCISCA, 2020; PARSAEI et al., 2021; LOPES et al., 2022, 2023). A escória quando moída, adicionada ao solo e na presença de água, reage quimicamente e desencadeia processos como troca catiônica, floculação e aglomeração e reações pozolânicas (MUJTABA et al., 2018), melhorando as características geotécnicas do solo.

A produção mundial de escória possui números expressivos. Segundo a *World Steel Association* (2021), em 2020, a produção mundial de aço bruto foi de 1,878 bilhões de toneladas, sendo a China o maior produtor (1,065 bilhões de toneladas) e o Brasil o 9º maior produtor (31 milhões de toneladas) de aço do mundo. Concomitantemente com a produção de aço, resíduos e coprodutos (escórias [90% em massa], pós e lamas) são gerados como resultado do processo siderúrgico. Em média, a produção de uma tonelada de aço resulta em cerca de 200 kg de subprodutos para a rota do forno elétrico a arco (*Electric Arc Furnace* [EAF]) e 400 kg para a rota do forno conversor a oxigênio (*Basic Oxygen Furnace* [BOF]) (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2020).

Em vez de serem armazenados em pátios ou descartados em aterros sanitários, causando problemas ambientais, os resíduos de escória podem ser cominuídos e utilizados como estabilizantes químicos em camadas estruturais de pavimentos (ISMAIL et al., 2018; MUJTABA et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019; WU et al., 2019; PIRES et al., 2019; PARSAEI et al., 2021; YILDIRIM, PREZZI, 2022; LOPES et al., 2022, 2023). Os benefícios obtidos com o reúso da escória incluem a economia de recursos naturais não renováveis, a redução das emissões de CO₂ e a agregação de valor aos resíduos por meio da sua reinserção na cadeia produtiva (ARIOĞLU AKAN et al., 2017; CARVALHO et al., 2019; WU et al., 2019).

A necessidade crescente da melhoria e expansão da rede viária, aumenta significativamente a demanda por recursos naturais. A estabilização de solos para execução de camadas de pavimentos com uso de resíduos industriais contribui na redução dos impactos ambientais e na sustentabilidade do setor de construção civil. A estabilização de solos é

amplamente utilizada em obras de pavimentação (FIROOZI et al., 2017; BEHNOOD, 2018), oferecendo benefícios como aumentos na resistência ao cisalhamento e à compressão, estabilidade volumétrica, reduções no índice de plasticidade, redução de deformações, aumentos no módulo de resiliência e melhorias na resistência a condições ambientais adversas, como ciclos de gelo-degelo, erosão e intempéries (BEHNOOD, 2018).

Na avaliação de camadas estruturais de pavimentos flexíveis, ensaios triaxiais de cargas repetidas têm sido utilizados para prever sua rigidez, realizar análises de falhas por fadiga das camadas superficiais e, assim, estimar a vida de projeto do pavimento. Várias pesquisas recentes abordam essa técnica de análise (DELONGUI et al., 2018; GUIMARÃES et al., 2019, 2021; ZHANG et al. 2020; LIMA et al., 2019, 2020, 2021; MOREIRA et al., 2020; ZAGO et al., 2021; LU et al., 2021; LOPES et al., 2022, 2023). Nesses estudos, dois testes triaxiais principais são realizados para avaliar as respostas elásticas e plásticas dos materiais: o teste de módulo de resiliência (MR) e o teste de deformação permanente (DP), respectivamente. Estes parâmetros são fundamentais na análise empírico-mecanicista de pavimentos (LIMA et al., 2020; LOPES et al., 2022). Utilizando os resultados desses ensaios, análises mecanísticas podem ser realizadas para avaliar o comportamento estrutural de pavimentos flexíveis de uma maneira mais cientificamente sólida do que as tradicionais metodologias empíricas baseadas em parâmetros como o índice CBR (*California Bearing Ratio*) (LIMA et al., 2019).

De acordo com Guimarães et al. (2019), a questão da DP não está devidamente inserida no contexto do dimensionamento de pavimentos, e contribuições para a modelagem da DP de materiais que compõem camadas de reforço, sub-base e base de pavimentos são sempre valiosas e aprofundam os conhecimentos sobre o comportamento de determinados solos tropicais. Segundo Lu et al. (2021), existem estudos que envolveram a avaliação do comportamento de RCC, quando submetidos a ensaios triaxiais de cargas repetidas, nos quais as conclusões gerais são que o MR e a DP geralmente atendem aos requisitos de construção da base ou sub-base de pavimentos. Entretanto, esses autores salientam que, apesar das muitas pesquisas de uso de RCC para construção de camadas de pavimentos realizadas por pesquisadores em todo o mundo, os comportamentos resilientes e de deformabilidade plástica desses materiais, quando submetidos aos carregamentos repetidos induzidos pelo tráfego dos veículos, ainda carecem de mais estudos.

Nesse contexto, de grande produção de RCC e escória e de fomento ao seu reúso como forma de mitigar impactos econômicos e ambientais, esta pesquisa avaliou o comportamento mecânico de misturas de dois solos tropicais distintos com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (RCCr) e finos de escória oxidante de aciaria elétrica (FEAE) para aplicação em camadas de pavimentos. O exame da literatura disponível indicou que nenhum estudo anterior analisou o comportamento quanto a DP de solos tropicais estabilizados com uso concomitante de RCCr e FEAE, característica de grande relevância para os métodos de dimensionamento mecanístico-empírico em obras de pavimentação. Além disso, nenhum estudo usou uma abordagem de Planejamento de Experimentos (*Design of Experiment* [DOE]), Metodologia de Superfícies de Resposta e função Desejabilidade para otimizar os teores dos resíduos supracitados consociados com solos para maximizar a resposta de interesse. Consistente com o exposto, os objetivos deste artigo são: (i) investigar o potencial do uso de RCCr e FEAE na estabilização de dois solos tropicais, usando uma abordagem de DOE de misturas em rede simplex; (ii) avaliar, na energia de compactação do Proctor normal, os solos e as misturas otimizadas via ensaios de DP; (iii) correlacionar os dados resultantes das caracterizações física, mineralógica e microestrutural das misturas otimizadas com os resultados de DP.

4.2 Materiais e métodos

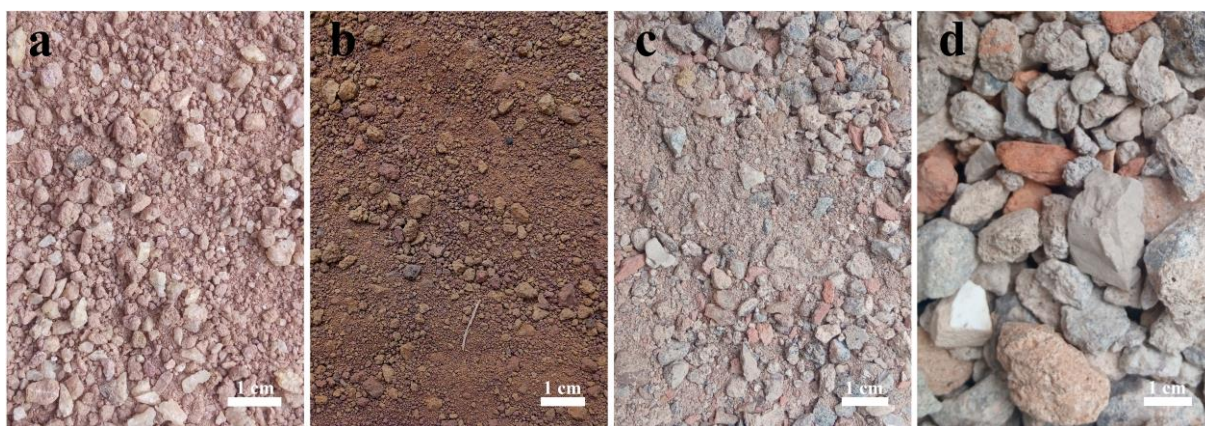
4.2.1 Coleta e preparação dos materiais

Para a realização deste estudo, foram selecionadas duas jazidas de solos tropicais típicos da Zona da Mata Mineira, região do Estado de Minas Gerais, Brasil. A primeira jazida localiza-se na zona rural do Município de Cajuri-MG. Dela coletou-se um solo arenoso (S1) residual jovem de gnaiss procedente do horizonte C de um talude de corte. A segunda jazida está localizada na zona rural do Município de Viçosa-MG. Dela foi coletado um solo argiloso (S2) residual maduro de gnaiss procedente do horizonte B de um talude de corte às margens da BR-120. A coleta foi realizada conforme as orientações constantes na norma DNER-PRO 003 (DNER, 1994a) do DNIT. As amostras foram dispostas em sacos plásticos e transportadas até o Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LEC-UFV), campus Viçosa-MG, onde foram secas ao ar e destorroadas.

O RCCr foi coletado na usina de beneficiamento Ecovia Reciclagem de Resíduos da Construção Civil, localizada na cidade de Varginha-MG, Brasil. Ele é composto de materiais provenientes de construção, reformas, reparos, manutenção e demolição de obras de engenharia civil e outras infraestruturas, sendo coletados por toda a cidade de Varginha. O RCC foi reduzido em um britador de mandíbulas e separado por um conjunto de peneiras de distintas granulometrias. Neste estudo, foram escolhidas as frações areia e brita de RCCr para a estabilização granulométrica dos solos. A amostra foi coletada segundo as normas DNER-PRO 120 (DNER, 1997) e NBR 10007 (ABNT, 2004c), acondicionada em tonéis vedados e transportada até o LEC-UFV. Após processo de homogeneização, o RCCr foi separado por peneiramento em duas frações granulométricas: (i) RCCr graúdo ($4,80 \text{ mm} < \varnothing \leq 19,0 \text{ mm}$); (ii) RCCr miúdo ($\varnothing \leq 4,80 \text{ mm}$). Tal procedimento se fez necessário devido ao fenômeno de segregação do RCCr miúdo, quando armazenado conjuntamente ao RCCr graúdo.

Os solos e o RCCr utilizados na pesquisa são apresentados na Figura 4.1.

Figura 4.1: Amostras de S1 (a), S2 (b), RCCr miúdo (c) e RCCr graúdo (d) preparadas para ensaios de caracterização.



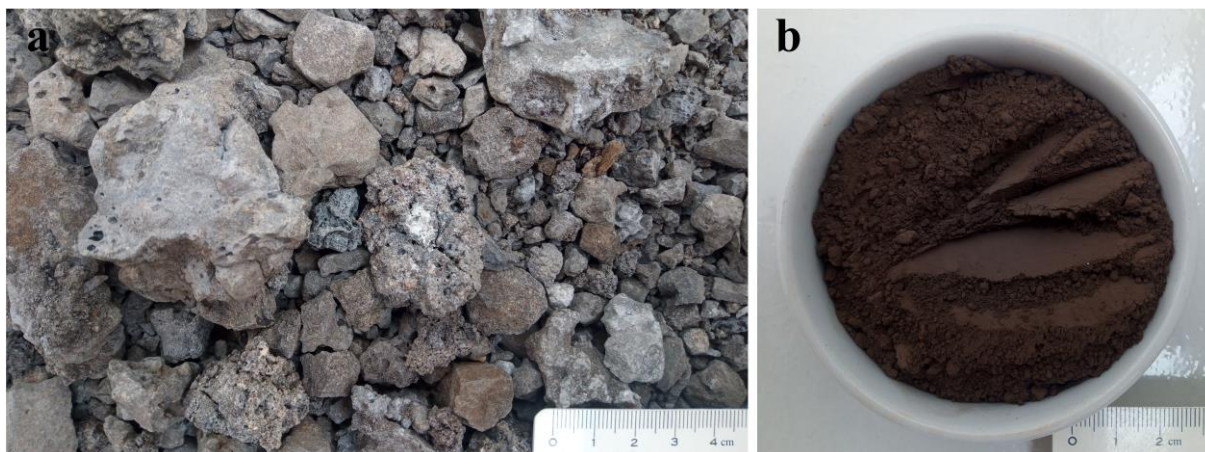
Fonte: Acervo do autor.

A escória de aciaria elétrica utilizada no programa experimental foi cedida pela unidade siderúrgica da VSB (Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil), localizada no município de Jeceaba-MG, Brasil. A escória é proveniente do forno elétrico a arco (escória oxidante) e foi coletada, no estado bruto, no pátio de estocagem a céu aberto da fábrica segundo às exigências

da NBR 10007 (ABNT, 2004c). A escória bruta foi pulverizada em um moinho de bolas cilíndrico para a redução da granulometria inicial, garantido que o material passasse integralmente pelas aberturas da peneira de #0,15 mm (peneira n.º 100). Este procedimento objetivou aumentar a área superficial específica da escória.

A figura 4.2 apresenta a escória de aciaria em seu estado bruto e após o processo de pulverização.

Figura 4.2: Escória de aciaria no estado bruto (a) e após processo de pulverização (b).



Fonte: Acervo do autor.

4.2.2 Caracterização dos materiais

Os procedimentos de redução e preparo das amostras para os ensaios seguiram as normas NBR NM 27 (ABNT, 2001) e NBR 6457 (ABNT, 2016a), para os solos, e DNER-PRO 199 (DNER, 1996a), para os resíduos.

Os ensaios de caracterização física realizados nos materiais foram: solos: análise granulométrica (ABNT, 2016b), limites de Atterberg (ABNT, 2016c; ABNT, 2016d) e massa específica (ABNT, 2016e); (ii) RCCr: análise granulométrica (ABNT, 2016b), índice de forma (ABNT, 2019), abrasão Los Angeles (DNER, 1998) e massa específica (ABNT, 2016e; ABNT, 2016f); (iii) FEAE: análise granulométrica (ISO, 2020), índice de finura (ABNT, 2012a), superfície específica (ABNT, 2015), massa específica (ABNT, 2017) e perda ao fogo (ABNT, 2012b). Os solos e o RCCr miúdo também foram classificados segundo os sistemas TRB (*Transportation Research Board*) (AASHTO, 2021), USCS (*Unified Soil Classification System*) (ASTM, 2017) e MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) (DNER, 1994b, 1994c, 1996b).

As avaliações química, mineralógica e microestrutural dos materiais foram realizadas pelas técnicas de fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX), microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Os ensaios de FRX foram realizados no equipamento EDX-720 *Shimadzu Rayny*. Os ensaios por DRX foram realizados no equipamento D8 *Discover* com sistema de reconhecimento automático de componentes. As características dos ensaios foram radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), tensão de trabalho de 40 kV e corrente elétrica de 40 mA. As amostras foram escaneadas de 5° a 80° (2θ), com um tamanho de passo de $0,05^\circ$ e um tempo acumulado por passo de 1 segundo. As análises de FRX e DRX foram realizadas em amostras com tamanho de partícula inferior a $75 \mu\text{m}$, obtidas por cominuição. As imagens por MEV foram realizadas

em equipamento da marca JEOL, modelo JSM-6010LA, magnificação de 8X a 300.000X e voltagem de aceleração de 500 V a 20 kV.

A granulometria dos FEAE foi realizada por método de difração a laser (ISO, 2020). O equipamento utilizado foi o granulômetro *Mastersizer 2000*, da Malvern Instruments Ltda, com capacidade de leitura de 0,02 μm a 2.000 μm .

4.2.3 Caracterização das misturas

Os ensaios de caracterização física realizados nas misturas solo-resíduos foram: análise granulométrica (ABNT, 2016b), limites de Atterberg (ABNT, 2016c; ABNT, 2016d) e massa específica (ABNT, 2016e; ABNT, 2016f). As misturas otimizadas também foram classificadas segundo os sistemas TRB (AASHTO, 2021), USCS (ASTM, 2017) e MCT (DNER, 1994b, 1994c, 1996a).

As avaliações mineralógica e microestrutural das misturas otimizadas foram realizadas pelas técnicas de DRX e MEV. Os equipamentos utilizados foram os mesmos já citados na subseção 4.2.2.

Neste trabalho, com objetivo de interromper os processos de hidratação e preservar as amostras das misturas de interesse em um tempo de cura escolhido, inibindo, assim, a continuidade de reações pozolânicas, adotou-se conservar os espécimes em álcool isopropílico (SNELLINGS et al., 2018).

4.2.4 Preparação das misturas

Neste estudo, o DOE de misturas em rede simplex foi aplicado para projetar o experimento e avaliar a influência das variáveis independentes (teor de solo, teor de RCCr e teor de FEAE) nas respostas RCS e índice CBR. Essa avaliação foi feita em termos de resistência mecânica de cada mistura após os períodos de cura 0 e 7 dias. Entretanto, o domínio experimental para as misturas propostas sofreu restrições; foram estabelecidos limites máximos e/ou mínimos para as proporções dos componentes. No caso dos FEAE, um limite superior de 20% foi estabelecido com base em estudos de outros autores (PITANGA et al., 2016; SILVA et al., 2019; PIRES et al., 2019). Para os componentes solo e RCCr, a restrição foi definida considerando-se que a composição binária destes deveria atender à faixa granulométrica “D” especificada na norma DNIT 141-ES (DNIT, 2010a), a qual contempla as especificações para a execução da camada de base de pavimentos utilizando solos estabilizados granulometricamente. Para atender a essa restrição, a dosagem do solo com o RCCr miúdo e RCC graúdo foi realizada de modo à composição gerar o melhor ajuste possível a faixa granulométrica “D” do DNIT (DNIT, 2010a). Como na obtenção das composições solo-RCCr os componentes solo, RCCr miúdo e RCCr graúdo foram ajustados separadamente, esse procedimento gerou distintas dosagens de RCCr miúdo e RCCr graúdo para S1 e S2. A relação RCCr miúdo/RCCr graúdo, em massa seca dos materiais, para as composições com S1 e S2, foram de 0,3 (RCCr1) e 1,4 (RCCr2), respectivamente. Logo, os limites superior e inferior de cada componente ficaram estabelecidos da seguinte forma: (i) S1-RCCr1-FEAE: $100\% \leq S1 \leq 55\%$, $0 \leq \text{RCCr1} \leq 45\%$ e $0 \leq \text{FEAE} \leq 20\%$; (ii) S2-RCCr2-FEAE: $100\% \leq S2 \leq 18\%$, $0 \leq \text{RCCr2} \leq 82\%$ e $0 \leq \text{FEAE} \leq 20\%$.

Definidos os intervalos de variação dos componentes nas misturas, elaborou-se um delineamento experimental em arranjo simplex-vértices extremos, utilizando-se o software de análise estatística Minitab. O projeto para o sistema de três componentes e restrições proposto

resultou em um trapézio no espaço bidimensional, delimitado por quatro pontos localizados nos vértices, quatro localizados nos pontos médios das arestas e um no centroide do espaço amostral. As misturas foram nomeadas como M1, M2,..., M18, nas quais M7 e M16 representam, respectivamente, os componentes S1 e S2 puros.

Os resultados dos teores dos materiais obtidos no planejamento experimental são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Planejamento experimental de mistura para os sistemas solo-RCCr-FEAE.

Mistura	Teores dos componentes (%)			Mistura	Teores dos componentes (%)		
	S1	RCCr1	FEAE		S2	RCCr2	FEAE
M1	80,0	0,0	20,0	M10	80,0	0,0	20,0
M2	67,5	12,5	20,0	M11	49,0	31,0	20,0
M3	55,0	25,0	20,0	M12	18,0	62,0	20,0
M4	90,0	0,0	10,0	M13	90,0	0,0	10,0
M5	72,5	17,5	10,0	M14	54,0	36,0	10,0
M6	55,0	35,0	10,0	M15	18,0	72,0	10,0
M7	100,0	0,0	0,0	M16	100,0	0,0	0,0
M8	77,5	22,5	0,0	M17	59,0	41,0	0,0
M9	55,0	45,0	0,0	M18	18,0	82,0	0,0

Fonte: Resultado da pesquisa.

4.2.5 Modelagem matemática

As superfícies de resposta foram geradas no software Minitab. Cada superfície representa o comportamento das respostas experimentais RCS e CBR, em função dos componentes, para cada tempo de cura. O modelo cúbico especial (CALADO, MONTGOMERY, 2003) (Equação 1) foi utilizado para verificar a relação entre as variáveis independentes e as respostas.

$$y = \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i<j}^k \sum_j^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j}^k \sum_{j<k}^k \sum_k^k b_{ijk} x_i x_j x_k \quad (1)$$

em que: y é a estimativa da resposta RCS ou CBR; k é número de componentes na mistura; b são os coeficientes dos componentes puros e suas interações, a serem determinados nas equações; x são os componentes da mistura.

4.2.6 Análises estatísticas

As respostas experimentais RCS e CBR (variáveis dependentes) foram utilizadas na análise do comportamento das misturas (variáveis independentes) por Metodologia de Superfícies de Resposta. Para tal, os dados experimentais foram ajustados a modelos matemáticos polinomiais, em que os coeficientes estimados foram avaliados a um nível de 10% de significância. O nível de 10% foi adotado em virtude de os valores médios de RCS e CBR, obtidos dos ensaios em triplicata, apresentarem grande variabilidade. Dessa forma, o nível de confiança das equações estimadas é igual a 90% (P-valor = 0,10). A qualidade do ajustamento

dos modelos estimados foi avaliada a partir dos coeficientes de determinação (R^2)³. Este indica qual a proporção da variável dependente está sendo explicada pelas variáveis independentes da equação estimada.

Para esses resultados preliminares, realizou-se a análise estatística a partir do ajuste dos dados experimentais aos modelos polinomiais, respeitando-se a significância dos termos (P-valor $\leq 0,10$). A fim de se obter resultados mais robustos, utilizou-se o método *Stepwise*, em que os coeficientes estimados que apresentaram resultados estatisticamente não significativos (P-valor $> 0,10$) foram retirados dos modelos. Portanto, os coeficientes das equações obtidas, são todos estatisticamente significativos a um nível de até 10% de significância.

4.2.7 Otimização dos modelos

A otimização numérica foi realizada com base na abordagem da função Desejabilidade, conforme apresentado na Equação 2 (EMMANUEL et al., 2020).

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_m)^{1/m} = \prod_{i=1}^m d_i \quad (2)$$

em que: D é a Desejabilidade composta; d é a Desejabilidade individual das respostas; m é o número de respostas utilizadas no estudo de otimização.

A função Desejabilidade irá determinar as melhores condições de ajuste, tornando possível a maximização simultânea das múltiplas respostas em função dos modelos numéricos obtidos. Assim, a função Desejabilidade irá determinar os teores ideais dos componentes, nos sistemas S1-RCCr1-FEAE e S2-RCCr2-FEAE, que maximizam as respostas RCS e CBR.

4.2.8 Ensaios de caracterização mecânica

4.2.8.1 Compactação

A determinação dos respectivos pontos de ótimo de compactação das misturas foi realizada segundo os métodos de ensaio das NBR 7182 (ABNT, 2016g) e NBR 12023 (2012c) na energia do Proctor normal. Para todas as 18 misturas, o cilindro metálico grande ($\varnothing 15,24 \times 17,78$ cm [cilindro CBR]) foi utilizado na determinação das curvas de compactação. Obtidas as curvas, os valores de W_{ot} e $\gamma_{dm\acute{a}x}$ foram adotados como referência na moldagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios de RCS, CBR e DP.

4.2.8.2 RCS

O ensaio de RCS (DNER-ME 202 [DNER, 1994d]; DNER-ME 201 [DNER, 1994e]) foi realizado em corpos de prova de dimensões $\varnothing 10 \times 12,73$ cm. Três amostras foram preparadas para cada mistura nos diferentes tempos de cura (ensaio em triplicata). Após a etapa de moldagem, os corpos de prova foram extraídos dos cilindros de compactação, envelopados em plástico filme e acondicionados em câmara úmida, para preservar o teor de umidade. Os

³ Uma propriedade importante do coeficiente de determinação, R^2 , é que a medida em que se acrescenta variáveis explicativas (independentes) ao modelo, há uma tendência de aumento no seu valor. O R^2 ajustado, também é utilizado como medida de avaliação da qualidade do ajustamento do modelo, sendo que, este é ajustado pelos graus de liberdade, ou seja, penalizado pelo acréscimo de variáveis explicativas no modelo. Para informações mais detalhadas a respeito dos coeficientes de determinação, R^2 e R^2 ajustado, ver Gujarati (2011), pp. 217-218.

corpos de prova ficaram acondicionadas nesse ambiente por 7 dias. Os corpos de prova com 0 dia de cura foram submetidos ao ensaio de RCS logo após o procedimento de compactação. Não foi adotada, previamente à realização dos ensaios, a imersão dos corpos de prova em água por 4 horas.

Para o ensaio, utilizou-se prensa MARSHALL automática digital microprocessada (marca SOLOTEST) com velocidade de deformação de 1,00 mm por minuto. A prensa possui célula de carga tipo S de 5.000 kgf de capacidade e LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) de 50 mm com resolução de 0,01 mm.

4.2.8.3 CBR

O ensaio CBR foi realizado conforme norma DNIT 172-ME (DNIT, 2016). Três amostras foram preparadas para cada mistura nos diferentes tempos de cura. Após a etapa de moldagem, os corpos de prova foram envelopados em plástico filme e acondicionados em câmara úmida por 7 dias. As amostras com 0 dia de cura foram submetidas ao ensaio logo após o procedimento de compactação. Os corpos de prova, imediatamente após o processo de cura, permaneceram imersos em água por período de 96 horas (quatro dias). Terminado o período de embebição, os corpos de prova foram retirados da imersão e submetidos aos procedimentos de ensaio. O ensaio de expansão foi realizado concomitantemente ao do índice CBR.

Para o ensaio, foi utilizada prensa com motor elétrico (marca SOLOTEST) com velocidade de deformação de 1,27 mm por minuto. A prensa possui anel dinamométrico de 5.000 kgf de capacidade, sensível a 2,5 kgf, extensômetro com resolução de 0,001 mm, para medir as deformações do anel dinamométrico, e extensômetro com resolução de 0,01 mm, para medir a penetração do pistão no CP.

4.2.8.4 Deformação Permanente (DP)

Os solos e as misturas otimizadas foram submetidos ao ensaio de DP conforme os procedimentos da norma DNIT 179-IE (DNIT, 2018). Os corpos de prova (Ø10 x 20 cm), confeccionados com 10 camadas de mesma espessura, foram obtidos por compactação dinâmica. As amostras de solo foram submetidas ao ensaio imediatamente após a etapa de compactação. As misturas otimizadas, após a compactação, foram extraídas do cilindro, envelopados em plástico filme e acondicionados em câmara úmida por período de cura de 7 dias.

Nesta pesquisa, o modelo adotado para determinação do comportamento da DP foi o proposto por Guimarães (2009) e indicado na norma DNIT 179-IE (DNIT, 2018). Esse modelo, apresentado na Equação 3, é geralmente aplicado para prever a DP de solos brasileiros. Para a obtenção das constantes do modelo, considerando os nove pares de tensão recomendados, foram realizadas regressões não lineares múltiplas.

$$\varepsilon_p(\%) = \Psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\Psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\Psi_3} \cdot N^{\Psi_4} \quad (3)$$

em que: $\varepsilon_p(\%)$ é a deformação permanente específica; Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 e Ψ_4 são os parâmetros de regressão; σ_3 é a tensão confinante (kgf/cm²); σ_d é a tensão desvio (kgf/cm²); ρ_0 é a tensão de referência (tensão atmosférica - 1 kgf/cm²); N é o número de ciclos de aplicação de carga.

Para o ensaio, a frequência adotada, para as cargas repetidas na tensão vertical (tensão desvio), foi de 2 Hz (120 ciclos por minuto [0,1 s de aplicação de carga e 0,4 s de repouso]). Foram adotados 50 ciclos iniciais como fase de condicionamento ($\sigma_3 = 30$ kPa; $\sigma_d = 30$ kPa; $\sigma_1/\sigma_3 = 2$). Os testes foram conduzidos até um N de 30.000 ciclos devido a uma limitação do equipamento de ensaio. As análises foram realizadas para nove diferentes estados de tensões aplicados a cada solo e misturas investigados. O equipamento utilizado foi o modelo LoadTrac II fabricado pela empresa GEOCOMP, EUA. Suas partes constituintes são prensa de aplicação de carga, compressor hidráulico, servo-válvula com cilindro hidráulico e unidade externa de aquisição de dados. Os componentes hidráulicos consistem de um cilindro associado a uma servo-válvula e de um atuador hidráulico alimentado por compressor a ar. A aplicação da tensão confinante sobre o corpo de prova é realizada por um regulador de pressão eletropneumático que ajusta a tensão na célula, monitorando-a continuamente. Para medição dos deslocamentos axiais do corpo de prova sob carregamento repetido, foi utilizado apenas 1 (um) LVDT. O LVDT é preso solidariamente ao pistão de transmissão de carga e apoiado, para realização das leituras, na base superior externa da câmara triaxial.

4.2.9 Controle de qualidade

Os corpos de prova para os ensaios de RCS e CBR foram moldados em triplicata e os valores médios foram adotados nas análises estatísticas. Para os ensaios de DP adotou-se apenas 1 (um) corpo de prova para cada par de tensão ensaiado. Os critérios de aceitação dos corpos de prova compactados foram:

- A. RCS e CBR: (i) valor de umidade de compactação entre $\pm 1\%$ da W_{ot} obtida da curva de compactação das misturas; (ii) grau de compactação (GC) entre 97% e 103%; (iii) coeficiente de variação (Equação 3) dos parâmetros RCS e CBR, calculado para três corpos de prova, menor ou igual a 15%;
- B. DP: (i) valor de umidade de compactação entre $\pm 1\%$ da W_{ot} obtida da curva de compactação do solo/mistura; (ii) GC entre 99% e 101%.

Como critério de aceitação dos modelos de DP obtidos por regressões não lineares múltiplas, adotou-se o coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,80.

O coeficiente de variação (CV), métrica utilizada para avaliações de repetitividade e reprodutibilidade, foi determinado a partir da equação:

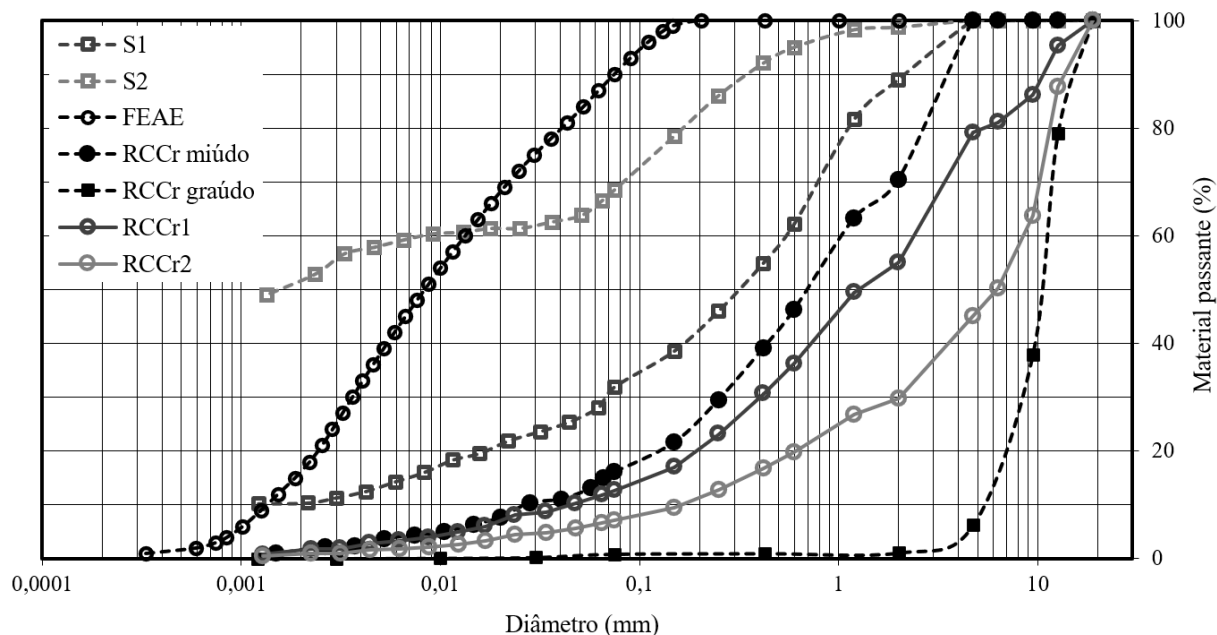
$$CV = \left(\frac{\text{Desvio Padrão}}{\text{Média}} \right) \cdot 100\% \quad (4)$$

4.3 Resultados e discussões

4.3.1 Caracterização física, química, mineralógica e morfológica dos materiais

Na Figura 4.3 e Tabela 4.2 estão apresentadas as características granulométricas dos materiais estudados na pesquisa.

Figura 4.3: Curvas granulométricas dos materiais.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Tabela 4.2: Caracterização granulométrica dos solos e do RCCr.

Parâmetros	Materiais			
	S1	S2	RCCr miúdo	RCCr graúdo
% argila ($\varnothing \leq 0,002$ mm)	10	52	2	0
% silte ($0,002$ mm $\leq \varnothing \leq 0,06$ mm)	17	14	11	1
% areia fina ($0,06$ mm $\leq \varnothing \leq 0,2$ mm)	15	17	12	0
% areia média ($0,2$ mm $\leq \varnothing \leq 0,6$ mm)	20	12	21	1
% areia grossa ($0,6$ mm $\leq \varnothing \leq 2,0$ mm)	27	4	24	1
% pedregulho ($\varnothing \geq 2,0$ mm)	11	1	30	97

Ø: Diâmetro.

Fonte: Resultado da pesquisa.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica dos solos e do RCCr.

Tabela 4.3: Síntese dos resultados das caracterizações física e mecânica dos solos e do RCCr.

Parâmetros	Materiais			
	S1	S2	RCCr miúdo	RCCr graúdo
Limite de liquidez (%)	40	58		
Limite de plasticidade (%)	26	40	Não plástico	-
Índice de plasticidade (%)	14	18		
Peso específico (kN/m ³)	27,27	27,57	28,94	25,90
Classificação TRB	A-2-7(0)	A-7-5(13)	A-1-b	-
Classificação USC	SC	CH	SW-SM	-
Classificação MCT	NA'	LG'	NA'	-
Wot (%)	EN	14,1	28,3	-
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	EN	18,2	14,6	-
CBR (%)	EN	17	7	-
Expansão CBR (%)	EN	0,2	1,4	-
RCS (kPa)	EN	191	261	-
Abrasão Los Angeles (%)				42
Índice de forma				3

EN: Energia normal; EI: Energia intermediária.

Fonte: Resultado da pesquisa.

S1 é predominantemente composto pela fração areia (62%). É classificado como SC (areia com finos) pela USCS, A-2-7(0) pela TRB e NA' (Solo Arenoso Laterítico) pelo MCT. S2 possui predomínio da fração argila (52%). É classificado como CH (argilas de alta plasticidade) pela USCS, A-7-5(13) pela TRB e LG' (Solo Argiloso Laterítico) pelo MCT. O valor de Expansão CBR (1,4%) limita o seu uso em obras de pavimentação. O RCCr miúdo foi classificado SW-SM (areia bem graduada com silte) (USCS), A-1-b (TRB) e NA' (MCT). Segundo as classificações TRB e MCT, S1 e o RCCr miúdo tendem a apresentar comportamento adequado para uso como camada de subleito ou base de pavimentos rodoviários, respectivamente. Para S2, a classificação TRB atribui previsão de péssimo comportamento como subleito rodoviário. Entretanto, segundo a norma DER/PR ES-T 07/05 (DER-PR, 2005) do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná, solos LG' apresentam excelente durabilidade, podendo ser utilizado como revestimento primário de vias não pavimentadas.

Devido à baixa presença de finos em sua composição, o RCCr miúdo apresentou comportamento não plástico. Segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004b), a amostra de RCCr graúdo foi identificada como agregado de resíduo de concreto (ARC). O material apresenta coloração fortemente cinza (grande quantidade de resíduos de concreto e mármore), média presença de material vermelho e pouca presença de resíduos de madeira, plástico ou metal. Quanto ao desgaste físico sofrido pelos agregados quando submetidos a cargas abrasivas, o RCCr graúdo apresentou valor de 42% no ensaio de abrasão "Los Angeles", abaixo do valor máximo (55%) estabelecido pela norma DNIT 141-ES (DNIT, 2010a). Para os ensaios de índice de forma e contaminantes, o agregado graúdo apresentou valores 3 e 0,8%, respectivamente, atendendo aos valores limites estabelecidos pela NBR 15116 (ABNT, 2004b).

A curva de distribuição granulométrica dos FEAE (Figura 4.3) indica que aproximadamente 90% das partículas estão abaixo do diâmetro de 75 μm . Os resultados obtidos nos ensaios de material retido na peneira de #45 μm (32%) e perda ao fogo (0,18%) estão em

conformidade com as exigências da norma de materiais pozolânicos (ABNT, 2014). Para as propriedades índice de finura, superficial específica e peso específicos, os valores obtidos para os FEAE foram de 21%, 263 m²/kg e 37,95 kN/m³, respectivamente. As propriedades físicas observadas nos FEAE são similares às obtidas por Silva et al. (2019) e Lopes et al. (2022).

Os resultados da caracterização química dos solos, do RCCr miúdo e dos FEAE, realizada por meio da técnica de FRX, são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Composição química dos materiais por ensaio de FRX.

Elemento	Unidade	Concentração				Elemento	Unidade	Concentração			
		S1	S2	RCCr*	FEAE			S1	S2	RCCr*	FEAE
V ₂ O ₅	ppm	852	1.000	2.565	926	TiO ₂	%	2,0	3,3	1,4	0,6
Cl	ppm	652	600	2.016	430	CaO	%	0,1	0,2	15,6	40,6
ZrO ₂	ppm	525	683	10.650	119	MnO	%	0,1	0	0,2	6,3
ZnO	ppm	125	110	5.854	0	MgO	%	-	-	1,3	2,8
SrO	ppm	0	24	9.150	1.340	P ₂ O ₅	%	0,5	0,5	-	-
Bi ₂ O ₃	ppm	52	17	1.005	-	SO ₃	%	0,2	0,1	2,4	0,2
Al ₂ O ₃	%	30,9	37,3	15,1	3,7	K ₂ O	%	0,3	0,1	2,1	-
SiO ₂	%	44,6	34,7	39,9	11,8	Cr ₂ O ₃	%	0,1	0,1	-	1,6
Fe ₂ O ₃	%	20,9	23,5	17,5	32,2	Outros	%	0,1	0,1	1,4	0,0

*RCCr miúdo.

Fonte: Resultado da pesquisa.

Através da análise química dos solos, verificou-se altos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ e baixos teores de TiO₂ e P₂O₅. Esses elementos, normalmente encontrados em solos sedimentares, participam ativamente do processo de estabilização do solo. Segundo Nogami e Villibor (1995), nos solos lateríticos (S2) os óxidos de ferro e de alumínio hidratados possuem propriedades cimentantes, desempenhando papel importante na formação de torrões (grumos) e concreções. No caso dos solos saprolíticos (S1), os argilo-minerais e, eventualmente, outros minerais presentes não se apresentam recobertos por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, como no caso dos solos lateríticos. A relação entre os teores de sílica e alumina ($[\%SiO_2 \cdot 1,7] / [\%Al_2O_3]$), ou valor Ki, é usualmente utilizada como um indicador do grau de intemperismo dos solos. Solos altamente intemperizados caracterizam-se pedogeneticamente pela remoção de sílica e acúmulo de alumínio nos seus perfis (DONAGEMA et al., 2011). Por essa relação, os valores de Ki calculados para S1 e S2 são, respectivamente, 2,45 e 1,58. Esses valores indicam, como esperado, ser S1 um solo residual jovem e S2 um solo residual maduro.

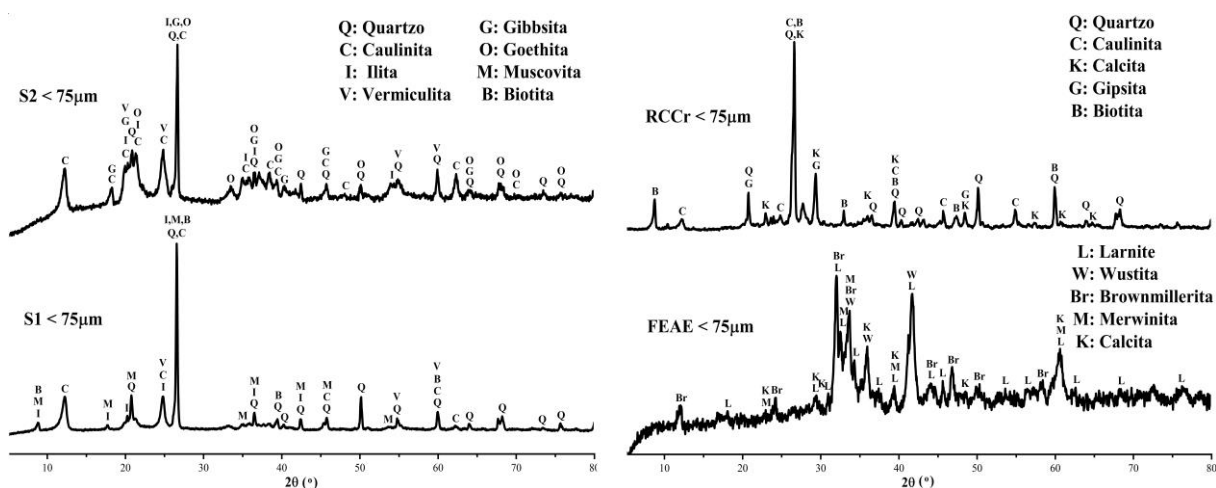
O RCCr apresentou, em maior concentração, a presença de sílica. Quantidades significativas de óxidos de ferro, cálcio e alumínio também foram observadas. A maior ocorrência destes elementos na composição do RCCr confirma o que foi observado em nível macroscópico, onde resíduos de argamassa e concreto são predominantes. O óxidos de ferro, alumínio e cálcio justificam, como se verá mais adiante, a presença de minerais como caulinita, biotita, calcita e gibsita no RCCr.

A caracterização química das escórias é uma questão complexa. Devido a fatores como matéria-prima utilizada, tipo de aço produzido, condições de funcionamento do forno e processos de resfriamento e cura, estudos tem demonstrado composições químicas distintas em escórias de aciaria elétrica (YILDIRIM, PREZZI, 2011; MARTINS et al., 2021). Os resultados apresentados na Tabela 4.4 indicam para os FEAE grande presença de CaO, Fe₂O₃, SiO₂ e, em menores proporções, MnO, Al₂O₃ e MgO. Conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), o teor de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ (47,6%) dos FEAE está próximo do mínimo exigido (50%) e os percentuais

de SiO_3 (0,2%) e Na_2O (0,0%) estão abaixo dos valores máximos toleráveis. Por grande parte da composição (75,6%) dos FEAE ser de óxidos básicos (CaO , FeO , MgO), ela é caracterizada como escória básica (JAMES O'CONNOR et al., 2021). A presença de grandes quantidades de CaO , SiO e, em menores proporções, MgO , e sua elevada relação CaO/SiO_2 (3,5), são indicativos da reatividade potencial do material como um ligante hidráulico (POH et al., 2006). Devido sua composição química, constituídas principalmente por silicatos de cálcio e ferritas de cálcio, torna esse resíduo industrial potencialmente utilizável como matéria-prima para a produção de cimento (HE et al., 2020; MARTINS et al., 2021). Elas podem ser cominuadas e atingir uma granulometria semelhante à inferior ao cimento (CARVALHO et al., 2019; MARTINS et al., 2021). Quando misturada ao solo e na presença de água, produzem reações cimentícias que favorecem pontos de contato mais fortes entre as superfícies dos grãos (MOZEJKO, FRANCISCA, 2020; BRAND et al., 2020; LOPES et al., 2022).

As análises mineralógicas por DRX dos materiais foram realizadas em amostras com diâmetros inferiores a $75\ \mu\text{m}$. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos a seguir.

Figura 4.4: Difratogramas dos materiais.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Os ensaios de DRX dos solos revelaram presença de caulinita (mineral 1:1) e quartzo, minerais primários de elevada resistência à intemperização (KAMPF et al., 2019). A caulinita, principal mineral da fração argila de solos desenvolvidos sob condições tropicais úmidas, é comumente encontrada em solos lateríticos e saprolíticos do Brasil (NOGAMI, VILLIBOR, 1995). S1 apresentou características de um solo jovem, com picos bem definidos de muscovita, ilita e biotita. S2 apresentou características pedológicas de um solo em avançado estágio de intemperização, com presença de gibbsita, goethita e vermiculita, cuja ocorrência é favorecida em condições de longo tempo de exposição do solo aos agentes bioclimáticos.

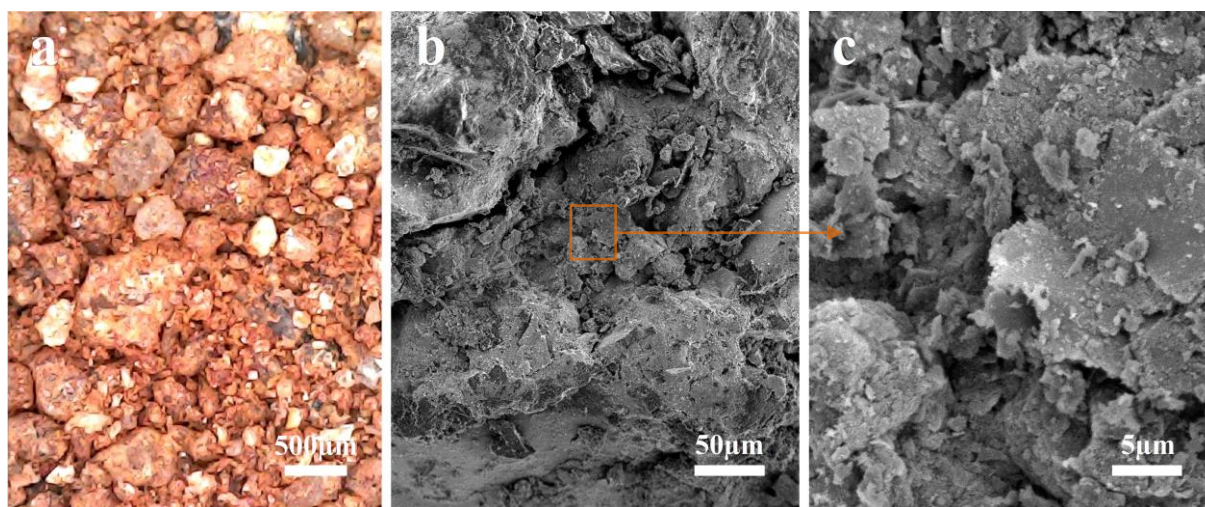
A análise por DRX do RCCr demonstrou a presença de quartzo, caulinita, calcita, gipsita e biotita. O quartzo deriva da presença de rochas naturais, já a calcita pode ter diferentes origens, como, por exemplo, a partir de agregados naturais e de componentes carbonatados (FERREIRA et al., 2019) utilizados em concretos e argamassas, como a cal e o cimento. A presença de gipsita também foi observada em outras pesquisas (JIMÉNEZ et al., 2012; FERREIRA et al., 2019). A origem da biotita pode estar relacionada com os resíduos de granito presentes no RCCr.

Para os FEAE, os minerais identificados foram larnita (Ca_2SiO_4), wustita (FeO), brownmillerita ($\text{Ca}_2[\text{Al,Fe}]_2\text{O}_5$), merwinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}[\text{SiO}_4]_2$) e calcita (CaCO_3), que são

componentes básicos do cimento Portland, sugerindo potencial dos FEAE para cimentação. Os minerais encontrados nesta análise estavam de acordo com os resultados observados na literatura (WU et al., 2019; PIRES et al., 2019; BRANCA et al., 2020; JAMES O’CONNOR et al., 2021). A mineralogia da escória pode variar amplamente, a depender da matéria-prima utilizada, do tipo de aço produzido, das condições de funcionamento do forno, dos tratamentos empregados e da forma de resfriamento (YILDIRIM, PREZZI, 2011; JAMES O’CONNOR et al., 2021). Segundo Yildirim e Prezzi (2011), o processo de fabricação de aço em forno elétrico a arco é essencialmente um processo de reciclagem de sucata de aço. Portanto, a composição química da escória produzida depende significativamente das propriedades do aço reciclado. Geralmente, essa característica, torna complexa a identificação dos minerais constituintes devido os muitos picos sobrepostos refletindo as diferentes fases cristalinas dispersas presentes na matriz amorfa do material.

A análise morfológica dos materiais foi realizada com auxílio de fotomicrografias obtidas por microscopia óptica e MEV. As imagens obtidas são apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.6.

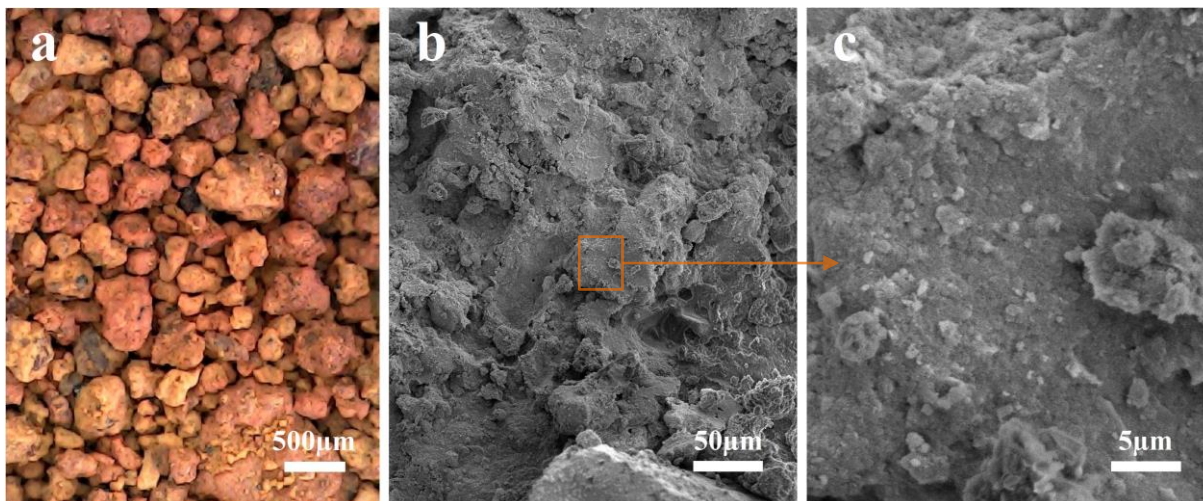
Figura 4.5: Fotomicrografias de S1 obtidas por microscopia óptica e MEV: (a) imagem de S1 obtida por microscópio óptico, evidenciando a grande presença de cristais de quartzo e a baixa coesão entre os grãos do solo; (b) imagem da organização microestrutural de S1 obtida por MEV; (c) ampliação de “b”, apresentando microagregações e foliações de partículas lamelares dispersas.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Na imagem 4.5a (S1), percebe-se a grande variedade de minerais, parte herdados da rocha matriz e parte decorrente do processo de intemperização. Pode-se perceber a baixa coesão entre as partículas neoformadas, de contornos facilmente distinguíveis. Em 4.5b, é possível identificar a estruturação lamelar das camadas de deposição em uma grande partícula, com vazios que penetram em sua estrutura. Além disso, é característico uma estruturação microgranular com presença de grãos volumétricos de diferentes formatos, textura rugosa, aspecto poroso e arestas vivas. Os macroporos, principalmente na forma de canais com diâmetros da ordem de 10-20 μm , estão preenchidos com pequenas partículas de dimensões variadas, provavelmente quartzo. Na imagem de ampliação (Figura 4.5c), as microagregações observadas, foliações formadas por partículas lamelares, com formatos variados e espessura inferiores a 1 μm , podem ser compostos de caulinita e mica, típicos de solos saprolíticos.

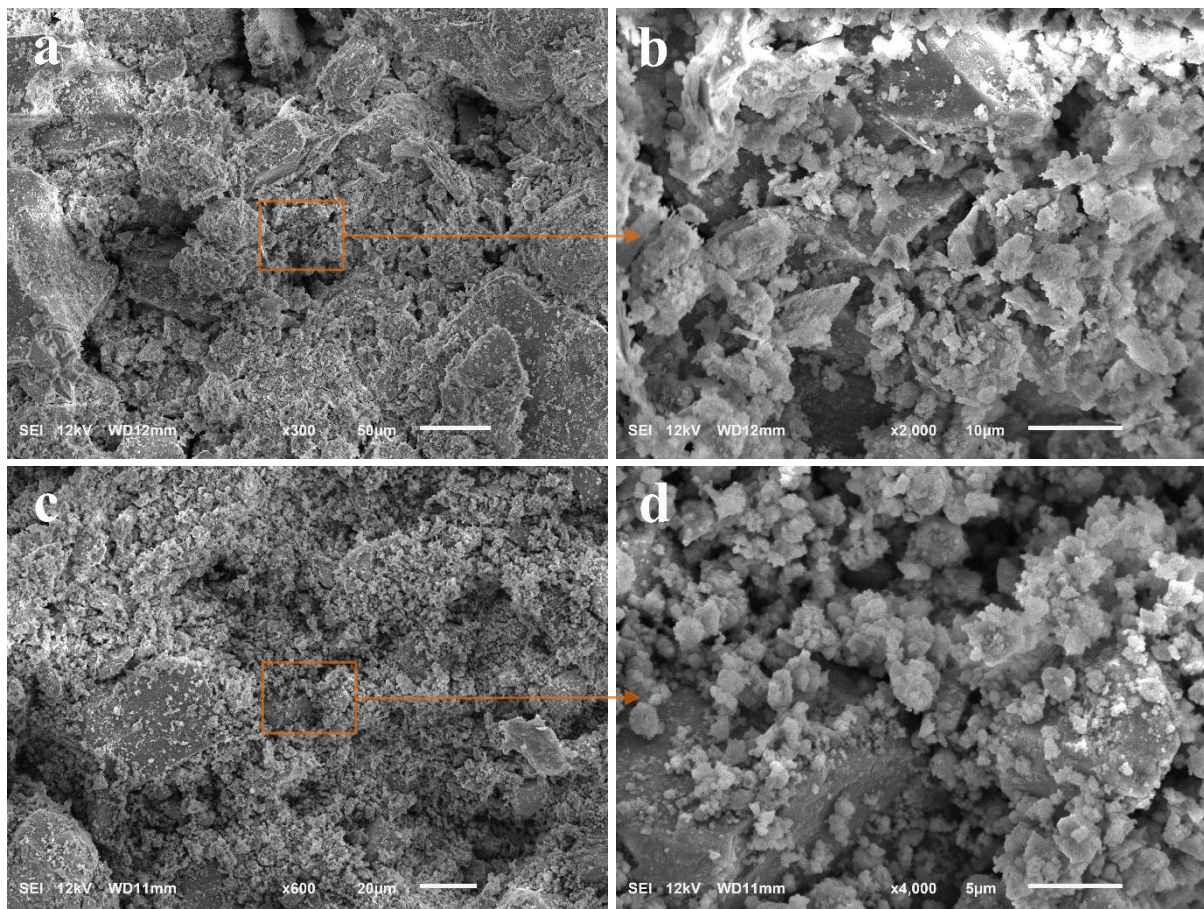
Figura 4.6: Fotomicrografias de S2 obtidas por microscopia óptica e MEV: (a) imagem de S2 obtida por microscopia óptica, demonstrando a grande presença torrões formados pela aglutinação de partículas de argila e silte envoltas em partículas maiores; (b) imagem da organização microestrutural de S2 obtida por MEV; (c) ampliação de “b”, com detalhe da estruturação de um torrão e do plasma argiloso que permeia a amostra.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Na figura 4.6a (S2), predomina a matiz vermelho e amarelo típica de solos lateríticos. Grande presença de grãos finos agregados, formando torrões (grumos) de minerais fortemente unidos, característico de solos com elevada porcentagem de partículas de atividade coloidal. Na imagem de MEV (4.6b), nota-se uma estrutura compacta e regular, característica de solos com grande presença de argilominerais. Estes aglomerados são constituídos, basicamente, por agentes cimentantes presentes nos solos, como a sílica, óxidos de ferro e de alumínio (NOGAMI, VILLIBOR, 1995), o que é condizente com os resultados obtidos no ensaio de FRX (Tabela 4.4). Na imagem 4.6c, observa-se a estruturação de um torrão e detalhe do plasma argiloso que permeia a amostra. Sua estrutura condiz com um ambiente de gênese sedimentar, onde a agregação das moléculas se dá por ligações iônicas.

Figura 4.7: Fotomicrografias do RCCr e FEAE obtidas por MEV: (a) morfologia do RCCr fino ($\varnothing \leq 0,15$ mm); (b) ampliação de “a”, apresentando detalhe de partículas com dimensões inferiores a $10 \mu\text{m}$; (c) morfologia dos FEAE; (d) ampliação de “c”, com detalhe do grande número de partículas, inferiores $5 \mu\text{m}$, aderidas às partículas maiores.



Fonte: Resultado da pesquisa.

O RCCr ($\varnothing \leq 0,15$ mm) apresentou morfologia irregular, com partículas de diversos tamanhos, formas variadas e de arestas e vértices angulares (Fig. 4.7a e 4.7b), o que se justifica em função do processo de britagem do RCCr (FERREIRA et al., 2019). Na imagem com maior ampliação (4.7b), observa-se um grande número de partículas, de dimensões inferiores a $10 \mu\text{m}$, apresentando estruturas volumétricas e lamelares, de superfície porosa com textura moderadamente rugosa e áspera, provavelmente provenientes de argamassas e concretos.

Analisando as imagens dos FEAE (Figuras 4.7c e 4.7d), pode-se observar grãos de tamanhos variados, consideravelmente menores que os grãos observados no RCCr, onde as partículas maiores são predominantemente volumétricas, moderadamente rugosas e possuem bordas levemente arredondadas. O grande número de pequenas partículas, inferiores $5 \mu\text{m}$, aderidas às partículas maiores, contribui para a elevada superfície específica ($263 \text{ m}^2/\text{kg}$) dos FEAE, o que auxilia na maior capacidade de interação química dos finos de escória de aciaria com os solos e o RCCr.

4.3.2 Ensaios de caracterização mecânica

As Tabelas 4.5 e 4.6 e as Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os valores médios dos parâmetros RCS e CBR das amostras de solo tratadas com os vários teores de RCCr e FEAE nos tempos de curas 0 e 7 dias. Os valores dos *CV* (Equação 4), utilizados como critério de aceitação dos resultados observados, também são apresentados.

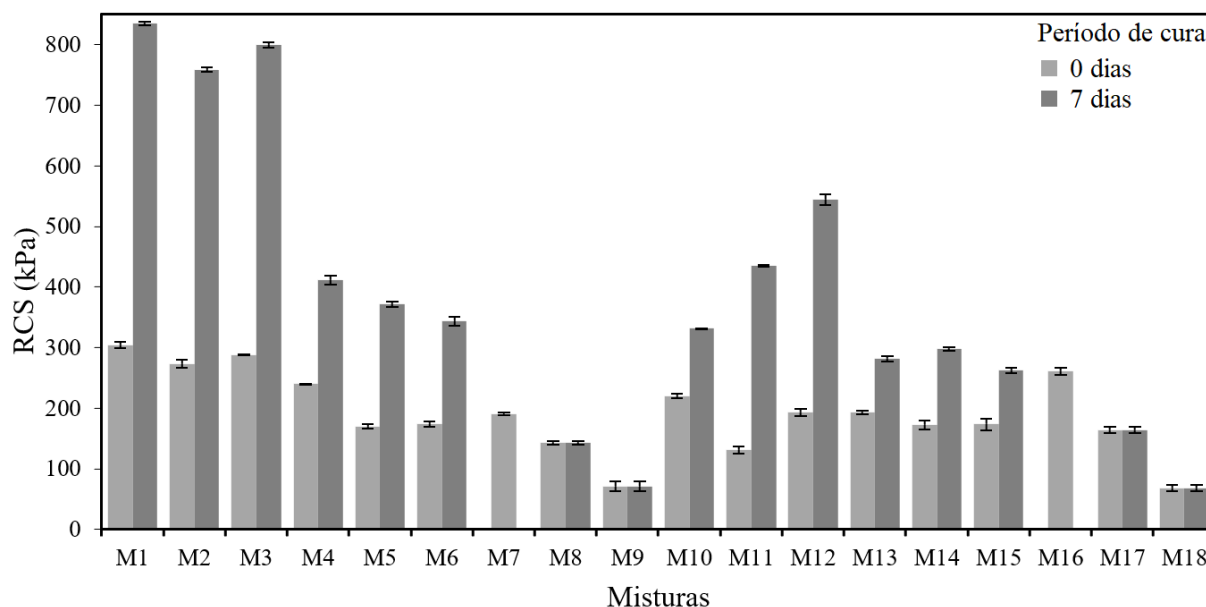
Tabela 4.5: Valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.

Mist.	Período de cura (dias)				Mist.	Período de cura (dias)			
	0		7			0		7	
	TR (kPa)	CV (%)	TR (kPa)	CV (%)		TR (kPa)	CV (%)	TR (kPa)	CV (%)
M1	304,31	5,6	834,89	3,3	M10	220,04	4,0	331,72	0,4
M2	273,59	6,6	758,95	3,5	M11	112,45	5,8	435,00	1,2
M3	288,03	1,0	799,72	4,7	M12	192,60	5,8	544,74	8,5
M4	240,00	0,6	411,31	7,4	M13	193,39	2,9	281,82	4,6
M5	169,82	4,0	372,20	4,6	M14	172,45	7,6	298,18	2,9
M6	173,56	4,4	344,20	7,5	M15	173,71	9,7	262,75	4,5
M7	190,93	1,5	190,93	1,5	M16	261,06	5,9	261,06	5,9
M8	142,65	3,2	142,65	3,2	M17	164,33	4,9	164,33	4,9
M9	71,47	7,9	71,47	7,9	M18	68,43	5,5	68,43	5,5

Mist.: Mistura; TR: Tensão de ruptura; CV: Coeficiente de variação.

Fonte: Resultado da pesquisa.

Figura 4.8: Valores médios de RCS das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.



Fonte: Resultado da pesquisa.

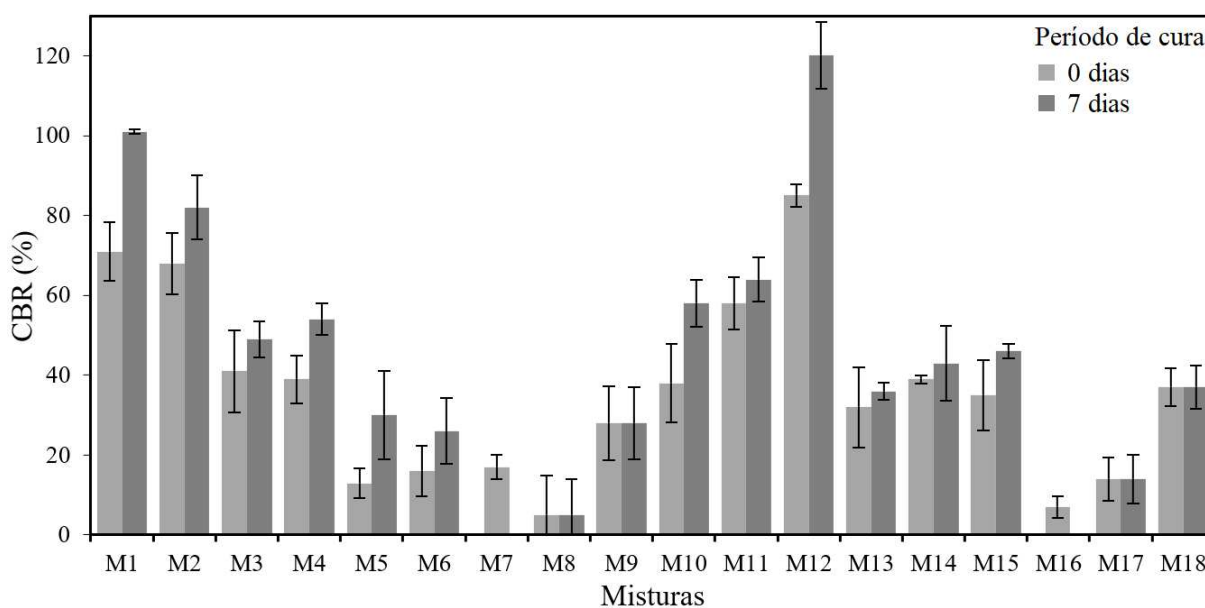
Tabela 4.6: Valores médios dos parâmetros CBR das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.

Mist.	Período de cura (dias)						Mist.	Período de cura (dias)					
	0	7	0	7	0	7		0	7	0	7		
	CBR (%)		CV (%)		Expans. (%)			CBR (%)		CV (%)		Expans. (%)	
M1	71	101	7,4	0,6	0,0	0,0	M10	38	58	9,8	5,8	0,0	0,0
M2	68	82	7,7	8,0	0,1	0,0	M11	58	64	6,6	5,6	0,0	0,0
M3	41	49	10,3	4,5	-0,1	0,0	M12	85	120	2,8	8,3	0,0	0,0
M4	39	54	6,0	4,0	0,1	0,0	M13	32	36	10,0	2,1	0,1	0,0
M5	13	30	3,6	11,1	-0,1	0,0	M14	39	43	1,0	9,3	0,3	0,3
M6	16	26	6,4	8,2	0,3	0,0	M15	35	46	8,8	1,8	0,2	0,2
M7	17	17	3,1	3,1	0,2	0,2	M16	7	7	2,8	2,8	1,4	1,4
M8	5	5	10,0	10,0	-0,2	-0,2	M17	14	14	5,5	5,5	0,2	0,2
M9	28	28	9,3	9,3	0,0	0,0	M18	37	37	4,8	4,8	0,1	0,1

Mist.: Misturas; CV: Coeficiente de variação; Expans.: Expansão CBR.

Fonte: Resultado da pesquisa.

Figura 4.9: Valores médios do índice CBR das misturas investigadas, compactadas na energia do Proctor normal.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Observa-se que os maiores valores de RCS e índice CBR foram obtidos para as composições com 20% de FEAE nos tempos de cura de 7 dias, para ambos os solos. Já o incremento de resistência com a adição do RCCr foi mais significativo no S2. Conforme esperado, por ser S2 um solo argiloso, a adição do RCCr melhora suas características granulométricas e, conseqüentemente, também seu desempenho mecânico. De acordo com outros estudos (HIDALGO et al., 2019; MOREIRA et al., 2020; SOUZA et al., 2020; LUKIANTCHUKI et al., 2021;), a estabilização do solo por meio da incorporação de resíduos de construção melhora a capacidade de carga do solo e a resistência à trinca por fadiga, tornando o material mais durável e reduzindo sua expansibilidade. Quando esse resíduo é adicionado a solos argilosos, ocorre um incremento do peso específico aparente seco máximo e da resistência ao cisalhamento, resultando em um material mais rígido e menos deformável (KIANIMEHR et al., 2019; SOUZA et al., 2020). Além disso, em misturas solo-cimento, a adição de resíduos de

construção contribui no ganho de resistência e melhora as características de compactação (REIS et al., 2014; REIS et al., 2018; MOREIRA et al., 2019; SOUZA et al., 2020).

Para os valores apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5 e Figuras 4.8 e 4.9, os ganhos mais expressivos foram os observados em M1 e M12, que, aos 7 dias de cura, apresentaram, comparativamente aos solos *in natura*, ganhos de 337% e 109%, na RCS, e 494% e 1614%, no índice CBR, respectivamente. Outro comportamento importante foi relativo à expansibilidade de S1 (0,2%) e S2 (1,4%), que reduziu para 0% em M1 e M12. Segundo Parsaei et al. (2021), a redução de expansão de solos melhorados com finos de escória acontece devido à ocorrência de reações de troca catiônicas entre os íons presentes no FEAE e no solo, gerando floculação/aglomeração das partículas e alterando sua estrutura. De acordo com Moreira et al. (2019) e Souza et al. (2020), a incorporação do RCCr também contribui na estabilização volumétrica de solos argilosos.

4.3.3 Ajuste dos modelos e obtenção das misturas otimizadas

Os modelos de regressão para as respostas RCS e CBR, obtidos a partir do DOE adotado nesta pesquisa, foram apresentados e discutidos nos capítulos 1 (subseção 2.3.4 e 2.3.5) e 2 (subseção 3.3.4). A partir dos resultados obtidos, um sistema de inequações, formado pelas equações de regressão e restrições impostas pelas normas técnicas ASTM D 4609 (ASTM, 2008) e DNIT 139-ES (DNIT, 2010b), indicou, como composições otimizadas, as misturas M1 e M12. A Tabela 4.7 apresenta, para as misturas otimizadas, os valores de Desejabilidade individual e composta obtidos para as propriedades mecânicas de interesse.

Tabela 4.7: Desejabilidade individual e composta.

Propriedade mecânica maximizada	Desejabilidade individual		Valores obtidos	
	M1	M12	M1	M12
Incremento da RCS (kPa)	0,75	0,81	486	345
CBR ao 0 dia (%)	1,00	0,74	76	70
CBR aos 7 dias (%)	1,00	0,70	103	92
Desejabilidade composta	0,91	0,77	-	-

Fonte: Resultado da pesquisa.

Obtidas as misturas otimizadas, realizaram-se os ensaios de DP. Com objetivo de avaliar as melhorias obtidas com a incorporação dos resíduos em S1 e S2, tanto os solos *in natura* como as misturas M1 e M12 foram submetidos ao ensaio de DP. Os resultados desses ensaios são apresentados e discutidos a seguir.

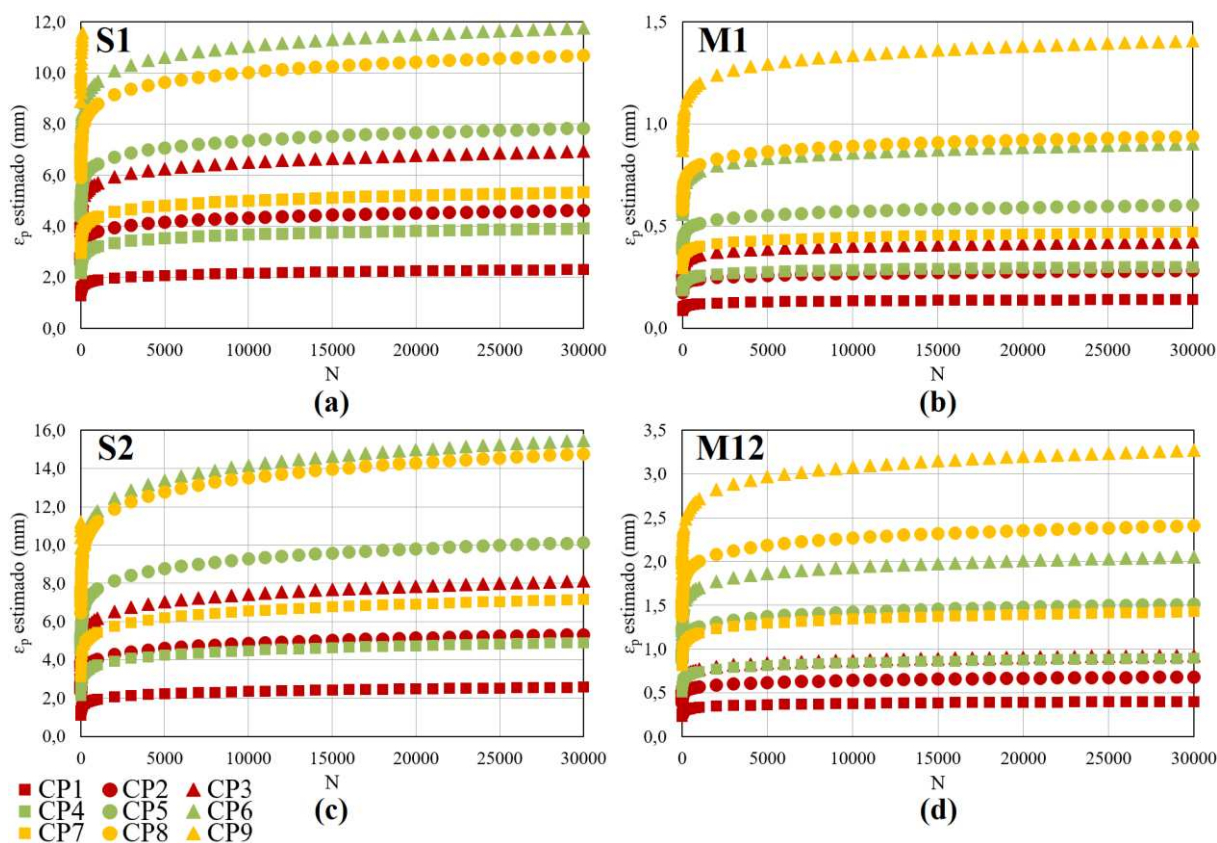
4.3.4 Determinação da deformação permanente

O dimensionamento de pavimentos é um processo que visa encontrar a combinação mais econômica de espessura de camada e tipo de material empregado, levando em consideração as propriedades físicas e mecânicas das camadas estruturais que o compõem e os esforços ocasionados pelo tráfego dos veículos ao longo da vida útil da rodovia. Tradicionalmente, os métodos utilizados nos projetos estruturais para construção de pavimentos são fundamentados em estudos empíricos (WERKMEISTER et al., 2004). Entretanto, quando se deseja mensurar o pavimento pelo método mecanicista, os materiais de pavimentação utilizados devem ser devidamente caracterizados por ensaios de carregamento cíclicos

(GUIMARÃES et al., 2019). Com esse propósito, a avaliação experimental do comportamento quanto à DP de materiais granulares que irão compor as camadas dos pavimentos flexíveis pode ser determinada. Assim, foram realizados, para os solos e misturas otimizadas aqui investigados, ensaios de DP com objetivo de analisar e classificar o acúmulo de deformação plástica nesses materiais. Ensaios triaxiais de carga repetida foram realizados em corpos de prova cilíndricos ($\text{Ø}10 \times 20 \text{ cm}$), compactados em 10 camadas superpostas na energia do Proctor normal. Os solos foram submetidos ao ensaio de DP logo após o procedimento de compactação. As misturas M1 e M2 foram submetidas à cura selada de 7 dias antes da realização dos ensaios. Os testes foram conduzidos até 30.000 ciclos em nove diferentes combinações de tensões (DNIT, 2018).

Desconsiderando apenas os 50 ciclos de carga iniciais (fase de condicionamento), as deformações permanentes totais obtidas para os solos e misturas otimizadas são apresentadas na Figura 4.10.

Figura 4.10: Variação do deslocamento plástico (ϵ_p) em função do número de ciclos de aplicação de carga (N).



Fonte: Resultado da pesquisa.

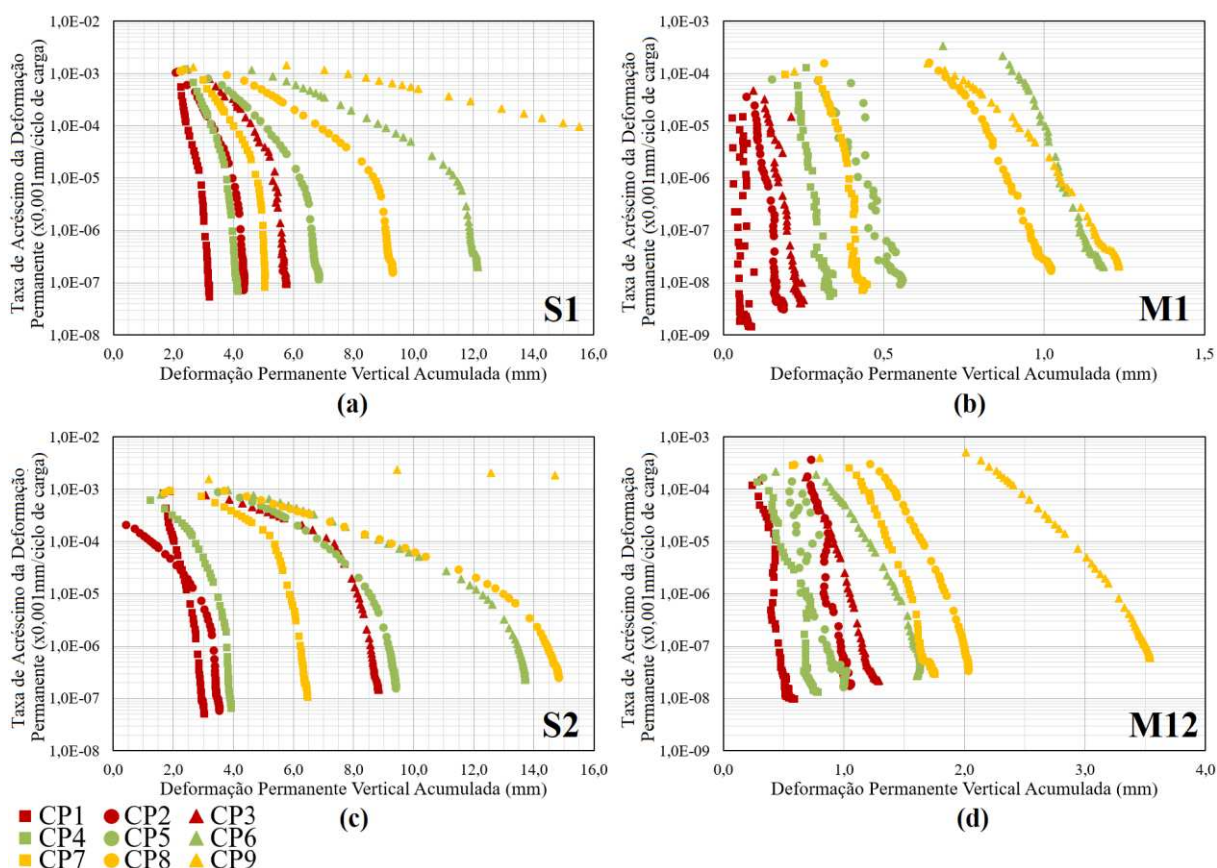
Para S1 e S2 (Figuras 4.10a e 4.10b), no ensaio de maior estado de tensões (CP9 [$\sigma_d = 360 \text{ kPa}$, $\sigma_3 = 120 \text{ kPa}$]), observa-se que houve ruptura (colapso incremental) do corpo de prova nos ciclos iniciais de aplicação de carga, indicando ser o solo inadequado para este nível de tensões tão elevado ($\sigma_1/\sigma_3 = 4$). Para outros estados de tensões, tanto S1 quanto S2 apresentaram DP superiores a 10 mm, observados em $N_{CP6} = 200$ ciclos, para S1, e em $N_{CP6} = 100$ ciclos e $N_{CP8} = 80$ ciclos, em S2. Importante destacar que S1 e S2 apresentaram, para os níveis de tensões finais e aos 30.000 ciclos de carga, DP superiores a 6% (12 mm), que é considerado alta. Para os ensaios conduzidos com nível de tensão desvio muito próximo da tensão

confinante, foram observadas DP entre 2-8 mm para S1 e 2-10 mm para S2, com S1, apresentando sempre menores deformações que S2.

As misturas M1 e M12 apresentaram resultados melhores do que os solos *in natura*, não sendo observado colapso incremental do corpo de prova em nenhum dos ensaios realizados. As DP máximas observadas em M1 e M12, atingidas em $\sigma_d = 360$ kPa e $\sigma_3 = 120$ kPa (CP9), foram de 1,2 mm e 3,5 mm, respectivamente. Comparativamente aos solos, M1 e M12 apresentaram, para os estados de tensões avaliados, reduções médias de 17 e 6 vezes na DP, respectivamente. Segundo Guimarães et al. (2019), o formato da curva da DP acumulada versus o número de ciclos aplicados, com rápido crescimento inicial seguido de uma fase de acomodação, representada pelo paralelismo em relação ao eixo horizontal, indica uma situação de acomodação dessas deformações.

A investigação da ocorrência de *shakedown* por meio de testes triaxiais de carga repetida, como os executados por Werkmeister (2004), analisa a taxa de acréscimo da deformação permanente em função da deformação permanente vertical acumulada, ou total. Segundo Cerni et al. (2012) e Lima et al. (2017), os estudos quanto à DP de materiais para camada de pavimentos fazem uso da Teoria do *Shakedown*. Essa teoria compreende a ideia de estabelecer uma tensão limite na qual o pavimento passa a ser estável com o surgimento de tensões residuais e o fim do acréscimo de deformações permanentes. Para taxa de acréscimo de DP de 10^{-7} mm/ciclo de carga, considera-se a ocorrência do fenômeno do *shakedown*. O comportamento dos solos e misturas otimizadas, avaliados quanto à taxa de acréscimo da DP em função da DP acumulada, são apresentados na Figura 4.11. As interpretações e análises dos resultados foram realizadas conforme a classificação dos quatro principais comportamentos (A, B, C e AB) constantes na norma DNIT 179-EI (DNIT, 2018).

Figura 4.11: Investigação da ocorrência de Shakedown.



Fonte: Resultado da pesquisa.

Para os gráficos apresentados na Figura 4.11, os dois eixos estão em escala logarítmica. No eixo das abcissas está representada a DP acumulada e no eixo das ordenadas está a taxa de acréscimo da DP por ciclo de carga, em ordem decrescente.

No caso do solo S1 (Figura 4.11a), todos os testes indicaram uma situação de DP crescente até o colapso incremental no maior nível de tensão, CP9. Para menores estados de tensões ($\sigma_1/\sigma_3 \leq 3$), a taxa de crescimento da DP atingiu valores muito baixos (menores que 10^{-7} mm/ciclo de carga). Ou seja, para esses baixos estados de tensão, S1 apresentou acomodamento plástico, atingindo o *shakedown*. A forma das curvas observadas é, predominantemente, tipo AB, com o CP9 apresentando curva tipo C.

Para o S2 (Figura 4.11c), as DP foram mais acentuadas, com CP9 apresentando colapso incremental em $N_{CP9} = 3$ ciclos; o *shakedown* foi atingido apenas em CP1, CP2 e CP4. Para grande parte das curvas de S2, as menores taxas acréscimo da DP apenas ocorrem após significativas deformações iniciais (comportamento AB).

Em M1 (Figura 4.11b) e M12 (Figura 4.11d), todos os testes indicaram uma situação de acomodação da DP, ou *shakedown*, pois a taxa de crescimento atingiu um valor inferior a 10^{-7} mm/ciclo de carga. O comportamento das curvas para M1 foi predominantemente tipo A. Para M12, o comportamento observado foi de maiores valores de DP iniciais, comparativamente a M1. Os comportamentos das curvas em M12 foram tipo A e tipo AB, indicando que o material apresentaria um acomodamento plástico após as baixas deformações iniciais. As duas misturas apresentaram bom comportamento frente a possibilidade de surgimento de DP que tendam ao colapso, com M1 apresentando melhores resultados.

A partir da base de dados gerada durante os ensaios anteriormente apresentados, foi possível realizar uma regressão não linear múltipla para cada material e obter os parâmetros de regressão para as equações de deformação permanente específica (ϵ_p). Os resultados são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Coeficientes Ψ_i dos modelos de DP dos solos e misturas otimizadas.

Material	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	R^2
S1	0,0380	-0,2397	1,0039	0,0573	0,88
S2	0,0182	-0,1146	1,0449	0,0803	0,91
M1	0,0008	0,0969	0,9994	0,0467	0,87
M12	0,0017	0,3929	0,7549	0,0545	0,85

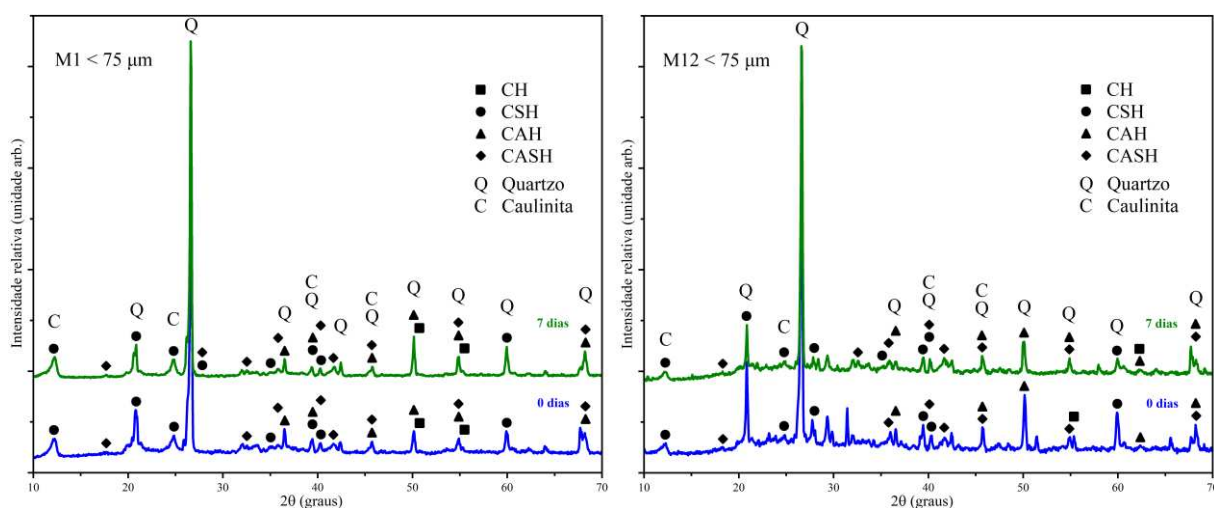
Fonte: Resultado da pesquisa.

Os parâmetros Ψ_i apresentados na Tabela 4.8, permitem estimar a DP, de acordo com o modelo apresentado na Equação 3, para distintos estados de tensão e número N.

4.3.5 Caracterização mineralógica e morfológica dos solos e misturas otimizadas

Uma análise mineralógica por DRX foi realizada em amostras de M1 e M12 aos 0 e 7 dias de cura. As amostras foram cominuídas até passarem integralmente na peneira de n.º 200 (#75 µm). Os difratogramas são apresentados na Figura 4.12.

Figura 4.12: Difratogramas de M1 e M12 aos 7 dias de cura.

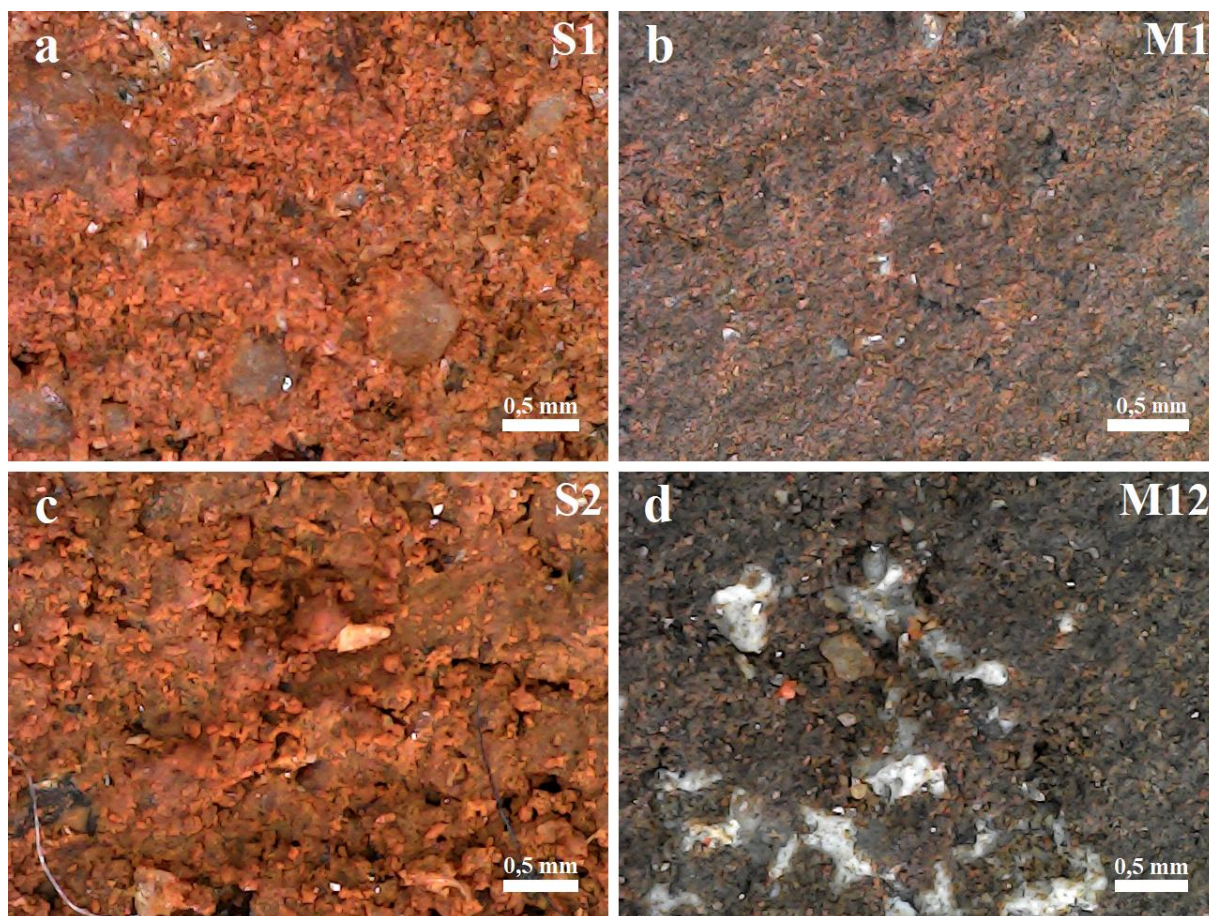


Fonte: Resultado da pesquisa.

Os resultados do ensaio de DRX, na Figura 4.12, indicam que os produtos cimentícios gerados pelo processo de hidratação do FEAE são os compostos hidróxido de cálcio (CH), silicato de cálcio hidratado (CSH), aluminato de cálcio hidratados (CAH) e sílico-aluminato de cálcio hidratado (CASH). A formação desses compostos também foi observada em outros estudos envolvendo solos melhorados com finos de escória (GU et al., 2018; ISMAIL et al., 2018; MUJTABA et al., 2018; WU et al., 2019; MOZEJKO, FRANCISCA, 2020; PARSAEI et al., 2021; LOPES et al., 2022, 2023). Portanto, pode-se concluir que a maior rigidez observada em M1 e M12, comparativamente aos solos na condição pura, estão positivamente correlacionadas com os componentes cimentícios identificados no ensaio de DRX. Essa maior rigidez influenciou diretamente nos baixos valores de DP observados em M1 e M12, garantindo o bom comportamento dessas misturas frente a possibilidade de surgimento de DP que tendam ao colapso. Esses produtos cimentícios gerados pela hidratação ocorrida na etapa de compactação, e pelas reações químicas entre os óxidos de cálcio presentes no FEAE e a sílica e alumina presentes nos solos e RCCr, recobrem as superfícies dos grãos do solo, preenchem os poros e fortalecem as ligações intergranulares.

A distribuição das partículas e o comportamento microestrutural de S1, S2, M1 e M12 compactados são apresentados em imagens obtidas por microscopia óptica na Figura 4.13. As imagens são referentes às amostras de S1 e S2 logo após o processo de compactação, e M1 e M12, após 7 dias de cura selada.

Figura 4.13: Fotomicrografias de S1, S2, M1 e M12 obtidas por microscopia óptica: (a) imagem de S1 após processo de compactação; (b) M1 após processo de compactação, aos 7 dias de cura; (c) imagem de S2 após processo de compactação; (d) M12 após processo de compactação, aos 7 dias de cura.



Fonte: Resultado da pesquisa.

As imagens evidenciam que os poros intragranulares diminuem com a adição dos resíduos aos solos, onde as misturas M1 e M12 (Figuras 4.13b e 4.13d) aos 7 dias de cura são, nitidamente, mais densas (menor porosidade), quando comparadas aos solos *in natura*. Os tons escuros observados em M1 e M12 são devido aos 20% de FEAE nas misturas. A textura observada em S1 (Figura 4.13a) apresenta menor número de vazios e maior coesão, comparativamente a S2 (Figura 4.13c). Percebe-se, em S2, a presença de macroporos na forma de canais, já não visíveis em M12 (Figura 4.13d). Para as imagens apresentadas, M1 (Figura 4.13b) demonstra maior grau de coesão.

Conforme observado nos padrões de DRX apresentados na Figura 4.12, fica clara a formação de compostos como CSH e CAH. CSH é um conhecido produto resultante de reações primárias do cimento Portland, desempenhando um efetivo papel no ganho de resistência de materiais de engenharia. Constitui grande parte do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratada, sendo o principal responsável pelas suas propriedades mecânicas (FIROOZI et al., 2017; ISMAIL et al., 2018). A ação cimentante proporcionada pelos FEAE leva a produtos hidratados que permeiam os vazios do solo e ligam fortemente as partículas entre si, aumentando a rigidez das misturas e gerando uma matriz mais densa, conforme observado nas imagens de M1 e M12. Conseqüentemente, a melhora da rigidez das misturas contribuiu para as baixas taxas de acréscimo do deslocamento plástico (ϵ_p) (Figura 4.11b e 4.11d) observadas. Isso garantiu que M1 e M12, quando submetidas aos ensaios triaxiais de

cargas repetidas, em ensaios de apenas 30.000 ciclos, apresentassem acomodamento das DP plásticas (*shakedown*).

4.4 Conclusão

Este estudo investigou o comportamento quanto à DP induzida por ensaios triaxiais de cargas repetidas, bem como as características mineralógicas e morfológicas de dois solos melhorados com resíduos industriais. Os RCCr e FEAE foram utilizados na estabilização de um solo argiloso e outro arenoso como uma estratégia de melhorar o desempenho desses solos para uso em camadas estruturais de pavimentos. A abordagem de Planejamento de Experimentos, Metodologia de Superfícies de Resposta e função Desejabilidade foram utilizadas na obtenção dos teores de solo e resíduos que maximizam as respostas mecânicas das misturas investigadas. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir:

- i. o DOE, aliado à Metodologia de Superfícies de Resposta e função Desejabilidade permitiram a obtenção dos teores de solo, RCCr e FEAE, que maximizam as respostas mecânicas das misturas investigadas;
- ii. comparativamente aos solos *in natura*, as adições de RCCr e FEAE contribuíram significativamente para o melhor desempenho das misturas estudadas. Considerando a massa seca dos materiais, a incorporação de 20% de FEAE no solo arenoso (M1) e 62% de RCCr2 e 20% FEAE no solo argiloso (M12), é recomendada para estabilização dos solos aqui estudados, pois essa dosagem proporcionou os maiores ganhos de resistência nas misturas. Essas alterações foram atribuídas, principalmente, ao processo de hidratação do FEAE, que levaram a formação de produtos cimentícios durante a etapa de cura em câmara úmida, e a correção granulométrica promovida pelo RCCr;
- iii. nos ensaios de DRX das amostras de M1 e M12, confirmou-se que a adição dos FEAE nas misturas estudadas está positivamente correlacionada com as baixas taxas de acréscimo da DP observadas nos ensaios triaxiais de cargas repetidas. Isso se deve à formação de produtos típicos de reações cimentícias, como o hidróxido de cálcio (CH), silicato de cálcio hidratado (CSH), aluminato de cálcio hidratados (CAH) e sílico-aluminato de cálcio hidratado (CASH);
- iv. as misturas M1 e M12, compactadas na energia do Proctor normal, tiveram um bom desempenho em relação à DP, apresentando baixas deformações e atingindo o *shakedown* em todos os estados de tensões analisados. As DP específicas máximas atingidas por M1 e M12, após os 30.000 ciclos, foram de 0,6% (DP plástica total de 1,2 mm) e 1,8% (DP plástica total de 3,5 mm), respectivamente;
- v. os resultados dos testes de DP, nos vários estágios de tensões analisados e pela teoria do *shakedown*, demonstraram que uma camada de pavimento feita com as misturas M1 e M12, após as deformações observadas a, aproximadamente, 30.000 ciclos de cargas, não desenvolverá mais deformações significativas e o material responderá quase elasticamente.

Os resultados obtidos demonstraram um grande potencial no uso de RCCr e FEAE na estabilização de solos arenoso e argiloso, sinalizando que esses resíduos podem ser misturados com solos em teores específicos para uso em camadas estruturais de pavimentos rodoviários.

Entretanto, para o comportamento de DP observado, variações certamente ocorrerão devido à composição dos RCC e escória aqui utilizados. Tal limitação implica que resíduos provenientes de outras fontes e com características distintas dos aqui analisados, devem ser testados para obter parâmetros representativos para projetos de pavimentos. É recomendável que estudos futuros sejam realizados e que diferentes composições de RCC (por exemplo, apenas de concreto, apenas cerâmica ou misturas desses) e escórias sejam avaliadas. Isso contribui no aprofundando do conhecimento sobre o comportamento do uso de RCC e finos de escória na estabilização de solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262-281, 2018.
- 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. 2021, 10p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM D 2487-17e1**. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, Pensilvânia, 2017. 10p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM D 4609**. Evaluating effectiveness of chemicals for soil stabilization. ASTM International, Pensilvânia, 2008. 5p.
- ARIOĞLU AKAN, M. Ö.; DHAVALÉ, D. G.; SARKIS, J. Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 1195-1207, 2017.
- ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M. M.; BO, M. W. Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 8, p. 1077-1088, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021. 54p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas de pavimentação - procedimentos. Rio de Janeiro, 2004a. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos. Rio de Janeiro, 2004b. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c. 21p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019. 3p.
- 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 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016b. 12p.
- 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 6508**: Solo - Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016e. 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, 2016f. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7182**: Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016g. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (n.º 200). Rio de Janeiro, 2012a. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012b. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12023**: Solo-cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012c. 11p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001. 7p.
- 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.
- BARBUDO, A.; AGRELA, F.; AYUSO, J.; JIMÉNEZ, J. R.; POON, C. S. Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 129-138, 2012.
- BEHNOOD, A. Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: a state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. **Transportation Geotechnics**, v. 17, parte A, p. 14-32, 2018.
- BRANCA, T. A.; COLLA, V.; ALGERMISSEN, D.; GRANBOM, H.; MARTINI, U.; MORILLON, A.; PIETRUCK, R.; ROSENDAHL, S. Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. **Metals**, v. 10, n. 3, p. 1-18, 2020.
- BRAND, A.S.; SINGHVI, P.; FANIJO, E.O.; TUTUMLUER, E. Stabilization of a clayey soil with ladle metallurgy furnace slag fines. **Materials**, v. 13, n. 19, 2020.
- CABALAR, A. F.; ZARDIKAWI, O. A. A.; ABDULNAFAA, M. D. Utilisation of construction and demolition materials with clay for road pavement subgrade. **Road Materials and Pavement Design**, v. 20, n. 3, p. 702-714, 2019.
- CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de experimentos usando o Statistica**. E-papers Serviços Editoriais: Rio de Janeiro, 2003. 261p.

- CARDOSO, R.; SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. **Waste Management**, v. 49, p. 131-145, 2016.
- CARVALHO, J. M. F. et al. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 397-409, 2019.
- CERNI, G.; CARDONE, F.; VIRGILI, A.; CAMILLI, S. Characterisation of permanent deformation behaviour of unbound granular materials under repeated triaxial loading. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 79-87, 2012.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-PRO 003**: Coleta de amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro, 1994a. 4p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 258**: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV, Solos, Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994b. 14p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 256**: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão, Solos, Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994c. 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 202**: Solo-cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994d. 7p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-ME 201**: Solo-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994e. 4p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-PRO 199**: Redução de amostras de campo de agregados para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 1996a. 5p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma DNER-CLA 259**: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996b. 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Norma DNER-PRO 120**: Procedimento - coleta de amostra de agregado. Rio de Janeiro, 1997.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Norma DNER-ME 035**: Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 1998. 6p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 179/2018-IE**: Pavimentação - Solos - Determinação da deformação permanente - Instrução de ensaio. Rio de Janeiro, 2018. 20p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 141-ES**: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010a. 9p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Norma 139-ES**: Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010b. 8p.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 172-ME**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016. 17p.
- DELONGUI, L. et al. Construction and demolition waste parameters for rational pavement design. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 105-112, 2018.
- DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.
- EMMANUEL, E. et al. Simplex lattice strength optimization of lime-micro silica stabilized coir fiber-reinforced soil. **Journal of Natural Fibers**, p. 1-17, 2020.
- EUROSTAT. **Waste statistics**. 2021. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Waste_treatment. Acesso em: 30 ago. 2021.
- FERREIRA, R. L. S.; ANJOS, M. A. S.; NÓBREGA, A. K. C.; PEREIRA, J. E. S.; LEDESMA, E. F. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, n. 208, p. 601-612, 2019.
- FIROOZI, A. A.; GUNAY OLGUN, C.; FIROOZI, A. A.; BAGHINI, M. S. Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 8, 2017.
- GU, X.; YU, B.; DONG, Q.; DENG, Y. Application of secondary steel slag in subgrade: Performance evaluation and enhancement, **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 102-108, 2018.
- GUIMARÃES, A.C.R. Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Tese, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- GUIMARÃES, A. C. R.; MOTTA, L. M. G.; CASTRO, C. D. Permanent deformation parameters of fine - grained tropical soils. **Road Materials and Pavement Design**, v. 20, n. 7, p. 1664-1681, 2019.
- GUIMARÃES, A. C. R. et al. Study of controlled leaching process of steel slag in Soxhlet extractor aiming employment in pavements. **Transportation Geotechnics**, v. 27, 100485, 2021.
- HE, T.; LI, Z.; ZHAO, S.; ZHAO, Z.; ZHAO, X. Effect of reductive component-conditioning materials on the composition, structure, and properties of reconstructed BOF slag. **Construction and Building Materials**, v. 255, 119269, 2020.
- HIDALGO, C.; CARVAJAL, G.; MUÑOZ, F. Laboratory Evaluation of Finely Milled Brick Debris as a Soil Stabilizer. **Sustainability**, v. 11, n. 4, 2019.
- HUANG, B. et al. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 36-44, 2018.
- HOSSAIN, M. U.; WU, Z.; POON, C. S. Comparative environmental evaluation of construction waste management through different waste sorting systems in Hong Kong. **Waste Manag.**, v. 69, p. 325-335, 2017.
- 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**, v. 37, p. 401-411, 2018.

- JAMES O'CONNOR et al. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 419, 126478, 2021.
- JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; AGRELA, F.; LÓPEZ, M.; GALVÍN, A. P. Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 58, p. 88-97, 2012.
- KIANIMEHR, M.; SHOURIJEH, P. T.; BINESH, S. M.; MOHAMMADINIA, A.; ARULRAJAH, A. Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils. **Construction and Building Materials**, v. 227, 116792, 2019.
- KLEINERT, T. R.; FEDRIGO, W.; CATEN, C. S.; NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P. Aplicação da metodologia de projeto de experimentos na dosagem de misturas de reciclagem de pavimentos com adição de cimento. **Transportes**, v. 27, n. 1, p. 111–127, 2019.
- LI, J.; ZUO, J.; CAI, H.; ZILLANTE, G. Construction waste reduction behavior of contractor employees: An extended theory of planned behavior model approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1399-1408, 2018.
- LIMA, C. D. A. et al. Mechanical characterization of fine-grained lateritic soils for mechanistic-empirical flexible pavement design. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 48, p. 20180890, 2020.
- LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; ARAGÃO, F. T. S. Effects of compaction moisture content on permanent deformation of soils subjected to repeated triaxial load tests. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2673, n. 2, p. 466-476, 2019.
- LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; ARAGÃO, F. T. S. A permanent deformation predictive model for fine tropical soils considering the effects of the compaction moisture content on material selection. **Transportation Geotechnics**, v. 28, 100534, 2021.
- LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; GUIMARÃES, A. C. R. Estudo da deformação permanente de britas granito-gnaiss para uso em base e sub-base de pavimentos. **Transportes**, v. 25, n. 2, p. 41-52, 2017.
- LOCKREY, S.; NGUYEN, H.; CROSSIN, E.; VERGHESE, K. Recycling the construction and demolition waste in Vietnam: opportunities and challenges in practice. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 757-766, 2016.
- LOPES, E. C. et al. Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n.14, p. 5003-5014, 2022.
- LOPES, E. C. et al. Stabilisation of clayey and sandy soils with ladle furnace slag fines for road construction. **Road Materials and Pavement Design**, v. 24, n. 1, p. 247-266, 2023.
- LU, C. et al. Resilient and permanent deformation behaviors of construction and demolition wastes in unbound pavement base and subbase applications. **Transportation Geotechnics**, v. 28, 100541, 2021.
- LUKIANCHUKI, J. A. 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**, v. 39, p. 919-942, 2021.

- MAHPOUR, A. Prioritizing barriers to adopt circular economy in construction and demolition waste management. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 134, p. 216-227, 2018.
- MARTINS, A. C. P. et al. Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance. **Construction and Building Materials**, v. 291, 123265, 2021.
- MOREIRA, E. B.; BALDOVINO, J. A.; ROSE, J. L.; IZZO, R. L. S. Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11, n. 2, p. 369-378, 2019.
- MOREIRA, E. B.; BALDOVINO, J. J. A.; IZZO, R. L. S.; ROSE, J. L. Impact of sustainable granular materials on the behavior sedimentary silt for road application. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, n. 1, p. 917-933, 2020.
- MOZEJKO, C. A.; FRANCISCA, F. M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 239, 117901, 2020.
- MUJTABA, H.; AZIZ, T.; FAROOQ, K.; SIVAKUGAN, N.; DAS, B. M. Improvement in engineering properties of expansive soils using ground granulated blast furnace slag. **Journal of the Geological Society of India**, v. 92, p. 357-362, 2018.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995. 240p.
- NUNES, K. R. A.; MAHLER, C. F. Comparison of construction and demolition waste management between Brazil, European Union and USA. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 4, p. 415-422, 2020.
- OLIVEIRA, C. F.; PIRES, P. J. M.; TEIXEIRA, J. E. S. L. Physical, mechanical, and microstructure investigation of tropical clayey soils stabilised with desulfurisation slag for pavement application. **Road Materials and Pavement Design**, v. 22, n. 6, p. 1442–1453, 2019.
- OUDA, O. K. M. et al. A case study of sustainable construction waste management in Saudi Arabia. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, n. 12, p. 2541-2555, 2017.
- PARSAEI, M.; VAKILI, A. H.; SALIMI, M.; FARHADI, M. S.; FALAMAKI, A. 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**, v. 80, n. 8, p. 6303-6320, 2021.
- PICKIN, D. J.; RANDELL, P. **Australian National Waste Report 2016**. Department of the Environment and Energy, 2017. 74p.
- PIRES, P. M.; SUDO LUTIF TEIXEIRA, J. E.; NEPOMUCENO, D. V.; FURIERI, E. C. Laboratory and field evaluation of KR slag–stabilized soil for paving applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 9, 04019182, 2019.
- POH, H. Y.; GHATAORA, G. S.; GHAZIREH, N. Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, n. 2, p. 229–240, 2006.
- PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Decreto municipal n.º 48.075, de 28 de dezembro de 2006**. Disponível em: <https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/decreto-48075-de-28-de-dezembro-de-2006>. Acesso em: 15 de out. 2017.

- PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **PMSP/SP ETS-001**: camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil. São Paulo, 2003. 14p.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE BAURU – ESTADO DE SÃO PAULO. **Índice do Decreto n.º 11.689, de 21 de outubro de 2011**. 32p.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO GONÇALO. Atos Oficiais, em 21 de julho de 2017. **Lei n.º 714/2017**. 7p.
- REIS, J. H. C.; SOARES SILVA, S.; ILDEFONSO, J. S.; YSHIBA, J. K. Evaluation of soil, cement and construction and demolition waste (CDW) mixtures for use in road pavement base and sub-base applications. **Key Engineering Materials**, v. 634, p. 247-255, 2014.
- REIS, L. R. M. et al. Use of waste from construction and demolition in the manufacture of soil-cement bricks: a sustainable alternative. **Materials Science Forum**, v. 930, p. 137-141, 2018.
- ROBAYO SALAZAR, R. A.; MATTEY CENTENO, P. E.; SILVA URREGO, Y. F.; BURGOS GALINDO, D. M.; DELVASTO ARJONA, S. Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. **Tecnura**, v. 19, n. 44, p. 157-170, 2015.
- RUIZ, L. A. L.; RAMÓN, X. R.; DOMINGO, S. G. The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, 2020.
- SOUZA, J. M.; RUDNICK, R. C.; LUKIANTCHUKI, J. A. Evaluation of the incorporation of construction waste (CW) for the stabilization of soil-cement mixtures. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 261-280, 2020.
- VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 103, p. 192-204, 2015.
- WANG, J.; WU, H.; TAM, V. W. Y.; ZUO, J. Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 1004-1014, 2019.
- WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F. Pavement design model for unbound granular materials. **Journal of Transportation Engineering**, v. 130, n. 5, p. 665-674, 2004.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. **2021 World Steel in Figures**. World Steel Association, 2021. Disponível em: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2021-World-Steel-in-Figures.pdf>
- WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel industry co-products**. World Steel Association, 2020. Disponível em: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-industry-co-products.pdf>
- WU, J. et al. Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways, **Soils and Foundations**, v. 59, n. 4, p. 955-965, 2019.
- XUAN, D. X.; MOLENAAR, A. A. A.; HOUBEN, L. J. M. Evaluation of cement treatment of reclaimed construction and demolition waste as road bases. **Journal of Cleaner Production**, v. 100, p. 77-83, 2015.

- YILDIRIM, I.; PREZZI, M. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. **Advances in Civil Engineering**, v. 2011, 2011.
- YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Subgrade stabilisation mixtures with EAF steel slag: an experimental study followed by field implementation. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 6, p. 1754–1767, 2022.
- ZAGO, J. P. et al. Study of the permanent deformation of three soils employed in highway subgrades in the municipality of Santa Maria-RS, Brazil. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 14, p. 729–739, 2021.
- ZHANG, J.; PENG, J.; ZHANG, A.; LI, L. Prediction of permanent deformation for subgrade soils under traffic loading in Southern China, **International Journal of Pavement Engineering**, 2020.
- ZHAO, Y.; GOULIAS, D.; TEFA, L.; BASSANI, M. Life cycle economic and environmental impacts of CDW recycled aggregates in roadway construction and rehabilitation. **Sustainability**, v. 13, n. 15, 2021.
- ZHENG, L. et al. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 405-413, 2017.

CAPÍTULO 5

5.1 Conclusão geral

A utilização de um delineamento de misturas por Planejamento de Experimentos e análise por Metodologia de Superfícies de Resposta mostrou-se adequada para o estudo de composições solo-resíduos, possibilitando a obtenção de modelos matemáticos ajustados e estatisticamente significativos, que descrevem adequadamente o comportamento das respostas RCS (resistência à compressão simples) e índice CBR (*California Bearing Ratio*) em função dos fatores solo, RCCr (agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil) e FEAE (finos de escória oxidante de aciaria elétrica). Comparativamente aos solos na condição natural, as adições de RCCr e FEAE contribuíram significativamente para o ganho de resistência mecânica das misturas, sendo que os FEAE foram os principais responsáveis no ganho de resistência, com o incremento do tempo de cura.

Os ensaios químicos e microestruturais possibilitaram a identificação dos principais produtos de hidratação das misturas solo-resíduos: CH (hidróxido de cálcio [portlandita]), CSH (silicato de cálcio hidratado), CAH (aluminato de cálcio hidratado) e CASH (sílico-aluminato de cálcio hidratado [tringita]). Esses produtos geraram ligações fortes entre os grãos de solo e RCCr e preencheram os espaços vazios existentes entre as partículas sólidas. Proporcionaram, assim, a obtenção de uma matriz de solo mais rígida e densa, e, conseqüentemente, promoveram a melhoria das propriedades de engenharia das misturas investigadas.

Os resultados experimentais indicaram que os resíduos estabilizaram com sucesso os solos analisados. Além da estabilização volumétrica, a incorporação dos resíduos aos solos arenoso e argiloso proporcionou incrementos da ordem de 511% e 167% da RCS, 1088% e 2020% do índice CBR e 87% e 120% do módulo de resiliência, respectivamente. As melhorias nas propriedades mecânicas foram atribuídas aos efeitos da correção granulométrica proporcionada pelo RCCr, pelas reações cimentícias promovidas pelos FEAE, aumento da energia de compactação e incremento do tempo de cura, melhorando o desempenho dos solos.

A incorporação dos resíduos aos solos gerou misturas com maiores pesos específicos aparente seco máximo e menores teores de umidade quando comparadas com as amostras dos solos na condição natural. Essas mudanças podem ser atribuídas à substituição parcial das partículas de solo pelos resíduos, que possuem maior massa específica. Outros fatores, como melhor empacotamento dos grãos e a capacidade dos FEAE em promover floculação e aglutinação dos argilominerais por mecanismos de troca catiônica, também são responsáveis pelas modificações observadas.

Constatou-se que o uso de RCCr e FEAE na estabilização dos solos tropicais aqui investigados é uma solução técnica viável sob a perspectiva de aplicação em obras de pavimentação. Esses materiais foram capazes de melhorar as propriedades de engenharia dos solos estudados, conferindo a eles maior rigidez, menor expansão e maior trabalhabilidade. A possibilidade do uso desses resíduos em obras de pavimentação, que consomem grandes quantidades de recursos naturais, apresenta-se como uma alternativa ambientalmente correta de reuso desses subprodutos industriais.

A adição dos resíduos aos solos gerou misturas com bom desempenho em relação à deformação permanente, apresentando baixas deformações e atingindo o *shakedown* em todos os estados de tensões analisados. Os resultados dos testes indicaram que, para os estágios de tensões analisados e pela teoria do *shakedown*, uma camada de pavimento construída com as

misturas otimizadas, após as deformações plásticas iniciais observadas aos 30.000 ciclos de cargas, não desenvolverá mais deformações significativas e o material responderá quase que elasticamente.