

FERNANDO HENRIQUE NEIVA PEREIRA FERREIRA

**DOSAGEM ESTATÍSTICA DE MISTURAS SOLO-RESÍDUOS SIDERÚRGICOS
VISANDO A APLICAÇÃO EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS**

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

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

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

T

F383d
2023
Ferreira, Fernando Henrique Neiva Pereira, 1998-
Dosagem estatística de misturas solo-resíduos siderúrgicos
visando a aplicação em camadas estruturais de pavimentos
asfálticos / Fernando Henrique Neiva Pereira Ferreira. – Viçosa,
MG, 2023.
1 dissertação eletrônica (85 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2023.
Referências bibliográficas: f. 72-85.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.226>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Resíduos industriais - Reaproveitamento. 2. Estradas -
Projetos e construção. 3. Pavimentos. I. Pitanga, Heraldo Nunes,
1973-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 625.8


FERNANDO HENRIQUE NEIVA PEREIRA FERREIRA

**DOSAGEM ESTATÍSTICA DE MISTURAS SOLO-RESÍDUOS SIDERÚRGICOS
VISANDO A APLICAÇÃO EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS**


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

APROVADA: 28 de fevereiro de 2023

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 FERNANDO HENRIQUE NEIVA PEREIRA FER
Data: 27/04/2023 17:51:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fernando Henrique Neiva Pereira Ferreira
Autor

Documento assinado digitalmente
 HERALDO NUNES PITANGA
Data: 28/04/2023 09:01:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Heraldo Nunes Pitanga
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por abençoar os nossos caminhos durante esse trabalho. A fé que temos em Ti alimentou nosso foco, força, disciplina e cumplicidade. Somos gratos pelas bênçãos que recaíram não apenas sobre nós, mas também sobre todos os amigos e familiares durante essa trajetória acadêmica.

Aos familiares e amigos, por todo apoio incondicional neste e ao longo desse processo, tendo respaldo para os momentos conturbados e afortunados.

A minha avó Vera Lucia Neiva, por ser meu anteparo para os meus momentos turbulentos.

Aos professores Heraldo Nunes Pitanga, Klaus Henrique de Paula Rodrigues e Taciano Oliveira da Silva, por todo apoio técnico, orientação, críticas, companheirismo e direcionamento fornecidos durante a pesquisa.

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

Aos técnicos Giovani Levi Sant'Anna e Marcelo Sebastião de Souza, pelo apoio na execução dos ensaios.

Aos estagiários Mariane Modesto, Mateus Chabudee, Matheus Damas, Juliana Silva, Lêda Peron e Márcio Lugão, pelo auxílio no laboratório.

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

Agradecemos a todos que de alguma forma contribuíram para a construção deste trabalho.

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

RESUMO

FERREIRA, Fernando Henrique Neiva Pereira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2023. **Dosagem Estatística de misturas solo-resíduos siderúrgicos visando a aplicação em camadas estruturais de pavimentos asfálticos.** Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.

O aumento da urbanização e da industrialização levou à geração de uma quantidade significativa de resíduos sólidos, o que representa uma grande preocupação para a sociedade. No entanto, reutilizar esses resíduos pode ser uma oportunidade valiosa para conservar recursos naturais, reduzir o consumo de energia e evitar a degradação ambiental e as restrições de espaço associadas à disposição de resíduos. Portanto, do ponto de vista da sustentabilidade ambiental, a reutilização de resíduos é uma alternativa altamente vantajosa. Incorporar resíduos industriais no solo para uso na construção de estradas é uma solução promissora para mitigar o impacto ambiental dos resíduos. Essa abordagem não apenas melhora as propriedades do solo, mas também promove o desenvolvimento sustentável, já que a demanda por materiais tradicionais para engenharia e construção de estradas aumentou consideravelmente. Essa demanda é impulsionada pela escassez de materiais convencionais e pelas restrições e regulamentos ambientais que regem a construção de pavimentos. Portanto, é essencial explorar materiais alternativos em detalhes para identificar soluções técnicas mais econômicas e ecologicamente corretas. Embora tenham sido realizados estudos investigando o uso de resíduos industriais como estabilizadores de solo para engenharia de pavimentos, há trabalhos limitados utilizando um método de planejamento experimental para determinar as dosagens ideais de materiais não convencionais quando misturados com solos. Para avaliar a aplicabilidade técnica de misturas de solo-resíduos de aço em trabalhos de pavimentação, esta pesquisa propôs um protocolo de otimização de dosagens usando dois tipos de amostras de solo: um solo argiloso (S1) e um solo arenoso (S2), combinados com escória de aciaria elétrica primária (EAEP) e cinzas volantes (CV). O protocolo utilizou o método de planejamento experimental de misturas, especificamente o método Simplex-Centróide, e considerou parâmetros de desempenho de referência, como resistência à compressão não confinada (RCNC), resistência à tração por compressão diametral (RTCD), índice de suporte da Califórnia (CBR), expansão e módulo de resiliência (MR). As amostras foram compactadas no teor de umidade ótimo usando o teste de compactação do Proctor Intermediário e curadas em uma câmara úmida por 7 dias para obter esses parâmetros. A inclusão de materiais de resíduos resultou em um significativo aprimoramento das propriedades mecânicas avaliadas e redução da expansão, especialmente

quando o EAEP foi adicionado. A função de Desejabilidade, implementada no *software* Minitab 18, foi utilizada para determinar as proporções ideais de solo e resíduos. A análise foi conduzida com base em dois conjuntos de propriedades, a saber, conjunto 1 (RCNC, CBR e Expansão) e conjunto 2 (MR, RTCD e Expansão). A abordagem estatística empregada no processo de dosagem mostrou-se eficaz na identificação das composições ideais das misturas de solo e resíduos que atendiam aos parâmetros de desempenho almejados. O uso de resíduos de aço na estabilização de solos tropicais de baixa capacidade de suporte representa uma alternativa viável e ecologicamente correta, pois levou a uma melhoria nas propriedades avaliadas, tornando-a adequada para obras de pavimentação e contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Otimização de misturas. Método Simplex-Centróide. Planejamento experimental. Dosagem de misturas solo-resíduos siderúrgicos. Estabilização de solos. Escória de aciaria elétrica primária (EAEP). Cinza volante (CV).

ABSTRACT

FERREIRA, Fernando Henrique Neiva Pereira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2023. **Statistical dosage of soil-waste steel mixtures aiming at the application in structural layers of asphalt pavements.** Advisor: Heraldo Nunes Pitanga.

The increase in urbanization and industrialization has led to the generation of a significant amount of solid waste, which poses a major concern for society. However, reusing these wastes can be a valuable opportunity to conserve natural resources, reduce energy consumption, and avoid environmental degradation and space constraints associated with waste disposal. Therefore, from an environmental sustainability perspective, waste reuse is a highly advantageous alternative. Incorporating industrial waste into soil for use in road construction is a promising solution to mitigate the environmental impact of waste. This approach not only improves soil properties but also promotes sustainable development, as demand for traditional materials for engineering and road construction has risen sharply. This demand is driven by the scarcity of conventional materials and the environmental restrictions and regulations governing pavement construction. Therefore, it is essential to explore alternative materials in detail to identify more cost-effective and eco-friendly technical solutions. Although there have been studies investigating the use of industrial waste as soil stabilizers for pavement engineering, there are limited works utilizing an experimental planning method to determine the optimal dosages of non-conventional materials when mixed with soils. To evaluate the technical applicability of steel waste-soil mixtures in pavement works, this research proposed an optimization protocol for dosages using two types of soil samples: a clayey soil (S1) and a sandy soil (S2), combined with electric arc furnace slag (EAFS) and fly ash (FA). The protocol utilized the mixture experimental planning method, specifically the Simplex-Centroid method, and considered reference performance parameters such as Unconfined Compressive Strength (UCS), Diametral Tensile Strength (DTS), California Bearing Ratio (CBR), Expansion, and Resilience Modulus (RM). The specimens were compacted at the optimum moisture content using the Intermediate Proctor compaction test and cured in a humid chamber for 7 days to obtain these parameters. The inclusion of waste materials resulted in a significant enhancement of the evaluated mechanical properties and reduction in expansion, particularly when EAFS was added. The Desirability function, implemented in the Minitab 18 software, was utilized to determine the optimal proportions of soil and waste constituents. The analysis was conducted based on two sets of properties, namely set 1 (UCS, CBR, and Expansion) and set 2 (RM, DTS, and Expansion). The statistical approach employed in the dosage process proved to be effective

in identifying the optimal compositions of the soil-waste mixtures that met the targeted performance parameters. The use of steel waste in stabilizing low bearing capacity tropical soils represents a viable and eco-friendly alternative as it led to an improvement in the evaluated properties, making it suitable for pavement works and contributing to environmental sustainability.

Keywords: Mixture optimization. Simplex-Centroid method. Experimental design. Dosage of soil-steel waste mixtures. Soil stabilization. Electric arc furnace slag (EAFS). Fly ash (FA).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: Curvas granulométricas das amostras de solo S1 e S2 | 22 |
| Figura 2: Difrátogramas das amostras de solo S1 (a) e S2 (b) obtidos por DRX..... | 23 |
| Figura 3: Micrografias da amostra de solo S1 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000..... | 24 |
| Figura 4: Micrografias da amostra de solo S2 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000..... | 24 |
| Figura 5: Curva granulométrica da amostra de EAEP moída | 26 |
| Figura 6: Difrátograma da amostra de EAEP obtida por DRX | 27 |
| Figura 7: Micrografias da amostra de EAEP obtidas por MEV: (a)x160, (b)x300, (c)x650 e (d)x1.800 | 28 |
| Figura 8: Curva granulométrica da amostra de CV | 29 |
| Figura 9: Difrátograma da amostra de CV obtida por DRX..... | 30 |
| Figura 10: Micrografias de amostra de cinza volante obtidas por MEV: (a)x100 e (b)x3.000 | 31 |
| Figura 11: Fluxograma do procedimento do método Simplex-Centróide para otimização de planejamento experimental de misturas | 32 |
| Figura 12: Planejamento experimental das misturas. | 34 |
| Figura 13: Gráficos de compactação para determinação dos parâmetros de ótimo: (a) solo S1 e suas misturas; (b) solo S2 e suas misturas | 42 |
| Figura 14: Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC) das misturas e amostras de solo analisadas..... | 45 |
| Figura 15: Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) das misturas e amostras de solo analisadas | 46 |
| Figura 16: Módulo de Resiliência (MR) das misturas e amostras de solo analisadas..... | 47 |
| Figura 17: CBR das misturas e amostras de solo analisadas | 47 |
| Figura 18: Expansão das misturas e amostras de solo analisadas | 48 |
| Figura 19: Gráficos de contorno para a RCNC (em kPa) das misturas solo-resíduos..... | 50 |
| Figura 20: Gráficos de contorno para a RTCD (em kPa) das misturas solo-resíduos..... | 51 |
| Figura 21: Gráficos de contorno para o MR (em MPa) das misturas solo-resíduos | 52 |
| Figura 22: Gráficos de contorno para o CBR (em %) das misturas solo-resíduos..... | 53 |
| Figura 23: Gráficos de contorno para a Expansão (em %) das misturas solo-resíduos | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 24: Gráfico de otimização para o solo S1 – Conjunto 1 | 56 |
| Figura 25: Gráficos de contorno da Desejabilidade composta para a amostra de solo S1 – Conjunto 1 | 57 |
| Figura 26: Gráfico de otimização para o solo S2 – Conjunto 1 | 59 |
| Figura 27: Gráficos de contorno da Desejabilidade composta para a amostra de solo S2 – Conjunto 1 | 60 |
| Figura 28: Gráficos de otimização para o solo S1 – Conjunto 2..... | 63 |
| Figura 29: Gráficos de contorno da Desejabilidade composta para a amostra de solo S1 – Conjunto 2 | 64 |
| Figura 30: Gráfico de otimização para o solo S2 – Conjunto 2 | 66 |
| Figura 31: Gráficos de contorno da Desejabilidade composta para a amostra de solo S2 – Conjunto 2 | 67 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Caracterização e classificação geotécnicas das amostras de solo analisadas | 22 |
| Tabela 2: Composição química obtida por FRX e perda ao fogo das amostras de solos S1 e S2 | 22 |
| Tabela 3: Composição química e perda ao fogo de amostra de EAEP | 26 |
| Tabela 4: Elementos químicos presentes na amostra de EAEP..... | 28 |
| Tabela 5: Composição química e perda ao fogo da amostra de CV | 30 |
| Tabela 6: Elementos químicos presentes na amostra de cinza volante | 31 |
| Tabela 7: Misturas solo-resíduos definidas no planejamento experimental..... | 34 |
| Tabela 8: Concentrações dos elementos nos extratos lixiviados..... | 40 |
| Tabela 9: Concentrações dos elementos nos extratos solubilizados | 40 |
| Tabela 10: Parâmetros de ótimo das misturas analisadas para as duas amostras de solo..... | 43 |
| Tabela 11: Propriedades mecânicas e Expansão das misturas e amostras de solo analisadas.. | 44 |
| Tabela 12: Equações de regressão referentes aos gráficos de contorno da RCNC | 50 |
| Tabela 13: Equações de regressão referentes aos gráficos de contorno da RTCD..... | 51 |
| Tabela 14: Equações de regressão referentes aos gráficos de contorno do MR..... | 52 |
| Tabela 15: Equações de regressão referentes aos gráficos de contorno do CBR | 53 |
| Tabela 16: Equações de regressão referentes aos gráficos de contorno da Expansão..... | 54 |
| Tabela 17: Equações de regressão referentes à Desejabilidade composta e coeficientes médios (k_m) da amostra S1 para o conjunto 1 de propriedades | 57 |
| Tabela 18: Equações de regressão referentes à Desejabilidade composta e coeficientes médios (k_m) da amostra S2 para o conjunto 1 de propriedades | 60 |
| Tabela 19: Valores de Desejabilidades individual e composta referentes às misturas ótimas para as propriedades analisadas para o conjunto 1 | 62 |
| Tabela 20: Equações de regressão referentes à Desejabilidade composta e coeficientes médios (k_m) da amostra S1 para o conjunto 2 de propriedades | 64 |
| Tabela 21: Equações de regressão referentes à Desejabilidade composta e coeficientes médios (k_m) da amostra S2 para o conjunto 2 de propriedades | 67 |
| Tabela 22: Valores de Desejabilidades individual e composta referentes às misturas ótimas para as propriedades analisadas para o conjunto 2..... | 69 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|--------------------------------|--|
| AASHTO | American Association of State Highway and Transportation Officials |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| Al | Alumínio |
| Al ₂ O ₃ | Óxido de alumínio |
| As | Arsênio |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| B | Boro |
| Ba | Bário |
| C | Carbono |
| Ca | Cálcio |
| Ca(OH) ₂ | Hidróxido de cálcio |
| Ca ²⁺ | Cálcio bivalente |
| CaCO ₃ | Calcita |
| C-A-H | Aluminato de Cálcio Hidratado |
| CaO | Óxido de cálcio |
| C-A-S-H | Alumino-Silicato de Cálcio Hidratado |
| CBR | Índice de Suporte Califórnia |
| Cd | Cádmio |
| Cl | Cloro |
| CLA | Classificação |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| Cr | Cromo |
| C-S-H | Silicato de Cálcio Hidratado |
| Cu | Cobre |
| CV | Cinza Volante |
| DNER | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| DRX | Difração de Raios-X |
| EAEP | Escória de Aciaria Elétrica Primária |
| EDS | Espectroscopia de energia dispersiva |
| f _c | Resistência à compressão simples |
| f _{ct} | Resistência à tração por compressão diametral |

| | |
|--------------------------------|---|
| Fe | Ferro |
| Fe ₂ O ₃ | Óxido de ferro (hematita) |
| FeO | Óxido de Ferro (<i>wustite</i>) |
| FRX | Fluorescência de Raios-X |
| IP | Índice de Plasticidade |
| ISO | International Organization for Standardization |
| K | Potássio |
| k ₁ | Coefficiente de regressão associada ao Solo |
| k ₁₂ | Coefficiente de regressão associada à interação Solo e EAEP |
| k ₂ | Coefficiente de regressão associada à EAEP |
| k ₂₃ | Coefficiente de regressão associada à interação EAEP e CV |
| K ₂ O | Óxido de potássio |
| k ₃ | Coefficiente de regressão associada à CV |
| k _m | Coefficiente de regressão associada à média aritmética dos coeficientes dos componentes individuais |
| LL | Limite de Liquidez |
| LP | Limite de Plasticidade |
| MCT | Miniatura, Compactado, Tropical |
| ME | Método de ensaio |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| Mg | Magnésio |
| Mg(OH) ₂ | Hidróxido de magnésio |
| Mg ²⁺ | Magnésio bivalente |
| MgO | Óxido de magnésio |
| Mn | Manganês |
| MR | Módulo de Resiliência |
| Na | Sódio |
| Na ₂ O | Óxido de sódio |
| NBR | Norma técnica brasileira |
| NM | Níveis de Normalização |
| O | Oxigênio |
| P | Fósforo |
| Pb | Chumbo |
| PF | Perda ao Fogo |

| | |
|-------------------|---|
| pH | Potencial hidrogeniônico |
| PRO | Procedimento |
| R ² | Coefficiente de determinação |
| RCNC | Resistência à Compressão Não Confinada |
| RTCD | Resistência à tração por compressão diametral |
| S | Solo |
| S | Enxofre |
| S1, S2 | Amostras de solo |
| Si | Silício |
| SiO ₂ | Dióxido de silício |
| SO ₃ | Óxido sulfúrico |
| TiO ₂ | Dióxido de titânio |
| TRB | Transportation Research Board |
| USC | Unified Soil Classification |
| Zn | Zinco |
| w _{ot} | Teor de umidade ótimo |
| γ _d | Peso específico aparente seco |
| γ _{dmax} | Peso específico aparente seco máximo |
| ρ _s | Massa específica dos grãos |
| # | Abertura de malha das peneiras |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA..... | 16 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 20 |
| 2. MATERIAIS E MÉTODOS | 21 |
| 2.1. MATERIAIS | 21 |
| 2.1.1. SOLOS | 21 |
| 2.1.2. ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA PRIMÁRIA | 24 |
| 2.1.3. CINZA VOLANTE | 28 |
| 2.2. MÉTODOS..... | 31 |
| 2.2.1. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS AMOSTRAS DE EAEP E CV | 31 |
| 2.2.2. MÉTODO SIMPLEX-CENTRÓIDE..... | 32 |
| 2.2.2.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL | 32 |
| 2.2.2.2. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO..... | 35 |
| 2.2.2.3. MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO | 35 |
| 2.2.2.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA | 35 |
| 2.2.2.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL | 35 |
| 2.2.2.6. ÍNDICE CBR E EXPANSÃO | 36 |
| 2.2.2.7. MÓDULO DE RESILIÊNCIA..... | 36 |
| 2.2.2.8. MODELOS DESCRITIVOS E GRÁFICOS DE CONTORNO | 36 |
| 2.2.2.9. OTIMIZAÇÃO ATRAVÉS DA FUNÇÃO DESEJABILIDADE..... | 37 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 40 |
| 3.1. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL | 40 |
| 3.2. MÉTODO DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL EM REDE SIMPLEX- CENTRÓIDE | 41 |
| 3.2.1. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO | 41 |
| 3.2.2. PROPRIEDADES ANALISADAS | 44 |
| 3.2.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA (RCNC) | 44 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.2.2.2. | RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD) | |
| | 45 | |
| 3.2.2.3. | MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)..... | 46 |
| 3.2.2.4. | ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR)..... | 47 |
| 3.2.2.5. | EXPANSÃO | 48 |
| 3.2.2.6. | CONSIDERAÇÕES GERAIS..... | 48 |
| 3.2.3. | OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES ANALISADAS ATRAVÉS DA | |
| | FUNÇÃO DESEJABILIDADE | 50 |
| 3.2.3.1. | GRÁFICOS DE CONTORNO E MODELOS MATEMÁTICOS PARA | |
| | RCNC..... | 50 |
| 3.2.3.2. | GRÁFICOS DE CONTORNO E MODELOS MATEMÁTICOS PARA | |
| | RTCD..... | 51 |
| 3.2.3.3. | GRÁFICOS DE CONTORNO E MODELOS MATEMÁTICOS PARA | |
| | MR..... | 52 |
| 3.2.3.4. | GRÁFICOS DE CONTORNO E MODELOS MATEMÁTICOS PARA | |
| | CBR..... | 53 |
| 3.2.3.5. | GRÁFICOS DE CONTORNO E MODELOS MATEMÁTICOS PARA A | |
| | EXPANSÃO..... | 54 |
| 3.2.4. | DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM ÓTIMA ATRAVÉS DA FUNÇÃO | |
| | DESEJABILIDADE..... | 55 |
| 3.2.4.1. | CONJUNTO 1: RCNC, CBR E EXPANSÃO | 55 |
| 3.2.4.1.1. | AMOSTRA DE SOLO S1..... | 55 |
| 3.2.4.1.2. | AMOSTRA DE SOLO S2..... | 58 |
| 3.2.4.1.3. | CONSIDERAÇÕES GERAIS..... | 61 |
| 3.2.4.2. | CONJUNTO 2: MR, RTCD E EXPANSÃO | 62 |
| 3.2.4.2.1. | AMOSTRA DE SOLO S1..... | 62 |
| 3.2.4.2.2. | AMOSTRA DE SOLO S2..... | 65 |
| 3.2.4.2.3. | CONSIDERAÇÕES GERAIS..... | 68 |
| 4. | CONCLUSÕES..... | 70 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 72 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização e justificativa da pesquisa

As indústrias siderúrgicas possuem grande impacto na economia global, todavia as mesmas são responsáveis pela geração de um elevado volume de resíduos em sua cadeia produtiva. Os resíduos siderúrgicos diretos correspondiam no Brasil a aproximadamente 622 kg/tonelada de aço bruto produzido em 2020 de acordo com dados do Instituto Aço Brasil (IAB, 2020). Segundo essa mesma fonte, desse total, 40% correspondiam à escória de alto forno, 25% à escória de aciaria, 6% aos pós e finos (incluindo a cinza volante de alto forno), 4% às lamas e 25% a outros resíduos.

O Brasil é um dos maiores produtores de aço bruto do mundo, produzindo, em 2021, aproximadamente 36,1 milhões de toneladas desse material, correspondendo a 2% da produção mundial e a 55,8% da produção da América Latina. Aproximadamente 30% dessa produção foram gerados no Estado de Minas Gerais, o que o torna o maior produtor de aço bruto do país, seguido pelo Estado do Rio de Janeiro com 28,5 % (IAB, 2022).

Este cenário de geração de resíduos siderúrgicos em quantidades tão significativas aponta para a necessidade de viabilização de seu aproveitamento, a princípio porque constituem um indesejável, mas inevitável passivo ambiental para as indústrias do setor siderúrgico (NAIDU *et al.*, 2020; PALOD *et al.*, 2017), sendo a Engenharia Civil um dos ramos das atividades econômicas nos quais o seu aproveitamento em grande escala, sob a forma de material de construção, pode se tornar possível (PENTEADO *et al.*, 2019).

No âmbito da Engenharia Civil, particularmente na área de construção civil, são constatados diversos estudos que exploram a utilização de escórias de aciaria e cinzas volantes como material de construção, os quais têm demonstrado que esses resíduos podem ser utilizados de forma eficiente na fabricação de cimento (SHI *et al.*, 2016), em substituição aos agregados de concretos (ADEGOLOYE *et al.*, 2016; ARRIBAS *et al.*, 2014; BISKRI *et al.*, 2017; COPPOLA *et al.*, 2016; FALESCHINI *et al.*, 2016), na fabricação de concreto convencional ou refratário (DUCMAN; MLADENOVICH, 2011; JIAO *et al.*, 2018) e na produção de argamassas (MARINHO *et al.*, 2017; SANTAMARÍA *et al.*, 2016; SANTAMARÍA *et al.*, 2020; SOUZA *et al.*, 2020).

Ainda dentro da Engenharia Civil, outra possibilidade efetiva de aproveitamento desses resíduos em grande escala corresponde ao seu emprego potencial em obras de pavimentação. Em tais obras, seu emprego pode ocorrer, por exemplo, em aterros, camadas estruturais de pavimentos constituídos por solos compactados e na estabilização química de solos de baixa capacidade de suporte, ou seja, com deficiências quanto às propriedades de resistência e rigidez, onde essa técnica é geralmente realizada com o emprego de cimento e cal (DINIZ *et al.*, 2017).

Destaca-se, portanto, que, devido ao consumo de recursos naturais necessários para sua composição, aos efeitos ambientais decorrentes desse consumo e de seus processos de fabricação, assim como ao custo de aquisição, o uso do cimento e da cal como estabilizantes químicos de solos compactados tem sido objeto de discussão e reavaliação (SHALABI *et al.*, 2017).

No que diz respeito às obras de pavimentação, a escória de aciaria é frequentemente empregada na fabricação de concretos asfálticos (ALINEZHAD; SAHAF, 2019; LI *et al.*, 2017; OLUWASOLA *et al.*, 2016; SKAF *et al.*, 2016; SORLINI *et al.*, 2012), concretos compactados a rolo (LAM *et al.*, 2017), blocos de pavimentação (PENTEADO *et al.*, 2019), concretos para pavimentos rígidos (GUPTA; SACHDEVA, 2019) e como agregados para camadas de base, sub-base e reforço de pavimentos (AUTELITANO; GIULIANI, 2016; MAGHOOL *et al.*, 2017; PASETTO; BALDO, 2015; SHALABI *et al.*, 2017). Nestas aplicações, a escória de aciaria compete, principalmente, com a areia e a brita, sendo particularmente adequada por sua dureza, durabilidade e capacidade de livre drenagem, apresentando, também, elevada resistência ao esmagamento, o que permite sua utilização por longos períodos com mínima degradação física (LIMA *et al.*, 2000).

A despeito da predominância técnico-científica pertinente às aplicações supracitadas, estudos recentes têm mostrado resultados promissores relativos à utilização das escórias de aciaria como material estabilizante de solos (AKINWUMI, 2014; ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; DINIZ *et al.*, 2017; GU *et al.*, 2018; MANSO *et al.*, 2013; MOZEJKO; FRANCISCA, 2019; SOL-SÁNCHEZ *et al.*, 2016; XU; YI, 2019; YONG-FENG *et al.*, 2017; ZUMRAWI; BABIKIR, 2017).

Na perspectiva de aplicação da escória de aciaria na estabilização química de solos para fins de engenharia, estudos recentes têm apontado para a possibilidade de mobilização ou

otimização de seu potencial estabilizante quando combinada com a cinza volante (MAHEDI *et al.*, 2019; SANTAMARÍA *et al.*, 2016; YILDIRIM; PREZZI, 2017). Segundo a norma técnica C618 (ASTM, 2019a), a cinza volante é uma pozolana artificial finamente dividida que resulta da combustão de carvão moído ou em pó e que é transportada por gases de combustão. Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais pozolânicos são definidos como materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

A despeito de sua capacidade de mobilizar ou otimizar a ação cimentante da escória de aciaria, pesquisas também evidenciam a capacidade estabilizante da cinza volante em solos quando aplicada isoladamente (KARTHIK *et al.*, 2014; LAM *et al.*, 2017; SHALABI *et al.*, 2017; TASTAN *et al.*, 2011; ZUMRAWI; BABIKIR, 2017). O elevado teor de CaO na sua composição química é o principal motivo pelo qual esse material vem sendo estudado como alternativa aos ativadores tradicionalmente utilizados para estabilização de solos (cal e cimento) (OZDEMIR, 2016).

Em estudos envolvendo solos estabilizados com escória de aciaria, cinza volante e outros resíduos, as dosagens têm sido realizadas de maneira intuitiva e empírica (DINIZ *et al.*, 2017; LAM *et al.*, 2017; MAGHOOL *et al.*, 2017; PITANGA *et al.*, 2016; SHALABI *et al.*, 2017; XU; YI, 2019; ZUMRAWI; BABIKIR, 2017). As dosagens de misturas solo-cal, de acordo com os padrões técnicos ME 419 (DNIT, 2019) e D6276 (ASTM, 2019b), bem como de misturas solo-cimento, como estabelecido na NBR 12253 (ABNT, 2012a) e D5982 (ASTM, 2015), também são estabelecidas de forma empírica.

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

A literatura técnico-científica aponta uma carência de métodos de dosagem de misturas solo-resíduos siderúrgicos (escória de aciaria elétrica e cinza volante, por exemplo) baseados em critérios capazes de otimizar as contribuições de cada um de seus materiais componentes e, por conseguinte, otimizar as propriedades de engenharia do produto final a fim de atender às exigências de projetos que demandam o emprego de solos compactados. É neste contexto e visando o preenchimento dessa lacuna que se enquadra a presente proposta técnico-científica, a qual será alicerçada no modelo estatístico de dosagem em rede Simplex-Centróide proposto por Scheffé (1963).

Salienta-se que o presente trabalho corresponde à continuidade dos trabalhos pioneiros desenvolvidos por Ribeiro Rodrigues (2022) e Rodrigues (2022), os quais se prestaram ao preenchimento da lacuna técnica supracitada e que já apontam para a necessidade de adoção de critérios distintos dos que foram considerados em suas respectivas pesquisas, tais como o aumento da energia de compactação das misturas, a adição da propriedade de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) e a análise de dois conjuntos de propriedades no processo de otimização das misturas solo-resíduos, além de uma maior simplificação na determinação dos valores de Módulo Resiliente (MR) envolvidos no planejamento estatístico visando à definição da dosagem ótima, aspectos estes que serão contemplados nesta pesquisa.

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

É importante destacar que o protocolo de otimização de propriedades de interesse em rede Simplex (Simplex-Lattice e Simplex-Centróide) tem sido largamente estudado no setor de construção civil, como nas produções de blocos e artefatos cerâmicos (AZEVEDO *et al.*, 2018; HUSSIEN *et al.*, 2018; MEDEIROS *et al.*, 2019; MENDES *et al.*, 2019; NGUM *et al.*, 2014), de blocos de solo-cimento (AZEVEDO *et al.*, 2019), de tintas (LOPES *et al.*, 2019), de materiais cimentícios (SHI *et al.*, 2016), de argamassas (HE *et al.*, 2020; MARVILA *et al.*, 2019) e de concretos (ABBAS, 2018; JIAO *et al.*, 2018; SHI *et al.*, 2015).

No âmbito da engenharia de solos, a utilização do método Simplex tem ocorrido em menor escala, sendo relatados estudos de solos estabilizados com cinzas de bagaço de cana de açúcar (OKONKWO; AGUNWAMBA, 2016), cinzas de resíduos de papel (ONYELOWE, 2017) e pó de pedra (ONYELOWE *et al.*, 2019b), além de seu emprego na otimização da dosagem de material cimentante utilizado para a execução de camadas de base de pavimentos com brita graduada tratada com cimento (IWANSKI *et al.*, 2016).

1.2. Objetivos

Ao considerar a necessidade técnica de viabilizar o aproveitamento em grande escala de resíduos siderúrgicos como estabilizantes químicos de solos compactados segundo fundamentos científicos que minimizem as incertezas e limitações dos procedimentos empíricos existentes, o objetivo principal deste trabalho é propor e testar um protocolo de dosagem de misturas solo-resíduos siderúrgicos baseado no modelo estatístico de planejamento experimental de misturas em rede Simplex-Centróide.

Como objetivo secundário, a definição da dosagem ótima para misturas solo-resíduos siderúrgicos por meio do protocolo tem por finalidade a otimização das propriedades de engenharia associadas ao desempenho estrutural de camadas de pavimentos asfálticos nas quais essas misturas serão utilizadas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

2.1.1. Solos

Foram empregadas nessa pesquisa duas amostras de solos tropicais, denominadas S1 e S2. As amostras de solo S1 e S2 foram coletadas segundo o procedimento PRO 003 (DNER, 1994a) em jazidas de empréstimo localizadas no Município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil. Ambas amostras foram preparadas para os ensaios geotécnicos de laboratório de acordo com a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a). A amostra S1 foi oriunda de um horizonte de solo residual maduro de coloração avermelhada, e a amostra S2 foi oriunda de um horizonte de solo saprolítico de coloração amarelo-acinzentada.

Os dados das caracterizações geotécnica, química, mineralógica e microestrutural das amostras de solo foram obtidos de Rodrigues (2022). Os ensaios realizados para fins de caracterização geotécnica das amostras de solos foram: i) Análise granulométrica conjunta, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016b); ii) Limite de liquidez (LL), segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016c); iii) Limite de plasticidade (LP), segundo a NBR 7180 (ABNT, 2016d); iv) Massa específica dos grãos do solo (ρ_s), segundo a NBR 6458 (ABNT, 2016e). Os ensaios de compactação dos solos foram realizados segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2016f), na energia do Proctor Intermediário, a fim de determinar o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima.

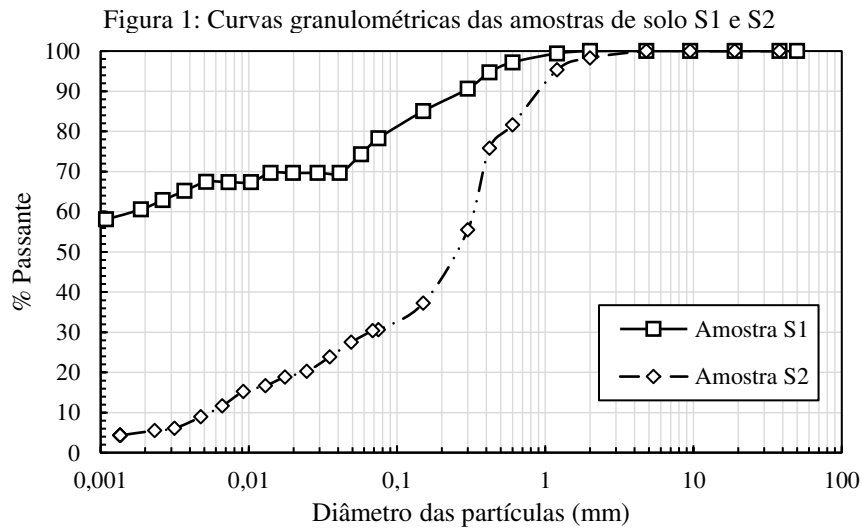
Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 1, na qual também são apresentadas as respectivas classificações dos solos segundo a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), de acordo com a CLA 259 (DNER, 1996a), e segundo os sistemas de classificação TRB (*Transportation Research Board*), conforme a M 145-91 (AASHTO, 2017), e USC (*Unified Soil Classification*), conforme a D2487 (ASTM, 2017).

As curvas granulométricas das amostras de solos S1 e S2 são apresentadas na Figura 1 e permitiram concluir que a amostra de solo S1 possui um alto teor de partículas de tamanho argila (argila areno-siltosa), enquanto na amostra de solo S2 predominam as partículas de tamanho areia (areia silto-argilosa).

Tabela 1: Caracterização e classificação geotécnicas das amostras de solo analisadas (RODRIGUES, 2022)

| Parâmetro | S1 | S2 |
|--|------------|-----------|
| % argila ($\phi < 0,002$ mm) | 61 | 5 |
| % silte ($0,002$ mm $< \phi < 0,06$ mm) | 14 | 24 |
| % areia ($0,06$ mm $< \phi < 2$ mm) | 25 | 68 |
| % pedregulho (2 mm $< \phi < 60$ mm) | 0 | 3 |
| LL (%) | 78 | 36 |
| LP (%) | 43 | 18 |
| IP (%) | 35 | 18 |
| ρ_s (g/cm ³) | 2,869 | 2,657 |
| $\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)* | 14,98 | 17,75 |
| w_{ot} (%)* | 28,20 | 13,90 |
| TRB | A-7-5 (20) | A-2-6 (1) |
| USC | MH | SC |
| MCT | LA' | NA' |

*Dados desta pesquisa



Fonte: Rodrigues (2022)

Os resultados das análises químicas das amostras de solos foram obtidos usando a técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX). Os dados estão apresentados na Tabela 2, juntamente com os valores de perda ao fogo.

Tabela 2: Composição química obtida por FRX e perda ao fogo das amostras de solos S1 e S2 (RODRIGUES, 2022).

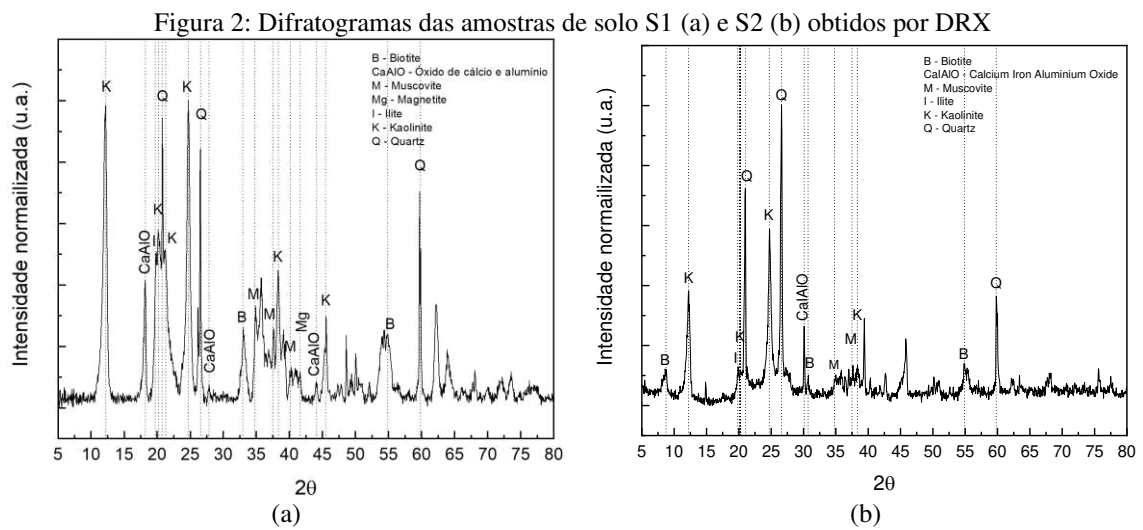
| Material | SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | Fe ₂ O ₃ (%) | CaO (%) | MgO (%) | K ₂ O (%) | Na ₂ O (%) | TiO ₂ (%) | SO ₃ (%) | Cl (%) | PF* (%) |
|----------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------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

*Perda ao fogo

A quantificação dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e CaO é importante para entender como tais solos reagem quando em contato com água. O CaO se dissocia e combina com os materiais

silicosos e aluminosos, formando compostos pozolânicos. Esses compostos são responsáveis pelo aumento da resistência em longo e curto prazos (TASTAN *et al.*, 2011).

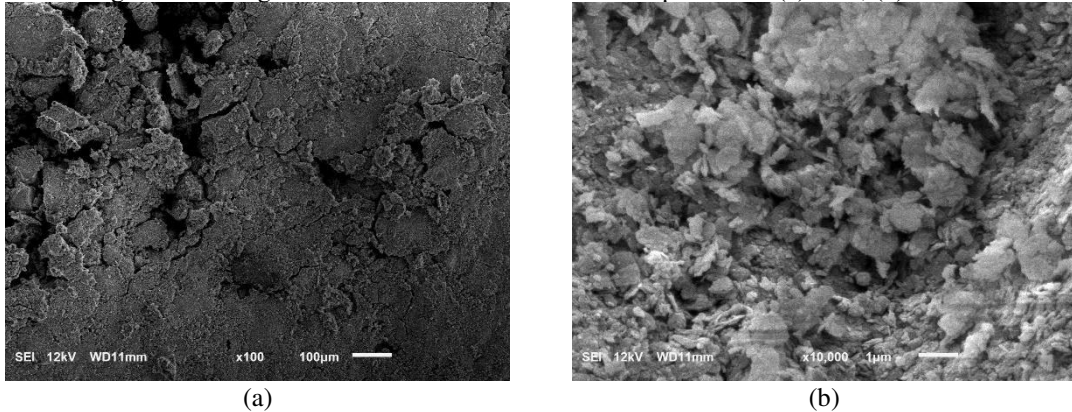
As constituições mineralógicas das amostras de solos foram obtidas por meio da técnica de Difração de Raios-X (DRX), sendo realizadas medidas teta-2teta na faixa de 5 a 80 graus, utilizando passo de 0,05 graus, com 1 segundo por passo. Os resultados da análise de DRX são apresentados na Figura 2.



Os solos S1 e S2 são predominantemente caulíníticos, como a maioria dos solos brasileiros (LOPES *et al.*, 2019), apresentando altos níveis de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . A coloração avermelhada da amostra de solo S1 é atribuída à presença de magnetita (CASTAGNOTTO *et al.*, 2021; MATHIAN *et al.*, 2020). A amostra de solo S2 apresenta uma cor branco-acinzentada com baixa pigmentação amarela, resultado da predominância do argilomineral caulinita (MORSI *et al.*, 2019).

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons secundários foi utilizada para as caracterizações microestruturais das amostras de solos. Na Figura 3, referente à amostra de solo S1, a micrografia revelou tratar-se de um material com estrutura compacta, devido à sua granulometria mais fina e ao efeito de agregação das partículas através dos óxidos de ferro e alumínio, onde os vazios são preenchidos com minerais de menor tamanho, com predominância de grãos de diâmetros menores que $2\mu\text{m}$ e com forma lamelar (WU *et al.*, 2019).

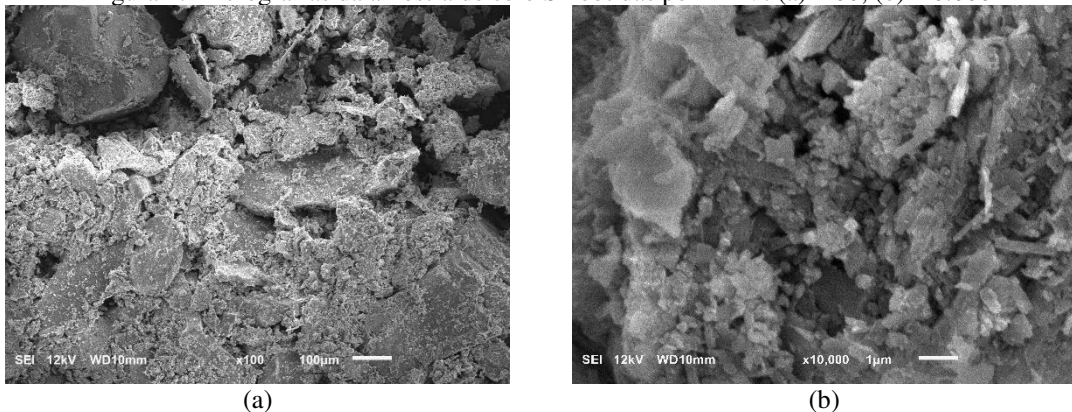
Figura 3: Micrografias da amostra de solo S1 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000



Fonte: Rodrigues (2022)

Na Figura 4, referente à amostra de solo S2, a micrografia revelou que a mesma apresenta grãos de tamanho maior do que 0,1 mm, sendo esses cúbicos e seus finos possuindo formas lamelares e prismáticas (WU *et al.*, 2019).

Figura 4: Micrografias da amostra de solo S2 obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000



Fonte: Rodrigues (2022)

2.1.2. Escória de aciaria elétrica primária

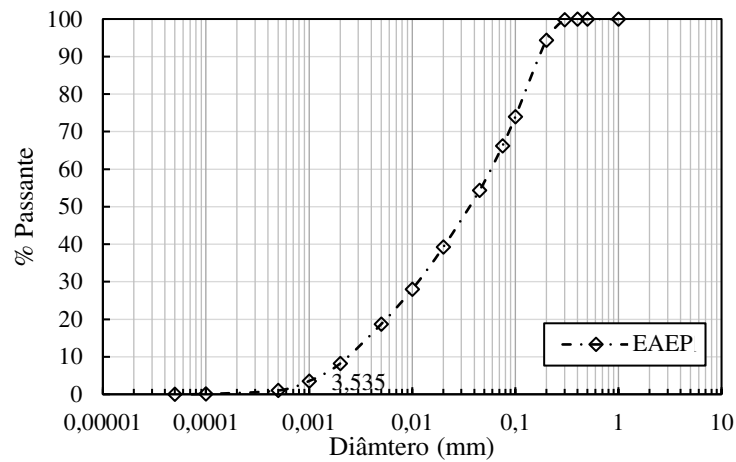
A amostra de EAEP foi fornecida pela unidade siderúrgica da Vallourec Soluções Tubulares do Brasil (VSB), localizada no Município de Jeceaba, na região do Alto Paraopeba, Estado de Minas Gerais, Brasil. A coleta das amostras de EAEP foi realizada conforme norma técnica NBR 10007 (ABNT, 2004a), em seu estado original (escória bruta). A amostra de EAEP foi obtida de locais de estocagem recente, sendo que o tempo máximo entre sua geração e disposição foi de 72 horas, sem qualquer processo de cura do material antes dos ensaios.

A preparação das amostras para os ensaios de caracterização foi realizada através da moagem do material no aparelho de abrasão *Los Angeles* para reduzir a sua granulometria em partículas de diâmetros menores que 0,6 mm (peneira #30), de acordo com o procedimento PRO 199 (DNER, 1996b). O objetivo dessa redução granulométrica é de aumentar a superfície específica da EAEP e alcançar um valor próximo a 0,18 m²/g, semelhante ao proposto por Sheen, Le e Lam (2021). Em seguida, foi realizada a preparação das amostras para os ensaios de laboratório de acordo com a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a). Os finos de EAEP foram, então, armazenados em tonéis plásticos (bombonas) devidamente vedados. Os dados das caracterizações física, química, mineralógica e microestrutural da EAEP foram obtidos de Rodrigues (2022).

A caracterização física das amostras de EAEP foi realizada por meio dos seguintes ensaios: i) finura por peneiramento, segundo a NBR 11579 (ABNT, 2012b); ii) superfície específica pelo método *Blaine*, conforme a NBR 16372 (ABNT, 2015); iii) massa específica dos sólidos, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017); e iv) distribuição granulométrica, de acordo com a ISO 13320 (ISO, 2020), por difração a laser após peneiramento na peneira de 0,6 mm.

A amostra de EAEP moída apresentou índice de finura por peneiramento de 24,88%, um valor alto para materiais cimentícios (LOPES *et al.*, 2021). A superfície específica pelo método *Blaine* foi de 0,20 m²/g, próximo ao valor requerido para cimento Portland, o qual deve ser superior a 0,24 m²/g (DINIZ *et al.*, 2017). O resultado do ensaio de massa específica dos sólidos foi de 3,7 g/cm³. Quanto à granulometria, a curva granulométrica da amostra de EAEP moída é apresentada na Figura 5.

Figura 5: Curva granulométrica da amostra de EAEP moída



Fonte: Rodrigues (2022)

Os ensaios de caracterização química da EAEP foram realizados de acordo com as metodologias recomendadas para a avaliação do potencial do cimento Portland como material cimentício. Os ensaios realizados foram: i) Óxidos por Fluorescência de Raios-X (FRX); ii) Elementos químicos por espectroscopia de energia dispersiva (EDS); iii) Perda ao fogo, conforme a NBR NM 18 (ABNT, 2012c); iv) Cal livre, segundo a NBR NM 13 (ABNT, 2012d); e v) Resíduo insolúvel, de acordo com a NBR NM 15 (ABNT, 2012e). Os resultados da análise por FRX e perda ao fogo são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Composição química e perda ao fogo de amostra de EAEP (RODRIGUES, 2022)

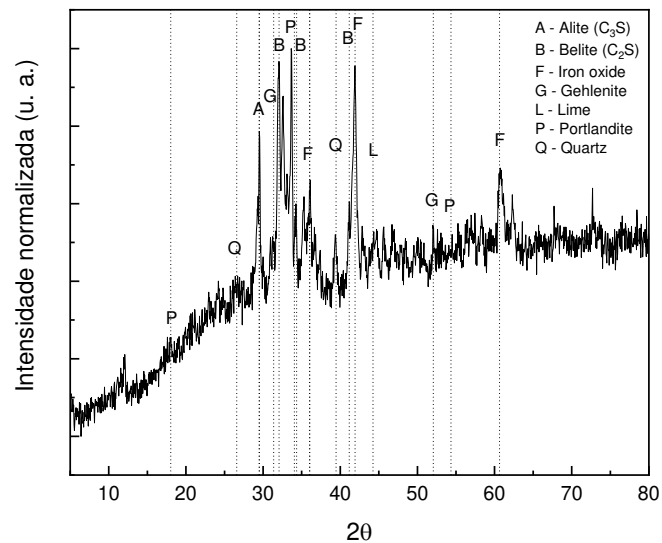
| Material | SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | Fe ₂ O ₃ (%) | CaO (%) | MgO (%) | K ₂ O (%) | Na ₂ O (%) | TiO ₂ (%) | SO ₃ (%) | Cl (%) | PF* |
|----------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|---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

*Perda ao fogo

Os compostos químicos e porcentagens presentes na amostra de EAEP estão em concordância com os descritos na literatura técnica (BRAND *et al.*, 2020; ISMAIL; AWAD; MWAFY, 2019; LI *et al.*, 2020). O valor do índice de hidráulica $[(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) / (CaO + MgO)]$ foi de 1,49, o que classifica a EAEP como fortemente hidráulica segundo Borges Marinho *et al.* (2017). Para os ensaios de resíduo insolúvel e cal livre, a amostra de EAEP obteve valores de 7,94% e 0,74%, segundo as normas técnicas NBR NM 15 (ABNT, 2012e) e NBR NM 13 (ABNT, 2012d), respectivamente. O resultado da cal livre obtido encontra-se abaixo de 1%, habilitando o material para utilização em obras rodoviárias (GRAFFITTI, 2002).

A Figura 6 apresenta o resultado da mineralogia da amostra de EAEP obtida por DRX, sendo possível observar uma ampla variedade de minerais constituintes do material. Os picos de óxido de cálcio (*lime*) e óxido de ferro confirmam os resultados da análise por FRX. Os compostos óxido de cálcio e óxido de magnésio estão atrelados à expansão volumétrica, devido à interação destes com a água (BRAND *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2020). Por outro lado, a presença de óxidos de ferro confere elevadas dureza e massa específica à EAEP (ARRIBAS *et al.*, 2015).

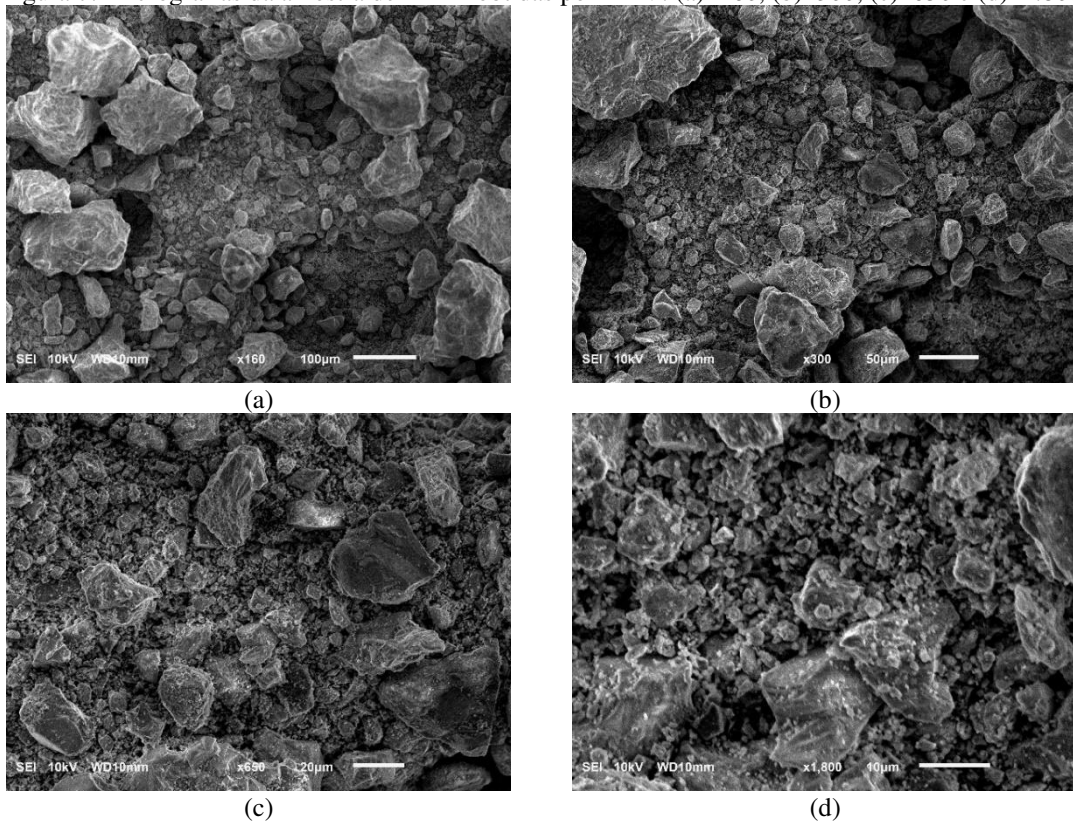
Figura 6: Difratograma da amostra de EAEP obtida por DRX



Fonte: Rodrigues (2022)

O resultado da caracterização microestrutural da amostra de EAEP, obtido por microscopia eletrônica de varredura (MEV), pode ser observado na Figura 7. A análise das micrografias evidenciou que as partículas apresentaram morfologia irregular, de alongada a cúbica, e superfície rugosa. Essas características influenciam diretamente a trabalhabilidade e resistência (LIM; CHEAH; RAMLI, 2019). A morfologia e a rugosidade das superfícies estão diretamente associadas ao ângulo de atrito, ou seja, quanto mais rugosas e irregulares forem as partículas, maior será o ângulo de atrito e, portanto, maior a resistência ao cisalhamento (MARZULLI *et al.*, 2021; MOLLON *et al.*, 2020; SANDEEP; SENETAKIS, 2018).

Figura 7: Micrografias da amostra de EAEP obtidas por MEV: (a)x160, (b)x300, (c)x650 e (d)x1.800



Fonte: Rodrigues (2022)

O ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi realizado para determinar os elementos químicos presentes na amostra de EAEP (Tabela 4).

Tabela 4: Elementos químicos presentes na amostra de EAEP (RODRIGUES, 2022)

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

2.1.3. Cinza volante

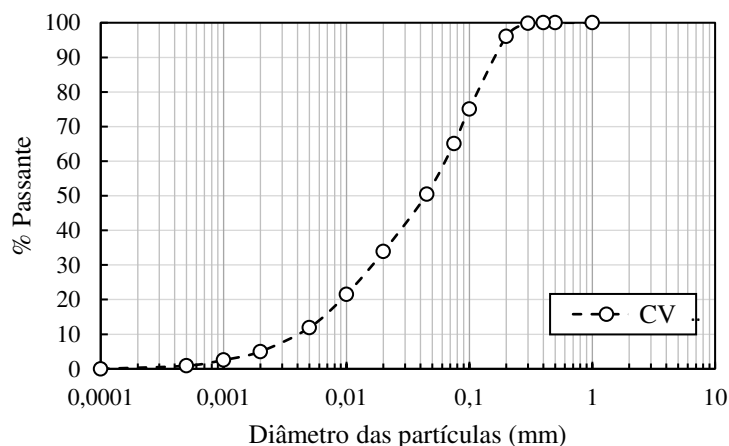
A amostra de CV foi fornecida por uma empresa que atua no beneficiamento e comercialização de cinzas pozolânicas, material proveniente da queima do carvão mineral,

situada no Município de Capivari de Baixo, Estado de Santa Catarina, Brasil. A amostra de CV utilizada foi classificada como de classe C, conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), e como de classe F, de acordo com a norma técnica C618 (ASTM, 2019a). Ambas as classificações se referem às cinzas volantes com propriedades pozolânicas: as de classe F têm apenas propriedades pozolânicas, enquanto as de classe C possuem tanto propriedades pozolânicas como cimentantes, com maior teor de CaO que as de classe F. Para os ensaios de caracterização, foram adotados os procedimentos estabelecidos pela norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a). Os dados das caracterizações física, química, mineralógica e microestrutural da EAEP foram obtidos de Rodrigues (2022)

Para caracterizar fisicamente a amostra de CV, foram realizados os seguintes ensaios: i) índice de finura por peneiramento na peneira de 75 μm , conforme a norma técnica NBR 11579 (ABNT, 2012b); ii) superfície específica pelo método de *Blaine*, conforme a NBR 16372 (ABNT, 2015); iii) massa específica dos sólidos, segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017); e iv) distribuição granulométrica determinada por difração à laser, conforme a norma ISO 13320 (ISO, 2020).

A amostra de CV apresentou índice de finura por peneiramento de 23,71%, superfície específica de 0,18 m^2/g e massa específica dos sólidos de 2,08 g/cm^3 . A Figura 8 apresenta a distribuição granulométrica da amostra de CV.

Figura 8: Curva granulométrica da amostra de CV



Fonte: Rodrigues (2022)

Foram realizados os ensaios de laboratório para caracterizar quimicamente, mineralogicamente e microestruturalmente a amostra de CV, seguindo os mesmos procedimentos utilizados para as amostras de EAEP. A Tabela 5 apresenta os resultados da análise química por FRX e de perda ao fogo.

Tabela 5: Composição química e perda ao fogo da amostra de CV (RODRIGUES, 2022)

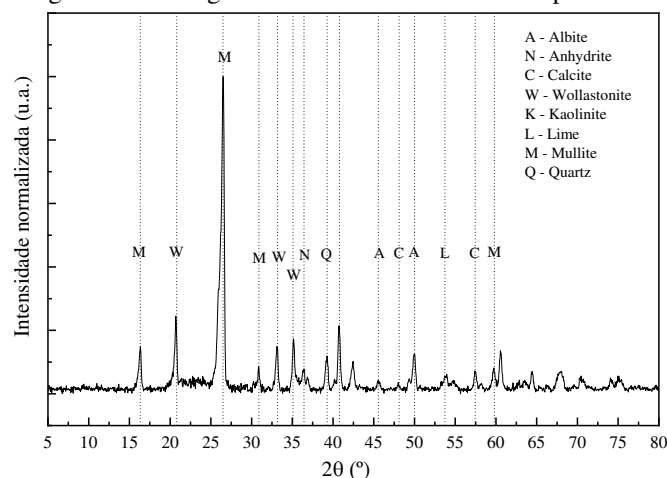
| Material | SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | Fe ₂ O ₃ (%) | CaO (%) | MgO (%) | K ₂ O (%) | Na ₂ O (%) | TiO ₂ (%) | SO ₃ (%) | Cl (%) | PF* (%) |
|----------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------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

*Perda ao fogo

A eficiência da CV como estabilizante pode ser medida pelo seu potencial cimentício, determinado pela relação entre os teores de CaO e de SiO₂, de modo que quanto maior a relação CaO/ SiO₂, maior é a hidraulicidade do material (JANZ; JOHANSSON, 2002).

A caracterização mineralógica, por DRX, apresentada na Figura 9, demonstra um alto pico do composto químico *mullite* (Al₂O₃; SiO₂), sendo responsável pela formação dos compostos cimentícios Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), Aluminato de Cálcio Hidratado (C-A-H) e Alumino-Silicato de Cálcio Hidratado (C-A-S-H) quando se combinam com hidróxido de cálcio. Essa reação acarreta alterações nas propriedades de engenharia de solos estabilizados com cal, cimento ou outro componente que possui grande quantidade de CaO ou Ca(OH)₂ em sua composição (YOOBANPOT *et al.*, 2020).

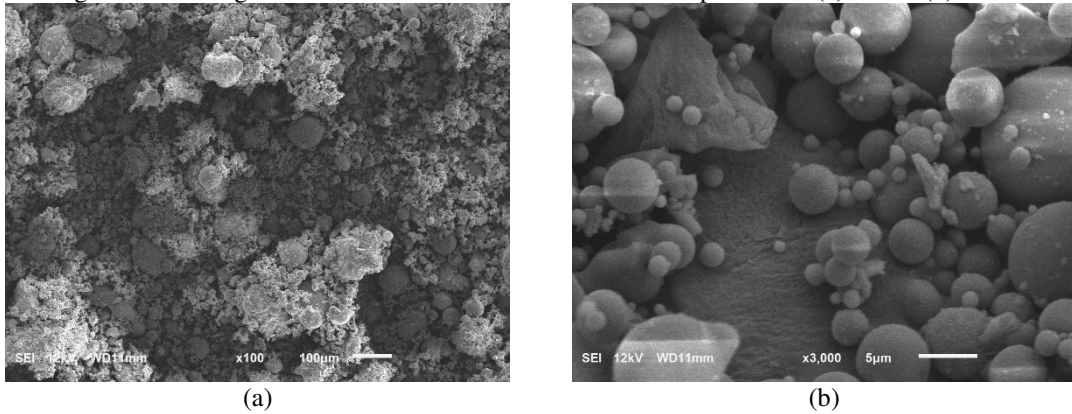
Figura 9: Difratoograma da amostra de CV obtida por DRX



Fonte: Rodrigues (2022)

Quanto à caracterização microestrutural da amostra de CV, observa-se na Figura 10 que o material apresenta partículas de diversos diâmetros com forma predominantemente esférica.

Figura 10: Micrografias de amostra de cinza volante obtidas por MEV: (a)x100 e (b)x3.000



Fonte: Rodrigues (2022)

O ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi realizado para determinar os elementos químicos presentes na amostra de CV (Tabela 6), observando-se, principalmente, a presença de Carbono, Oxigênio, Silício e Alumínio.

Tabela 6: Elementos químicos presentes na amostra de cinza volante (RODRIGUES, 2022)

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

2.2. Métodos

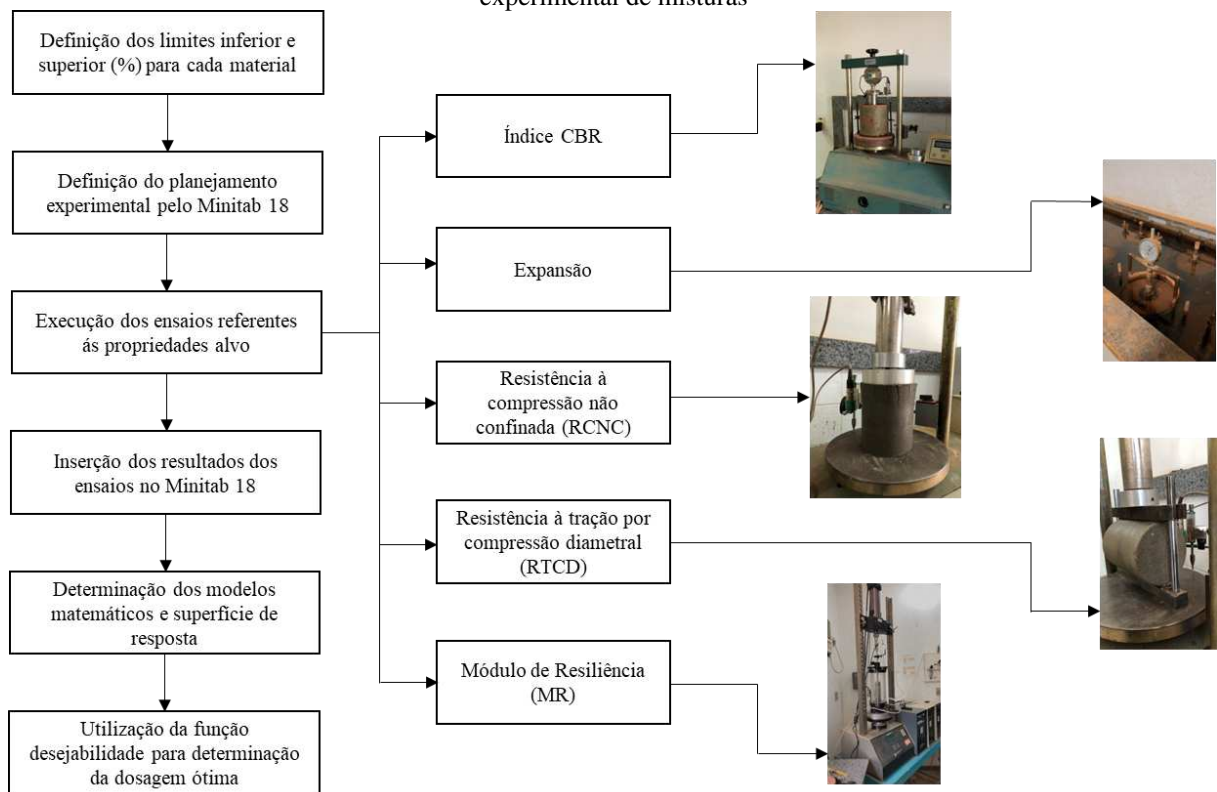
2.2.1. Caracterização ambiental das amostras de EAEP e CV

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

2.2.2. Método Simplex-Centróide

A avaliação da influência das amostras de EAEP e CV para fins de estabilização química das amostras de solos foi realizada através do método estatístico de planejamento experimental em rede Simplex-Centróide. O *software* estatístico Minitab 18 foi empregado para esse procedimento, com o objetivo de determinar a dosagem ótima para a estabilização química das amostras de solos. O fluxograma ilustrado na Figura 11 detalha o processo.

Figura 11: Fluxograma do procedimento do método Simplex-Centróide para otimização de planejamento experimental de misturas



2.2.2.1. Planejamento experimental

Dentro das particularidades desta pesquisa, três componentes foram usados para formar as misturas experimentais, constituindo sistemas ternários: solo, EAEP e CV. Para a elaboração do diagrama triangular do método Simplex-Centróide é necessário definir os valores máximos e mínimos (variáveis de entrada) que cada componente pode assumir nas misturas (percentagem em relação à massa seca das misturas finais).

A utilização de 5 a 20% de EAEP em relação à massa seca das misturas foi demonstrada por Jha e Sivapullaiah (2015), Manso *et al.* (2013), Montenegro *et al.* (2013), Ortega-López *et al.* (2014) e Pitanga *et al.* (2016) como sendo suficiente para promover a estabilização de solos. Por outro lado, Bin-Shafique *et al.* (2010), Pitanga *et al.* (2016) e Yildirim e Prezzi (2017) indicam teores de CV entre 2 a 20% para a estabilização do solo, especialmente quando utilizada em conjunto com escória de aciaria.

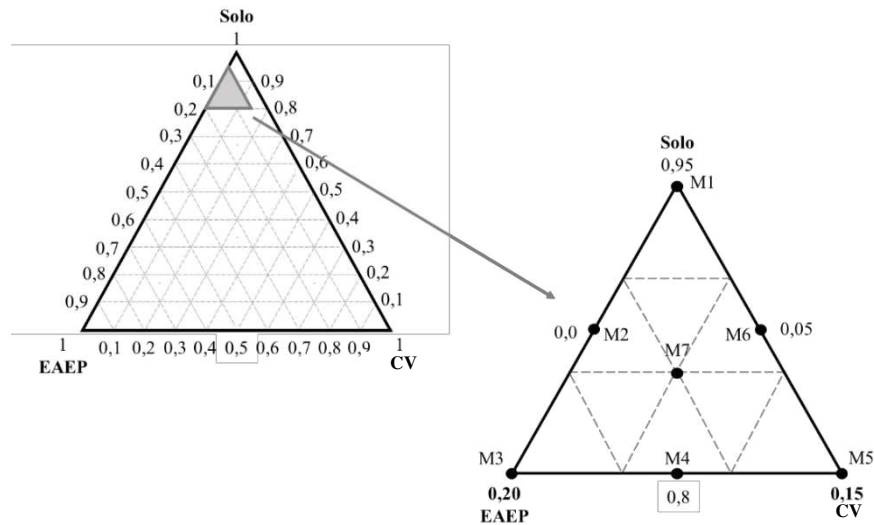
O conjunto de pseudocomponentes para a mistura solo-EAEP-CV foi definido com base nas porcentagens de cada componente, sendo que o teor de EAEP foi fixado entre 5 e 20%, enquanto o teor de CV foi fixado entre 0 e 15%. O limite superior para a porcentagem de solo foi de 95%, enquanto o limite inferior foi de 80%. Estes limites foram estabelecidos com base em estudos prévios que avaliaram a utilização de misturas de solo, EAEP e CV (ISMAIL; AWAD; MWAFFY, 2019; MONTENEGRO-COOPER *et al.*, 2019; XU; YI, 2020) e na soma de todos os componentes, que deve ser igual a 100% (FICAGNA *et al.*, 2020).

Utilizando o método de planejamento experimental em rede Simplex-Centróide, como foram considerados três componentes nas misturas analisadas, o número de misturas experimentais que foram geradas pelo método foi dado pela Equação (1), em que “q” é o número de componentes, sendo gerados 7 pontos no interior de um triângulo equilátero (M1 a M7), o qual constitui um espaço denominado de rede Simplex.

$$2^q - 1 \quad (1)$$

Portanto, foram gerados três pontos nos vértices, três nas arestas e um no baricentro. O triângulo equilátero gerado com os componentes no estado puro e o triângulo gerado com os pseudocomponentes são apresentados na Figura 12.

Figura 12: Planejamento experimental das misturas.



A Tabela 7 mostra as proporções de cada componente na mistura de solo gerada pelo *software* Minitab 18 para as amostras S1 e S2, respeitando os limites inferiores e superiores de cada componente, determinadas considerando suas respectivas massas secas em relação à massa seca total da mistura.

Tabela 7: Misturas solo-resíduos definidas no planejamento experimental.

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

As propriedades utilizadas para a avaliação do planejamento experimental desta pesquisa foram a Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), Índice de Suporte California (CBR), Expansão e Módulo de Resiliência (MR) de corpos de prova compactados das misturas analisadas, conforme as respectivas normas técnicas NBR 12025 (ABNT, 2012f), ME 181 (DNER, 1994b), NBR 9895 (ABNT, 2016g) e ME 134 (DNIT, 2018). Essas propriedades estão diretamente relacionadas com os critérios de seleção de materiais para composição de camadas estruturais de pavimentos rodoviários, conforme recomendações da norma técnica NBR 12253 (ABNT, 2012a) e do DNIT (2006).

2.2.2.2. Ensaio de compactação

Os ensaios de laboratório realizados visaram obter as curvas de compactação na energia do Proctor Intermediário para cada mistura. Estas curvas permitiram determinar os pesos específicos aparentes secos máximos (γ_{dmax}) e os teores de umidade ótimo (w_{ot}), de acordo com as recomendações da NBR 12023 (ABNT, 2012g).

2.2.2.3. Moldagem de corpos de prova dos ensaios de desempenho

Foram moldados três corpos de prova no teor de umidade ótimo, os quais foram submetidos a um processo de cura selada (em filme de PVC) em câmara úmida por sete dias, para posterior análise (MAGHOOL *et al.*, 2016).

Os corpos de prova foram produzidos em moldes cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 127 mm para a avaliação da RCNC e RTCD, de acordo com a norma técnica NBR 12024 (ABNT, 2012h). As dimensões dos corpos de prova moldados para o ensaio de CBR e Expansão foi de 150,8 mm de diâmetro e 177,8 mm de altura, de acordo com a norma técnica NBR 9895 (2016h). Para o ensaio de MR, os corpos de prova foram moldados em um molde cilíndrico de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, conforme a norma técnica ME 134 (DNIT, 2018). A média de três determinações de ensaios foi considerada para cada propriedade analisada, com coeficiente de variação máximo de 10%.

2.2.2.4. Resistência à compressão não confinada

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

2.2.2.5. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de RTCD foi realizado em corpos de prova das amostras de solos em sua condição natural e das misturas solo-resíduos analisadas, de acordo com a norma técnica ME 181 (DNER, 1994b). Ressalta-se que a moldagem dos CPs utilizou as dimensões prescritas na NBR 12024 (ABNT, 2012h).

2.2.2.6. Índice CBR e Expansão

Os ensaios para determinar os valores de CBR e da Expansão das amostras de solo na condição natural e das misturas solo-resíduos foram realizados de acordo com a norma técnica NBR 9895 (ABNT, 2016g). Os corpos de prova foram compactados e, em seguida, envolvidos em sacos plásticos e mantidos em câmara úmida por sete dias para realizar o procedimento de cura selada. Após este período, os corpos de prova foram submersos em água por 96 horas para avaliar a expansão. Uma vez concluída a expansão, os corpos de prova foram retirados da imersão e deixados em repouso por 15 minutos para remover o excesso de água. Em seguida, foram submetidos à prensa para obter o índice CBR.

2.2.2.7. Módulo de resiliência

O ensaio de MR foi realizado de acordo com as normas técnicas ME 134 (DNIT, 2018a), para os solos, e ME 181 (DNIT, 2018b), para as misturas solo-resíduos, segundo os pares de tensões prescritos pelas referidas normas. O pulso de carga durou 0,1 segundo e o período de descanso foi de 0,9 segundo, totalizando um ciclo completo de 1 segundo.

2.2.2.8. Modelos descritivos e gráficos de contorno

Os resultados dos ensaios de RCNC, RTCD, CBR, Expansão e MR, para as misturas M1 a M7 de cada amostra de solo, foram inseridos no Minitab 18, visando à definição dos respectivos modelos matemáticos polinomiais descritivos de cada uma das propriedades analisadas em função dos teores de cada componente nas misturas, assim como os gráficos de contorno, os quais correspondem às representações gráficas dos modelos matemáticos.

O método de ajuste dos modelos matemáticos usado foi o *stepwise*, o qual retira automaticamente os termos que não são estatisticamente significativos. O nível de significância adotado foi de 5%, o que significa que os termos com p-valor maior que 0,05 foram considerados estatisticamente não significativos. As análises foram definidas pelas formas canônicas dos modelos de misturas em termo do cúbico especial, por meio do qual se avalia a interação entre todos os componentes da mistura.

Para realizar uma análise do modelo matemático para cada variável de resposta, é necessário avaliar a constante para o termo linear, separada do termo que representa a interação entre dois ou mais componentes. Segundo Cornell (2011), para realizar a análise dos

coeficientes que multiplicam as variáveis sem interação, realiza-se o cálculo da média aritmética entre esses coeficientes e verifica-se quais coeficientes estão acima e quais estão abaixo da média. Os coeficientes que estiverem acima da média sinalizam que o componente que o multiplica promove um aumento na propriedade analisada, enquanto que o coeficiente que se encontra com valor abaixo da média representa uma redução na propriedade analisada com o aumento do componente que o multiplica.

Em suma, a constante para o termo linear representa o valor previsto pelo modelo matemático ao usar a quantidade máxima de cada componente. Por outro lado, a constante relacionada à interação entre os componentes das misturas produz um aumento ou diminuição na propriedade investigada, sendo sua análise dada por observação do sinal que encontra acompanhado dessa interação, ou seja, se o sinal for positivo, ocorre sinergismo, caso seja negativo, há antagonismo (BARROS NETO, 2010; KAMPIOTI; KOMILIS, 2022; MONTGOMERY, 2017).

2.2.2.9.Otimização através da função Desejabilidade

A otimização da dosagem das misturas solo-resíduos foi realizada com o objetivo de se obter uma proporção entre os componentes (Solo, EAEP e CV) que resulte em uma mistura que atenda aos diferentes requisitos limites de RCNC, RTCD, CBR, Expansão e MR, de forma a viabilizar tecnicamente a aplicação dessas misturas nas camadas estruturais de base, sub-base e reforço de subleito de pavimentos asfálticos. Foram considerados e testados dois conjuntos distintos de propriedades de engenharia visando a determinação da dosagem ótima: conjunto 1 (RCNC, CBR e Expansão) e conjunto 2 (MR, RTCD e Expansão).

A otimização se deu por meio da função Desejabilidade do Minitab 18, a qual transforma o valor de cada variável de resposta (propriedade) em um valor entre 0 e 1. Esse valor representa o quão próxima a resposta está do seu valor ideal. Para cada propriedade avaliada, uma Desejabilidade individual é criada. As Desejabilidades individuais são combinadas para formar uma Desejabilidade composta, a qual converte as respostas individuais múltiplas em uma única resposta com um valor de Desejabilidade entre 0 e 1. O valor 1 significa que a resposta está dentro dos limites ideais. Se a resposta estiver fora dos limites ideais, a Desejabilidade será um valor entre 0 e 1 (PANDEY *et al.*, 2020).

Por exemplo, se o requisito limite mínimo adotado para a RCNC for igual a 690 kPa e a mistura experimental apresentar RCNC maior ou igual a esse valor, ela atende ao requisito e, conseqüentemente, o valor de Desejabilidade para essa propriedade será igual a 1,0. Caso essa mistura não atenda ao requisito, o índice de Desejabilidade da mistura para essa propriedade será menor que 1 e decresce de forma proporcional a quão distante ela está do valor alvo.

Para a otimização das misturas solo-resíduos a fim de serem utilizadas em camadas de base, foi adotado o valor mínimo de 690 kPa para a RCNC, conforme Gautreau, Zhang e Wu (2010) e T 220 (AASHTO, 2018). Para o MR, os valores mínimos foram extraídos de AASHTO (2020), sendo 82,74 MPa para solos finos (amostra de solo S1) e 165,47 MPa para solos granulares (amostra de solo S2). Para o índice CBR, o valor mínimo adotado foi de 60%, e a Expansão máxima de 0,5%, conforme o DNIT (2006), os quais são indicados para camadas de base de pavimentos asfálticos destinados a suportar um número de solicitações do eixo padrão menor que 5×10^6 .

Oluokun (1991) avaliou as relações existentes entre a resistência à compressão (f_c) e a resistência à tração por compressão diametral (f_{ct}), gerando, através dos dados de regressão, a equação (2) para correlação entre as resistências:

$$f_{ct} = 0,214 * (f_c)^{0,69} \quad (2)$$

Tomando esta relação para o presente estudo, pode-se admitir que o valor de $f_c = 690$ kPa, prescrito pela T 220 (AASHTO, 2018) como resistência mínima obtida no ensaio de resistência à compressão não confinada para aplicação de materiais em camadas de base de pavimentos, está associada a uma resistência à tração por compressão diametral mínima de $f_{ct} = 165,66$ kPa.

Para a otimização das misturas solo-resíduos a fim de serem utilizadas em camadas de sub-base, foi adotado o valor mínimo aceitável de RCNC de 690 kPa, segundo Gautreau, Zhang e Wu (2010). Conforme a AASHTO (2020), os valores mínimos de MR adotados para aceitação de solos argilosos e arenosos para a camada de sub-base são 82,74 MPa e 165,47 MPa, respectivamente. Para o índice CBR, o valor mínimo adotado foi de 20%, e a Expansão máxima foi de 1%, conforme DNIT (2006). Para a RTCD, adotou-se o valor mínimo derivado da equação de Oluokun (1991), ou seja, $f_{ct} = 165,66$ kPa.

Para a otimização das misturas solo-resíduos a fim de serem utilizadas em camadas de reforço de subleito, os valores mínimos de RCNC, MR e índice CBR, e a Expansão máxima adotados para ambas amostras de solo foram, respectivamente, 345 kPa (GAUTREAU; ZHANG; WU, 2010), 68,95 kPa (AASHTO, 2020), 2% e 1% (DNIT, 2006). Para a RTCD, adotou-se o valor mínimo derivado da equação de Oluokun (1991) quando $f_c = 345$ kPa, ou seja, $f_{ct} = 102,69$ kPa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização ambiental

Nas Tabela 8 e Tabela 9, são apresentados os resultados obtidos nas análises dos extratos lixiviados e solubilizados das amostras de EAEP e CV, obtidas por Rodrigues (2022). São também apresentados os limites máximos de concentração dos elementos para a classificação dos resíduos industriais, conforme a norma técnica NBR 10004 (ABNT, 2004b).

Tabela 8: Concentrações dos elementos nos extratos lixiviados (RODRIGUES, 2022)

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

* Limites impostos pela Portaria GM/MS n° 888/2021

Tabela 9: Concentrações dos elementos nos extratos solubilizados (RODRIGUES, 2022)

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

* Limites impostos pela Portaria GM/MS n° 888/2021

A análise química dos extratos lixiviados das amostras de EAEP moída e CV mostrou que as concentrações dos elementos químicos estavam abaixo dos limites máximos estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004b). Isso indica que as amostras de EAEP moída e CV possuem potencial para serem aplicadas em misturas com amostras de solo para aplicação em camadas estruturais de pavimentos.

Os resultados do extrato solubilizado da amostra de EAEP moída indicam que os elementos Ferro e Alumínio apresentam concentrações acima dos limites máximos recomendados para ser considerada inerte segundo a Portaria GM/MS nº 888/2021, sendo os limites máximos de concentração de Ferro e Alumínio de 0,3 mg/L e de 0,2 mg/L, respectivamente. Da mesma forma, o elemento químico cromo presente na CV obteve uma concentração superior ao limite máximo de 0,05 mg/L também adotado pela Portaria GM/MS nº 888/2021, o que impede o contato direto da amostra de CV com reservas de água de maneira a não interferir na potabilidade da água.

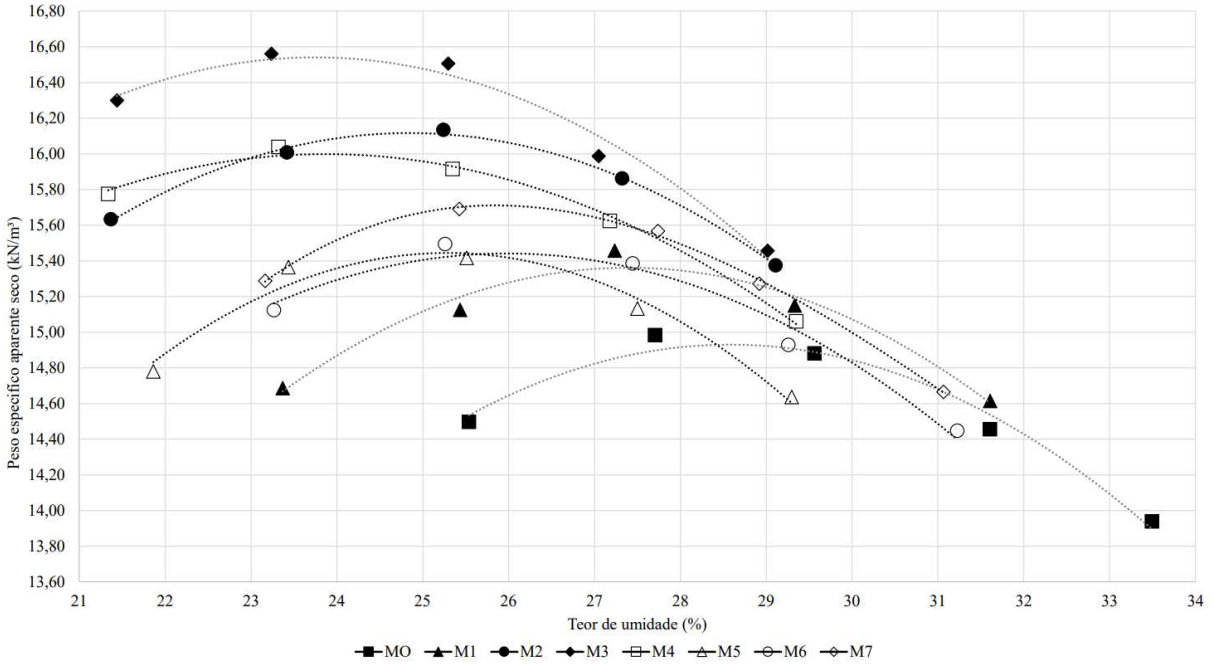
Dessa maneira, conclui-se que os resíduos industriais EAEP moída e CV são adequados para uso como agentes estabilizadores de solos em pavimentos, desde que sejam tomadas as devidas precauções para evitar o contato direto com reservas de água, sendo classificados como resíduos sólidos da Classe II A – não perigosos não inertes. Inferiu-se que esses resíduos industriais são de baixo impacto ambiental, não sendo considerados agressivos ao meio ambiente e à saúde humana.

3.2. Método de planejamento experimental em rede Simplex-Centróide

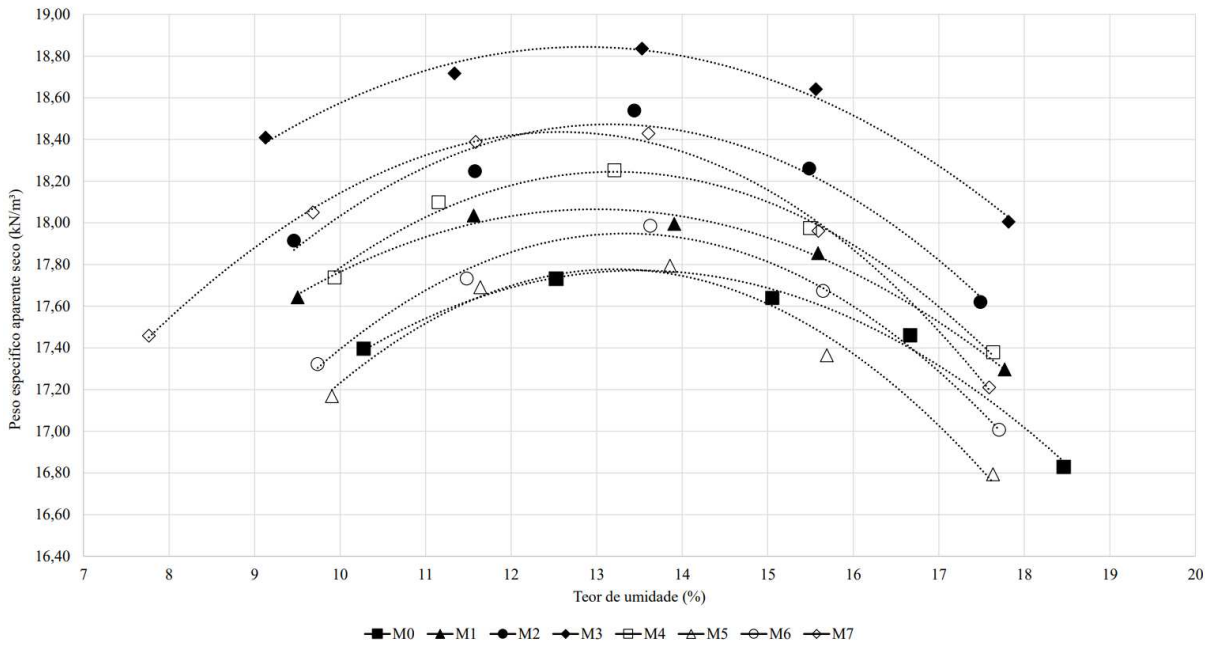
3.2.1. Ensaio de compactação

A Figura 13 apresenta as curvas de compactação dos materiais investigados. A Tabela 10 apresenta os parâmetros dos pontos ótimos [peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) e teor de umidade ótimo (w_{ot})], obtidos através das curvas de compactação das misturas analisadas e compactadas na energia do Proctor Intermediário. Os valores referentes às amostras de solo em seus estados naturais, denominadas como M0 – 100/0/0, também são apresentados.

Figura 13: Gráficos de compactação para determinação dos parâmetros de ótimo: (a) solo S1 e suas misturas; (b) solo S2 e suas misturas



(a)



(b)

Tabela 10: Parâmetros de ótimo das misturas analisadas para as duas amostras de solo.

| Misturas | S1 | | S2 | |
|------------------|---------------------|--|---------------------|--|
| | w _{ot} (%) | γ _{dmax} (kN/m ³) | w _{ot} (%) | γ _{dmax} (kN/m ³) |
| M0 - 100/0/0 | 28,2 | 14,98 | 13,9 | 17,75 |
| M1 - 95/5/0 | 27,4 | 15,35 | 13,0 | 18,07 |
| M2 - 87,5/12,5/0 | 25,0 | 16,11 | 13,7 | 18,47 |
| M3 - 80/20/0 | 23,6 | 16,61 | 13,4 | 18,83 |
| M4 - 80/12,5/7,5 | 23,8 | 16,03 | 13,1 | 18,26 |
| M5 - 80/5/15 | 24,8 | 15,47 | 12,9 | 17,82 |
| M6 - 87,5/5/7,5 | 25,6 | 15,53 | 13,5 | 17,95 |
| M7 - 85/10/5 | 25,9 | 15,71 | 12,6 | 18,45 |

M: Mistura – solo (%)/EAEP(%)/CV(%).

As misturas M3, para ambas as amostras de solo investigadas, apresentaram as maiores densidades secas máximas. Observou-se que houve redução do teor de umidade ótimo em todas as misturas para as duas amostras de solo analisadas em relação às referidas amostras no estado natural. Observou-se que, com o aumento do teor de resíduos, sobretudo com o teor de EAEP, o teor de umidade ótimo diminuiu, tendência também observada por outros autores (ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; GUNARTI; RAHARJA, 2020; SEBBAR *et al.*, 2020; ZUMRAWI; BABIKIR, 2017).

Essa observação da redução do teor de umidade com a adição de EAEP pode ser explicada por dois fatores: devida às trocas catiônicas que ocorrem entre os íons de cálcio provenientes da EAEP e os íons presentes na dupla camada difusa das partículas dos solos (ZUMRAWI; BABIKIR, 2017); e/ou pela hidratação prévia dos óxidos de cálcio presentes na EAEP, gerando o composto hidróxido de cálcio, que exige menos água na mistura para alcançar seu peso específico aparente seco máximo (ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017).

Para as duas amostras de solos, um aumento nos teores de resíduos nas misturas gerou acréscimos nos valores de peso específico aparente seco máximo, sobretudo com a adição de EAEP. Isso se deve ao fato de que a massa específica real da EAEP é maior do que a das duas amostras de solo, o que resulta em uma estrutura mais densa que pode influenciar de maneira positiva nas propriedades mecânicas das misturas, gerando seu incremento, conforme constatado em várias pesquisas (AL-AMOUDI *et al.*, 2017; ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017; BRAND *et al.*, 2020; OLUWASOLA *et al.*, 2020; SEBBAR *et al.*, 2020).

3.2.2. Propriedades analisadas

Utilizando os parâmetros de ótimo dos ensaios de compactação (γ_{dmax} e w_{ot}), foram confeccionados os corpos de prova para os ensaios de RCNC, RTCD, CBR, Expansão e MR. Os resultados das propriedades mecânicas e da Expansão são apresentados na Tabela 11. Salienta-se que o MR corresponde à média dos valores individuais obtidos para cada um dos estados de tensões prescritos pela norma ME 134 (DNIT, 2018).

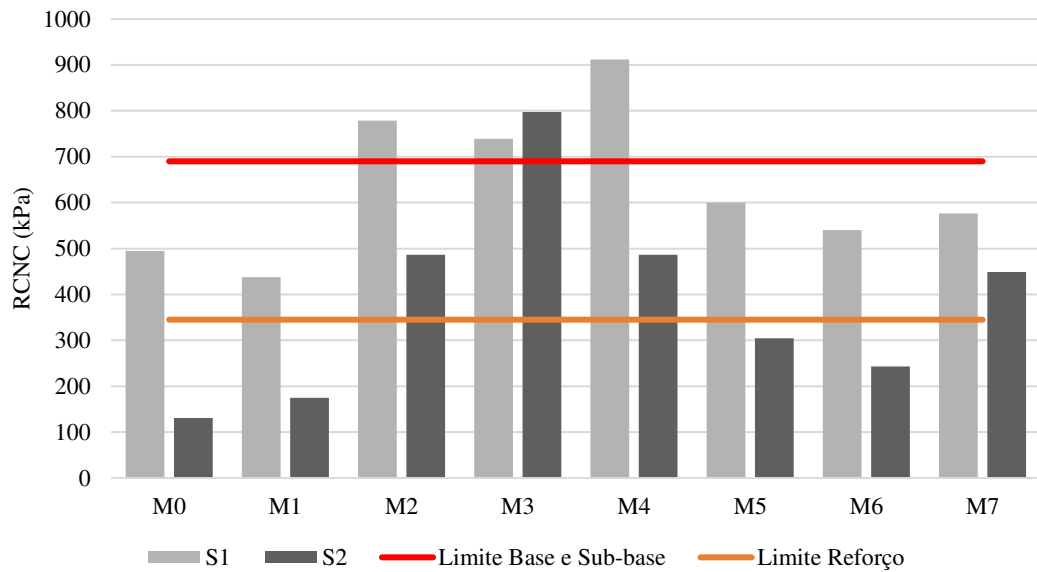
Tabela 11: Propriedades mecânicas e Expansão das misturas e amostras de solo analisadas

| Misturas | S1 | | | | | S2 | | | | |
|----------|------------|------------|----------|---------|----------|------------|------------|----------|---------|----------|
| | RCNC (kPa) | RTCD (kPa) | MR (MPa) | CBR (%) | Exp. (%) | RCNC (kPa) | RTCD (kPa) | MR (MPa) | CBR (%) | Exp. (%) |
| M0 | 494,8 | 31,0 | 174,96 | 15 | 0,48 | 130,8 | 15,30 | 101,28 | 16 | 0,29 |
| M1 | 437,7 | 86,0 | 142,51 | 24 | 0,09 | 174,6 | 19,40 | 96,60 | 23 | 0,05 |
| M2 | 778,8 | 141,0 | 250,42 | 36 | 0,53 | 486,4 | 40,80 | 145,18 | 27 | 0,05 |
| M3 | 738,9 | 198,0 | 299,35 | 54 | 0,10 | 797,5 | 77,00 | 156,02 | 53 | 0,01 |
| M4 | 911,6 | 128,0 | 225,43 | 38 | 0,31 | 486,4 | 27,80 | 126,20 | 36 | 0,04 |
| M5 | 600,1 | 94,0 | 158,06 | 45 | 0,11 | 304,5 | 24,30 | 120,92 | 28 | 0,10 |
| M6 | 539,9 | 108,0 | 168,75 | 43 | 0,15 | 243,3 | 16,80 | 113,46 | 26 | 0,13 |
| M7 | 576,4 | 128,0 | 145,52 | 35 | 0,32 | 448,7 | 26,80 | 105,88 | 39 | 0,04 |

3.2.2.1. Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC)

Na Figura 14, são apresentados os resultados do ensaio de RCNC para as amostras de solo na condição natural e suas misturas com resíduos. Foi verificado que os maiores acréscimos nos valores de RCNC em relação aos valores obtidos para as amostras de solo no estado natural ocorreram na mistura M4, para a amostra de solo S1, e M3, para a amostra de solo S2, as quais ultrapassaram, aos 7 dias de cura selada, os respectivos valores mínimos de RCNC para as camadas estruturais de base e sub-base (690 kPa) e de reforço de subleito (345 kPa).

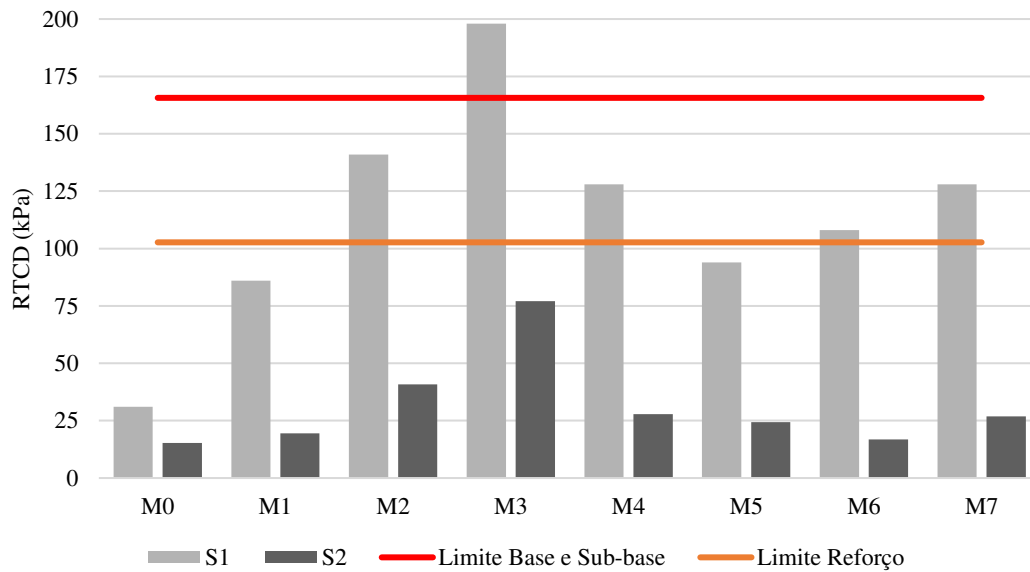
Figura 14: Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC) das misturas e amostras de solo analisadas



3.2.2.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD)

Na Figura 15, são apresentados os resultados do ensaio de RTCD para as amostras de solo na condição natural e suas misturas com resíduos. Foi verificado que os maiores acréscimos nos valores de RTCD em relação aos valores obtidos para as amostras de solo no estado natural ocorreram nas misturas M3, para as amostras de solo S1 e S2. Observou-se que, para o solo S1, a mistura M3 ultrapassou, aos 7 dias de cura selada, os respectivos valores mínimos de RTCD para as camadas estruturais de base e sub-base (165,66 kPa) e de reforço de subleito (102,69 kPa). Para as misturas envolvendo o Solo S2, a despeito do incremento de RTCD proporcionado pela adição dos resíduos, nenhuma delas atingiu, aos 7 dias de cura selada, os valores mínimos estabelecidos visando sua aplicação em camadas estruturais de pavimento.

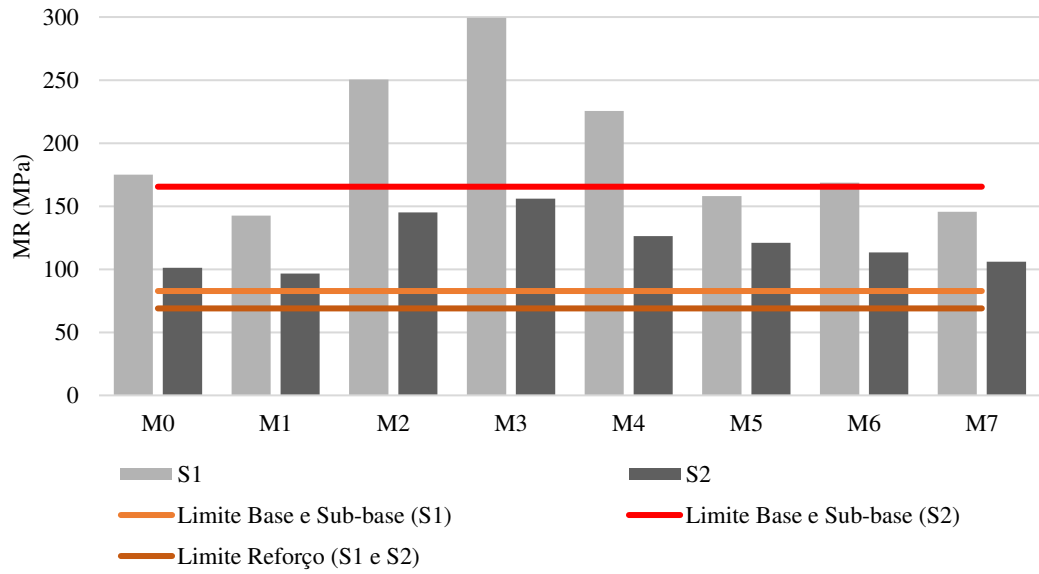
Figura 15: Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) das misturas e amostras de solo analisadas



3.2.2.3. Módulo de Resiliência (MR)

Na Figura 16, são apresentados os resultados do ensaio de MR para as amostras de solo na condição natural e suas misturas com resíduos. Foi verificado que os maiores acréscimos nos valores de MR em relação aos valores obtidos para as amostras de solo no estado natural ocorreram nas misturas M3, para as amostras de solo S1 e S2. Observou-se que, para o solo S1, a mistura M3 ultrapassou, aos 7 dias de cura selada, os respectivos valores mínimos de MR para as camadas estruturais de base e sub-base (82,74 MPa) e de reforço de subleito (68,95 MPa). Para as misturas envolvendo o solo S2, a despeito do incremento de MR proporcionado pela adição dos resíduos, nenhuma delas atingiu, aos 7 dias de cura selada, os valores mínimos estabelecidos visando sua aplicação em camadas estruturais de base e sub-base (165,47 MPa), atendendo, porém, ao mínimo definido para a camada de reforço do subleito (68,95 MPa).

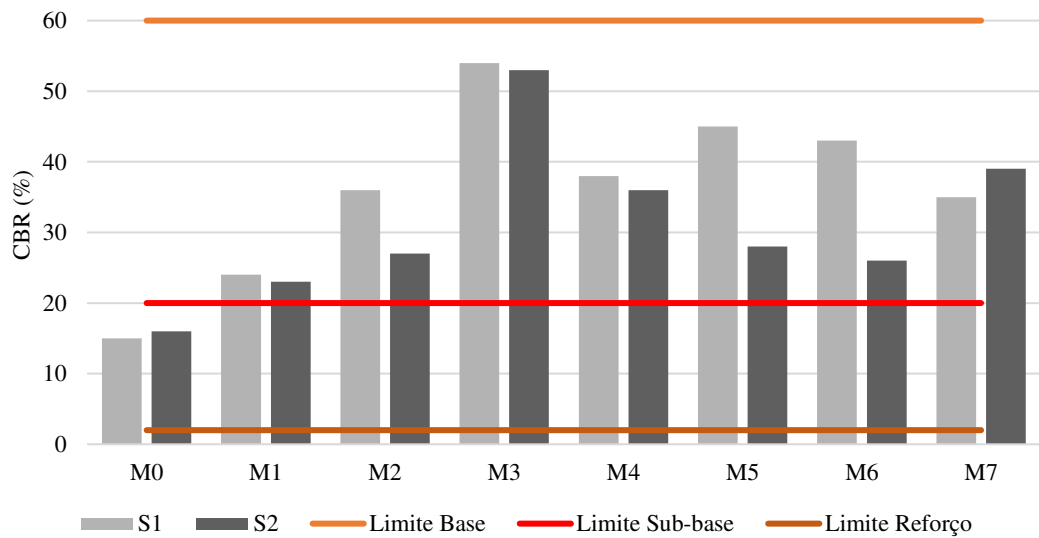
Figura 16: Módulo de Resiliência (MR) das misturas e amostras de solo analisadas



3.2.2.4. Índice de Suporte Califórnia (CBR)

A Figura 17 apresenta os resultados do ensaio de CBR, sendo possível constatar que as misturas M3 foram as que apresentaram os maiores valores de CBR para as amostras de solo S1 e S2.

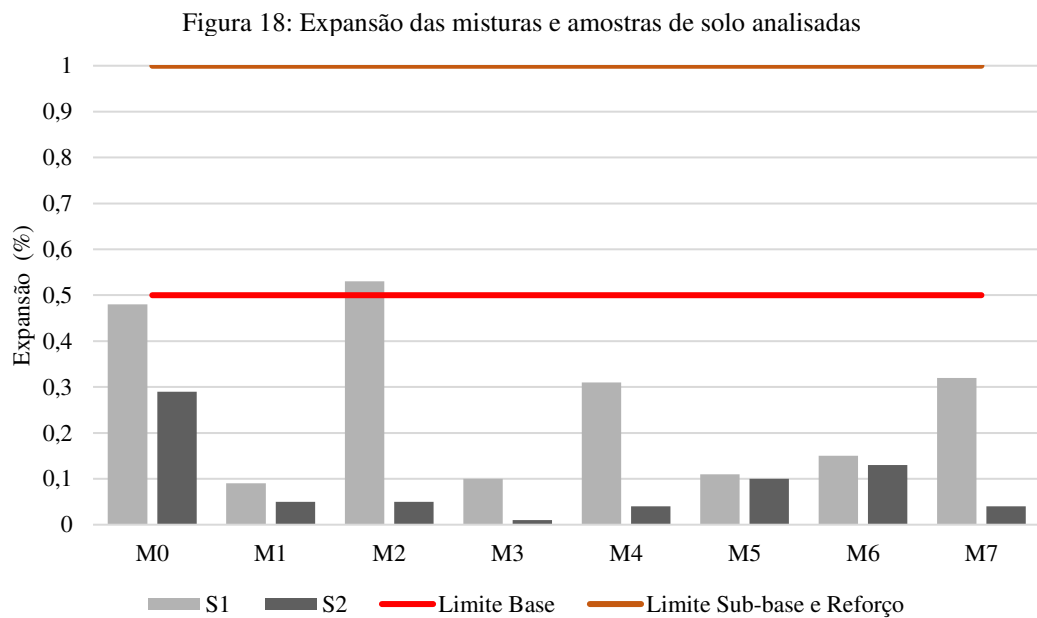
Figura 17: CBR das misturas e amostras de solo analisadas



Observou-se que, para os solos S1 e S2, nenhuma das misturas atingiu, aos 7 dias de cura selada, o valor mínimo de CBR para a camada estrutural de base (60%), porém todas as misturas atenderam aos respectivos valores mínimos de CBR correspondentes às camadas de sub-base (20%) e de reforço de subleito (2%).

3.2.2.5. Expansão

A Figura 18 apresenta os resultados do ensaio de Expansão, sendo possível constatar que as misturas M1 e M3, para as amostras de solo S1 e S2, respectivamente, foram as que apresentaram os menores valores de Expansão.



Observou-se que, para o solo S2, todas as misturas atingiram, aos 7 dias de cura selada, valores inferiores ao valor máximo de Expansão para ser empregada na camada estrutural de base (0,5%). Quanto ao solo S1, somente a mistura M2 ultrapassou o valor máximo de Expansão para ser utilizada como camada de base, entretanto a mesma atendeu os limites máximos de Expansão para as camadas de sub-base e reforço de subleito (1%).

3.2.2.6. Considerações gerais

O acréscimo das propriedades mecânicas com a adição dos resíduos às amostras de solo pode ser atribuído aos seguintes fatores: (i) à reação dos compostos CaO e Ca(OH)₂ presentes nos resíduos (predominantemente na EAEP) com as partículas de argila no solo e/ou à

estabilização física do solo pelas partículas de resíduos (BRAND et al., 2020); (ii) à formação de compostos cimentícios, como o C-S-H, C-A-H e C-A-S-H, o que confere às misturas solo-resíduos maior resistência mecânica quando se combinam com hidróxido de cálcio (FIROOZI, 2017; ISMAIL; AWAD; MWAIFY, 2019; YOOBANPOT et al., 2020); (iii) ao aumento de peso específico aparente seco máximo e à diminuição do teor de umidade ótimo (OLUWASOLA et al., 2020); (iv) ao processo de cimentação promovida pelo mineral *wustite* (FeO), o qual gera uma estrutura mais densa nos corpos de prova (AL-AMOUDI et al., 2017);(v) às reações pozolânicas estimuladas pela presença de CV para a formação de compostos cimentícios (BOSE, 2012; DEEPAK et al., 2021; SRIDHARAN; PRASHANTH; SIVAPULLAIAH, 1997); (vi) aos fenômenos de floculação e aglomeração, devidos ao processo de troca catiônica entre o solo e a EAEP (FIOOZI, 2017; GUNARTI e RAHARJA; 2020); (vii) à morfologia e à rugosidade das partículas dos resíduos, visto que quanto mais rugosas e irregulares forem tais partículas, maior será o ângulo de atrito e, portanto, maior a resistência mecânica (LIM; CHEAH; RAMLI, 2019; SIMATUPANG, 2021).

O decréscimo da Expansão é atribuído aos seguintes fatores: (i) à troca catiônica desencadeada pelos cátions Ca^{2+} presentes na EAEP, os quais, em solução com os argilominerais presentes na fração argila das amostras de solos analisadas, promovem uma redução na dupla camada difusa, permitindo, assim, a aglutinação das partículas de argila, o que acarreta a floculação das partículas, alterando sua estrutura (AKINWUMI, 2014; AL-MUKHTAR; KHATTAB; ALCOVER, 2012; MANSO et al., 2013; PARSAEI et al., 2021); (ii) à redução da plasticidade associada ao teor de EAEP (AKINWUMI, 2014; ALDEEKY; AL HATTAMLEH, 2017); (iii) à associação de EAEP e CV que reagem quimicamente com óxidos de cálcio e magnésio, ocorrendo o preenchimento de vazios, aumentando o peso específico aparente seco e promovendo o intertravamento das partículas, com subsequente redução da porosidade (RAPOSO, 2005). Salienta-se que outros autores observaram redução da expansão de amostras de solo com o aumento no teor de EAEP (ISMAIL; AWAD; MWAIFY, 2019; ZUMRAWI; BABIKIR, 2017).

3.2.3. Otimização das propriedades analisadas através da função Desejabilidade

3.2.3.1. Gráficos de contorno e modelos matemáticos para RCNC

Os resultados do ensaio de RCNC foram inseridos no *software* Minitab 18, após a média de três corpos de prova, com coeficiente de variação máxima de 10%, para a determinação dos gráficos de contorno para cada amostra de solo. Os gráficos de contorno da RCNC, para as misturas solo-resíduos referentes às amostras de solo S1 e S2, são apresentados na Figura 19, e as equações que representam esses gráficos são apresentadas na Tabela 12. As variáveis independentes foram as porcentagens em massa de solo (S), EAEP e CV.

Figura 19: Gráficos de contorno para a RCNC (em kPa) das misturas solo-resíduos

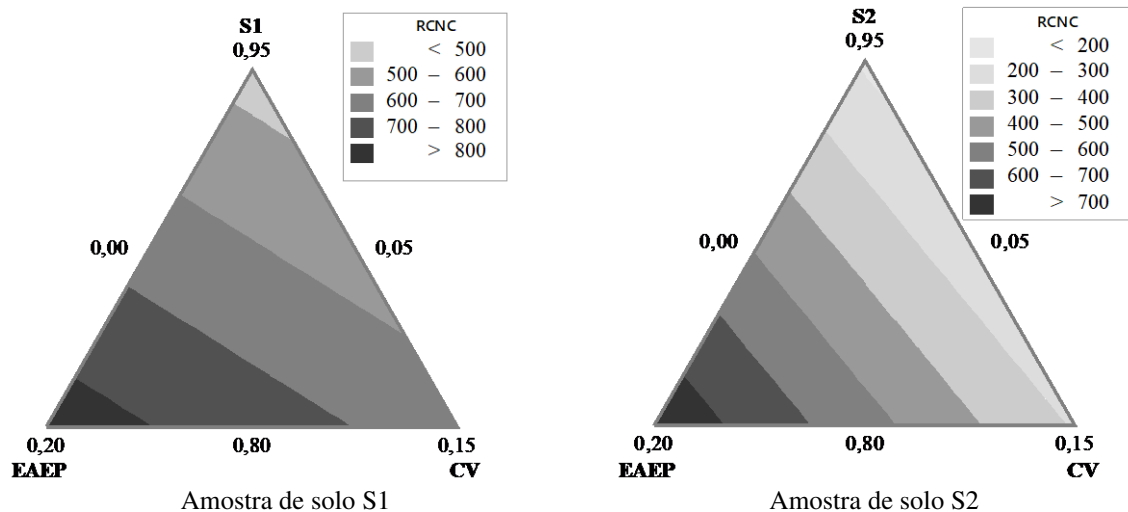


Tabela 12: Equações de regressão referentes aos gráficos de contorno da RCNC

| Amostra de solo | Equação de regressão | R ² | k _m |
|-----------------|-----------------------------|----------------|----------------|
| S1 | 464.S + 854.EAEP + 647.CV | 60,18 | 655,0 |
| S2 | 187.S + 782,6.EAEP + 291.CV | 98,47 | 420,2 |

Verificou-se que os modelos matemáticos ajustados através do método *stepwise* para os gráficos de contorno foram lineares, o que significa que os termos que representam as interações entre os componentes individuais da mistura não mostraram significância estatística. As equações indicaram que a EAEP é o único componente da mistura que contribui para o aumento dos valores da RCNC, uma vez que os coeficientes $k_2 = 854$ (S1) e $k_2 = 782,6$ (S2) foram os únicos superiores às respectivas médias dos coeficientes dos três componentes individuais para as misturas solo-resíduos.

3.2.3.2. Gráficos de contorno e modelos matemáticos para RTCD

Os resultados do ensaio de RTCD foram inseridos no *software* Minitab 18, após a média de três corpos de prova, com coeficiente de variação máxima de 10%, para a determinação dos gráficos de contorno para cada amostra de solo. Esses gráficos, para as misturas solo-resíduos das amostras de solo S1 e S2, são apresentados na Figura 20, e seus modelos matemáticos correspondentes encontram-se na Tabela 13.

Figura 20: Gráficos de contorno para a RTCD (em kPa) das misturas solo-resíduos

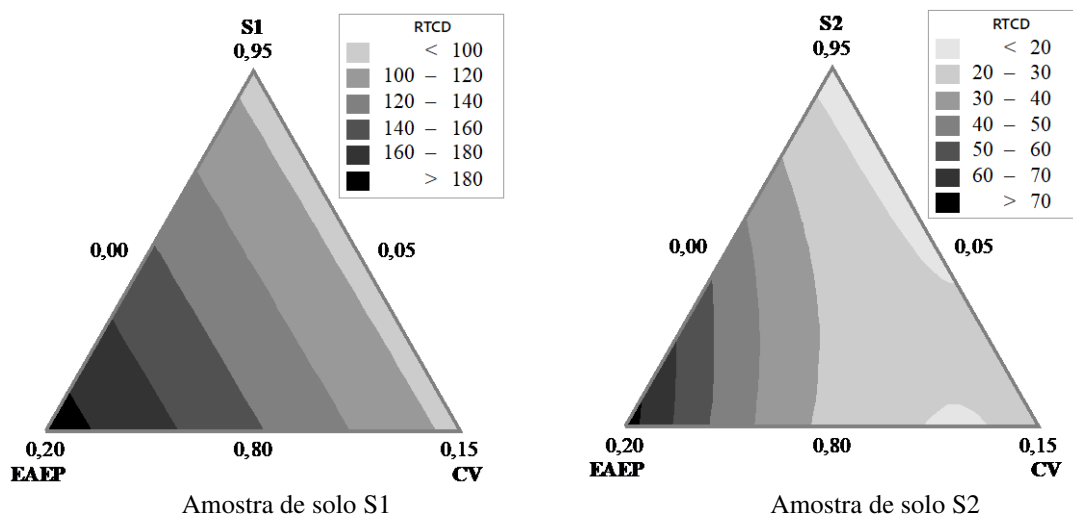


Tabela 13: Equações de regressão referentes aos gráficos de contorno da RTCD

| Amostra de solo | Equação de regressão | R ² | k _m |
|-----------------|--|----------------|----------------|
| S1 | 93,21.S + 190,81.EAEP + 94,41.CV | 93,75 | 126,14 |
| S2 | 15,57.S + 74,69.EAEP + 22,93.CV - 86,4.EAEP.CV | 98,11 | 37,73 |

Verifica-se, para as misturas de solo-resíduos do solo S1, que o modelo matemático ajustado através do método *stepwise* para o gráfico de contorno foi linear, o que significa que os termos que representam as interações entre os componentes não mostraram significância estatística. A equação indica que a EAEP é o único componente da mistura que contribui para o aumento do valor da RTCD, uma vez que seu coeficiente ($k_2=190,81$) foi o único superior à média ($k_m=126,14$) dos coeficientes dos três componentes individuais para as misturas solo-resíduos do solo S1.

Para a amostra do solo S2, nota-se que o modelo matemático apresenta um termo com interação entre os pseudocomponentes, o que demonstra que a interação EAEP-CV gera um decréscimo na RTCD (antagonismo), com o incremento de termos que interagem entre si, e o

gráfico de contorno deixa de ser linear, apresentando áreas curvas para descrever a variação da propriedade analisada. Observa-se que a EAEP é o único componente que contribui significativamente para o aumento da RTCD, uma vez que seu coeficiente ($k_2=74,69$) foi o único superior à média ($k_m=37,73$) dos coeficientes dos três componentes individuais para as misturas solo-resíduos do solo S2.

3.2.3.3. Gráficos de contorno e modelos matemáticos para MR

Os resultados do ensaio de MR foram inseridos no *software* Minitab 18, após a média de três corpos de prova, com coeficiente de variação máxima de 10%, para a determinação do gráfico de contorno para cada amostra de solo. Esses gráficos, para as misturas solo-resíduos das amostras de solo S1 e S2, são apresentados na Figura 21, e seus modelos matemáticos correspondentes encontram-se na Tabela 14.

Figura 21: Gráficos de contorno para o MR (em MPa) das misturas solo-resíduos

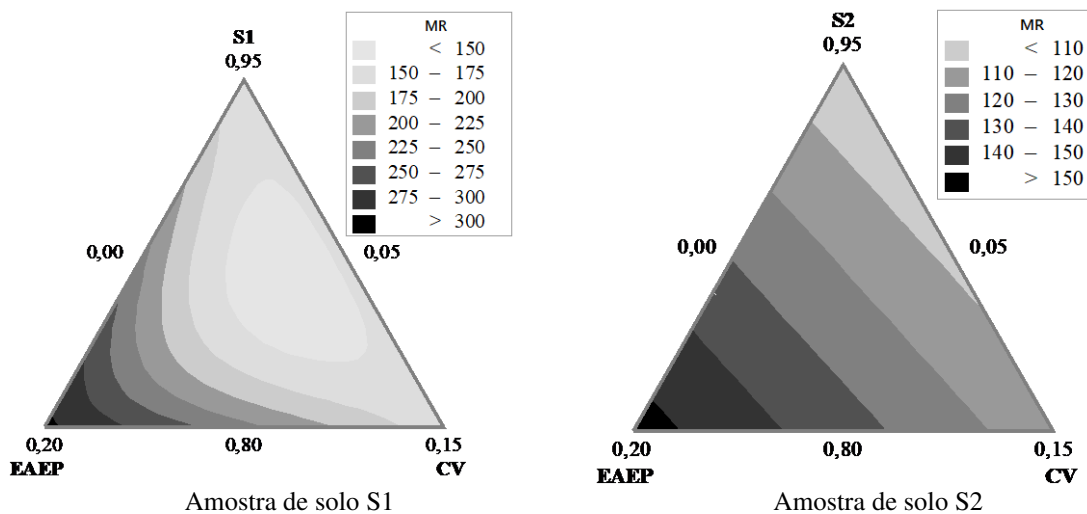


Tabela 14: Equações de regressão referentes aos gráficos de contorno do MR

| Amostra de solo | Equação de regressão | R ² | k _m |
|-----------------|--|----------------|----------------|
| S1 | $157,2.S + 305,4.EAEP + 159,7.CV - 1671.S.EAEP.CV$ | 96,47 | 207,43 |
| S2 | $102.S + 154,6.EAEP + 113,8.CV$ | 71,19 | 123,46 |

Verifica-se, para as misturas de solo-resíduos do solo S1, que o modelo matemático apresenta um termo com interação entre os pseudocomponentes, o que demonstra que a interação S-EAEP-CV gera um decréscimo no MR (antagonismo) com o incremento de termos que interagem entre si, e o gráfico de contorno deixa de ser linear, apresentando áreas curvas para descrever a variação da propriedade analisada. A equação indica que a EAEP é o único

componente da mistura que contribui para o aumento do valor de MR, uma vez que seu coeficiente ($k_2=305,4$) foi o único superior à média ($k_m=207,43$) dos coeficientes dos três componentes individuais para as misturas solo-resíduos do solo S1.

Para a amostra do solo S2, nota-se que que o modelo matemático ajustado através do método *stepwise* para o gráfico de contorno foi linear, o que significa que os termos que representam as interações entre os componentes não mostraram significância estatística. A equação indica que a EAEP é o único componente da mistura que contribui para o aumento do valor de MR, uma vez que seu coeficiente ($k_2=154,6$) foi o único superior à média ($k_m=123,46$) dos coeficientes dos três componentes individuais para as misturas solo-resíduos do solo S2.

3.2.3.4. Gráficos de contorno e modelos matemáticos para CBR

Os resultados do índice CBR foram inseridos no *software* Minitab 18, após a média de três corpos de prova, com coeficiente de variação máxima de 10%, para a determinação do gráfico de contorno para cada amostra de solo. Esses gráficos, para as misturas solo-resíduos das amostras de solo S1 e S2, são apresentados na Figura 22, e seus modelos matemáticos correspondentes encontram-se na Tabela 15.

Figura 22: Gráficos de contorno para o CBR (em %) das misturas solo-resíduos

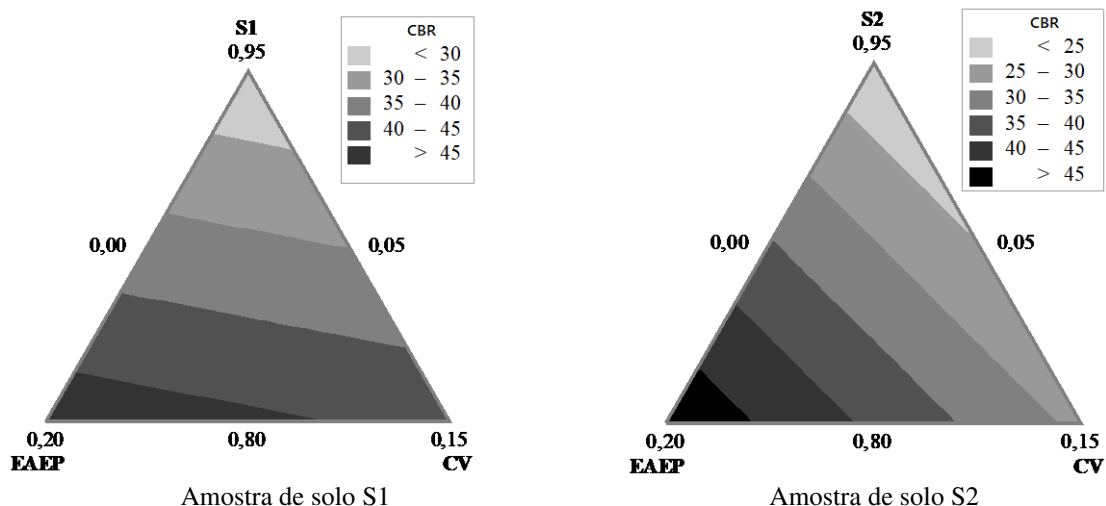


Tabela 15: Equações de regressão referentes aos gráficos de contorno do CBR

| Amostra de solo | Equação de regressão | R ² | k _m |
|-----------------|---------------------------------|----------------|----------------|
| S1 | 26,09.S + 48,09.EAEP + 43,69.CV | 64,24 | 39,29 |
| S2 | 21,28.S + 49,28.EAEP + 28,88.CV | 80,04 | 33,15 |

Para as amostras de solo S1 e S2, os modelos matemáticos das misturas não apresentaram interação significativa entre os componentes, sendo modelos lineares. Para a amostra de solo S1, nota-se que os componentes EAEP e CV são os materiais que influenciam no incremento do índice CBR, visto que seus respectivos coeficientes ($k_2=48,09$; $k_3=43,69$) foram superiores à média dos coeficientes dos três componentes individuais ($k_m=39,29$), sendo, porém, a EAEP o componente que mais contribui. Para as misturas solo-resíduos da amostra de solo S2, observa-se que a EAEP é o único componente que contribui significativamente para o aumento do índice CBR, uma vez que seu coeficiente ($k_2=49,28$) foi o único superior à média ($k_m=33,15$) dos coeficientes dos três componentes individuais.

3.2.3.5. Gráficos de contorno e modelos matemáticos para a Expansão

Os resultados de Expansão, obtidos do ensaio CBR, foram inseridos no *software* Minitab 18, após a média de três corpos de prova, com coeficiente de variação máxima de 10%, para a determinação do gráfico de contorno para cada amostra de solo. Esses gráficos de contorno, para as misturas solo-resíduos das amostras de solo S1 e S2, são apresentados na Figura 23, e seus modelos matemáticos correspondentes encontram-se na Tabela 16.

Figura 23: Gráficos de contorno para a Expansão (em %) das misturas solo-resíduos

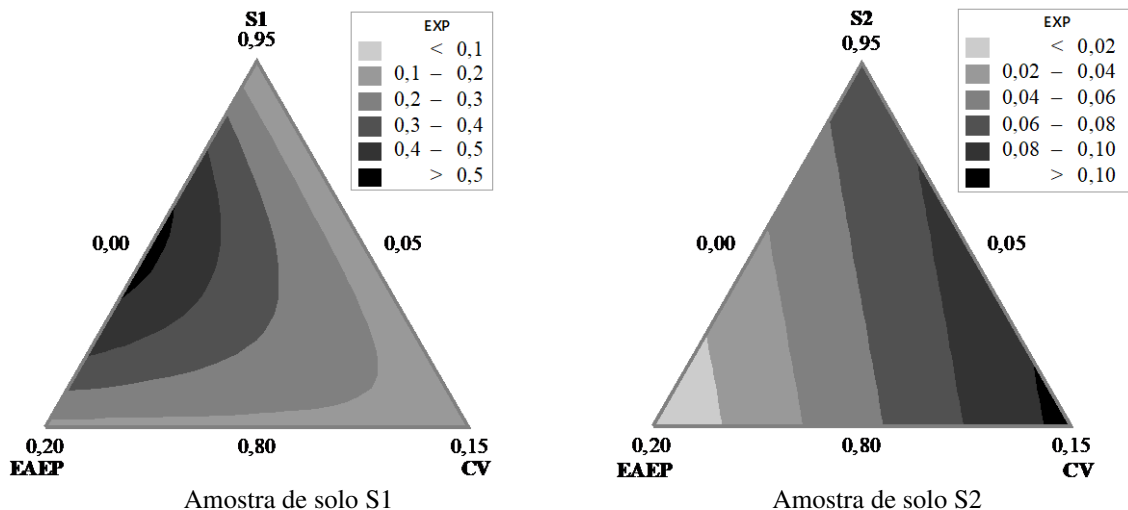


Tabela 16: Equações de regressão referentes aos gráficos de contorno da Expansão

| Amostra de solo | Equação de regressão | R ² | k _m |
|-----------------|---|----------------|----------------|
| S1 | $0,0952.S + 0,1672.EAEP + 0,1819.CV + 1,587.S.EAEP$ | 64,24 | 0,148 |
| S2 | $0,0707.S + 0,0027.EAEP + 0,1067.CV$ | 80,04 | 0,060 |

Em relação ao gráfico de contorno referente às misturas solo-resíduos para a amostra de solo S1, verifica-se que o modelo matemático ajustado através do método *stepwise* é não linear, o que significa que os termos que representam as interações entre os pseudocomponentes são significativos estatisticamente. Observa-se, através da equação, que os componentes da mistura EAEP e CV aumentam o valor da Expansão, visto que seus respectivos coeficientes ($k_2=0,1672$; $k_3=0,1819$) foram superiores à média dos coeficientes dos três componentes individuais ($k_m=0,148$), sendo o componente CV o que contribui de maneira mais significativa. Nota-se que a interação solo S1-EAEP provoca uma tendência de aumento no índice de expansão (sinergismo).

Para a amostra do solo S2, nota-se que o modelo matemático é linear. A equação indica que o solo e a CV geram uma tendência de aumento da Expansão, uma vez que seus respectivos coeficientes ($k_1=0,0707$; $k_3=0,1067$) foram superiores à média ($k_m=0,060$) dos coeficientes dos três componentes individuais.

3.2.4. Determinação da dosagem ótima através da função Desejabilidade

A fim de determinar qual a dosagem ótima para cada amostra de solo, levando em conta a sua aplicação em cada uma das camadas estruturais de pavimento asfáltico consideradas nesta pesquisa, utilizou-se o recurso da função Desejabilidade no *software* Minitab 18. A função Desejabilidade considerou dois conjuntos distintos de propriedades de engenharia visando a determinação da dosagem ótima para as amostras de solo S1 e S2: RCNC, CBR e Expansão, para o conjunto 1; e MR, RTCD e Expansão, para o conjunto 2.

3.2.4.1. Conjunto 1: RCNC, CBR e Expansão

3.2.4.1.1. Amostra de solo S1

A Figura 24 apresenta, para amostra de solo S1 e para o conjunto 1 de propriedades, os respectivos gráficos de otimização e as respectivas dosagens ótimas para as camadas estruturais consideradas nesta pesquisa.

A função Desejabilidade para a amostra do solo S1, para o conjunto 1 de propriedades, apresentou dosagem ótima de 80% de solo e 20% de EAEP (M3) para todos os cenários de camadas estruturais de pavimentos. Os gráficos de contorno da Desejabilidade composta, para

as misturas envolvendo o solo S1, podem ser observados na Figura 25. Eles representam a variação da função Desejabilidade composta de cada mistura solo-resíduos em relação às camadas estruturais de reforço de subleito, sub-base e base. As equações e os coeficientes médios correspondentes são apresentados na Tabela 17.

Figura 24: Gráfico de otimização para o solo S1 – Conjunto 1

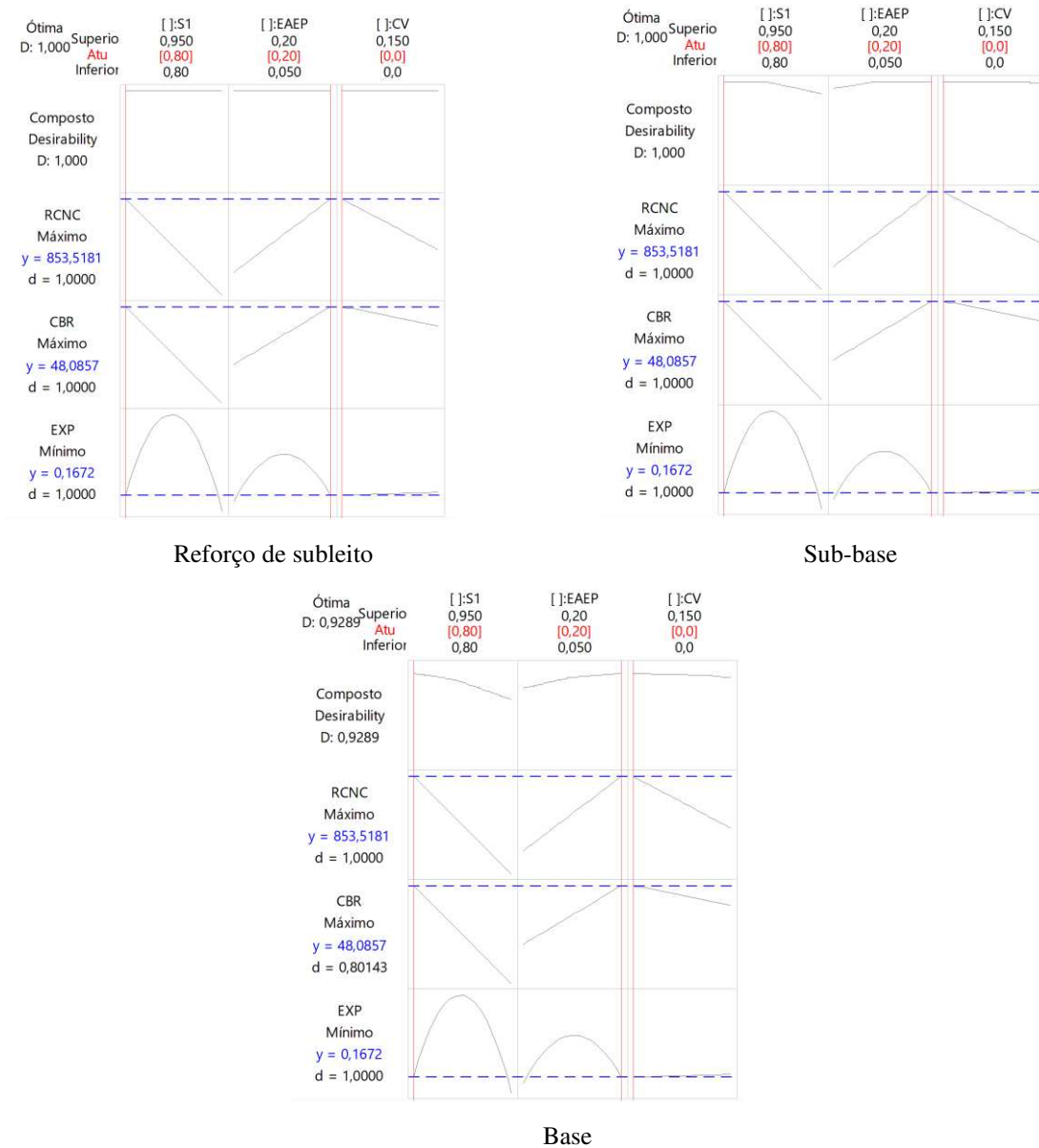


Figura 25: Gráficos de contorno da Desejabilidade composta para a amostra de solo S1 – Conjunto 1

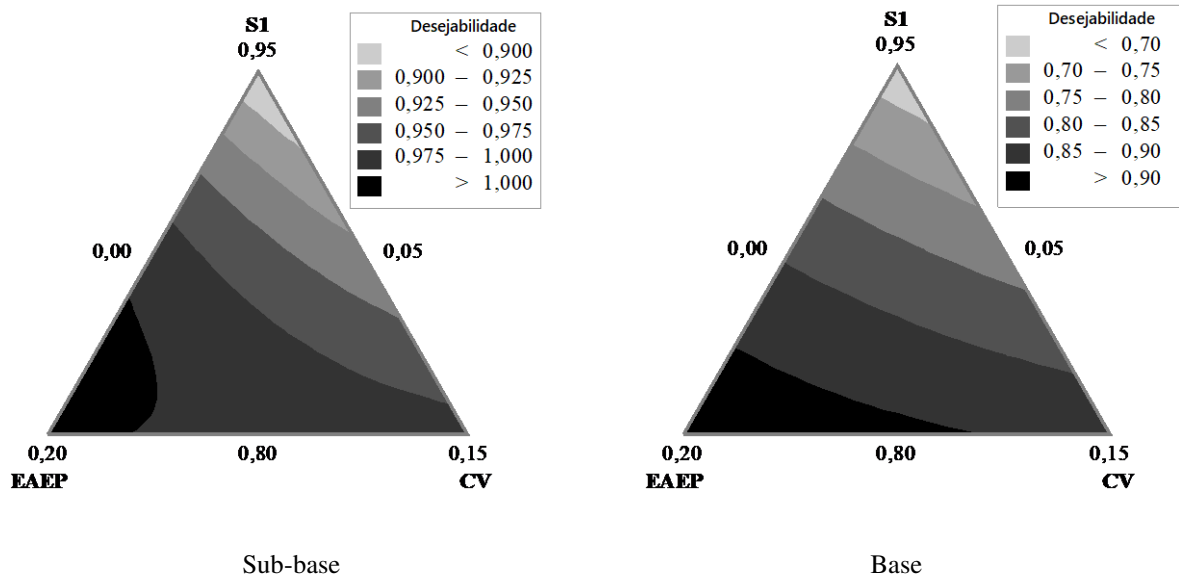


Tabela 17: Equações de regressão referentes à Desejabilidade composta e coeficientes médios (k_m) da amostra S1 para o conjunto 1 de propriedades

| Camada | Equação de regressão | R ² | k_m |
|------------------|--|----------------|-------|
| Reforço subleito | - | - | - |
| Sub-base | $0,877.S + 1,00.EAEP + 0,984.CV + 0,19.S.EAEP$ | 98,92 | 0,954 |
| Base | $0,665.S + 0,932.EAEP + 0,886.CV + 0,172.S.EAEP$ | 99,76 | 0,828 |

Observou-se, para as misturas solo-resíduos da amostra de solo S1 otimizadas para o conjunto 1 de propriedades, através dos gráficos de contorno (Figura 25) e reforçado pelo gráfico de otimização (Figura 24), que a Desejabilidade composta alcançou o valor unitário (ou seja, valor igual a 1,0) para a camada de reforço de subleito e sub-base. A equação de regressão da desejabilidade na camada do reforço de subleito não foi fornecida pelo *software* Minitab 18, uma vez que todas as misturas apresentaram desejabilidades compostas iguais a 1,0.

Analisando os coeficientes das equações de regressão sem interação (Tabela 17), notou-se, para as camadas de base e sub-base, que as componentes EAEP ($k_2 > k_m$) e CV ($k_3 > k_m$) são as que estatisticamente contribuem com esta tendência.

Verificou-se, através dos gráficos de otimização e de contorno, respectivamente, Figura 24 e Figura 25, a tendência de redução da Desejabilidade composta da camada de reforço de subleito para a camada de base do pavimento, o que está de acordo com a maior exigência das camadas superiores em relação às camadas inferiores do pavimento, traduzida pelas maiores

magnitudes das propriedades RCNC, RTCD, MR e CBR e pela menor magnitude da Expansão para as camadas mais nobres.

Verificou-se que os modelos matemáticos ajustados através do método *stepwise* são não lineares (base e sub-base), o que significa que os termos que representam as interações entre os pseudocomponentes são significativos estatisticamente. Pode-se notar, pelas equações, que há um sinergismo na Desejabilidade das propriedades quando há interação solo-EAEP em todas camadas analisadas, identificado pelos valores positivos dos coeficientes k_{12} multiplicativos de S.EAEP.

3.2.4.1.2. Amostra de solo S2

A Figura 26 apresenta os respectivos gráficos de otimização resultantes da ferramenta de otimização de resposta do Minitab 18 associada à função Desejabilidade, os quais indicam, para a amostra de solo S2 e para o conjunto 1 de propriedades, as respectivas dosagens ótimas para as camadas estruturais consideradas nesta pesquisa.

A função Desejabilidade para a amostra do solo S2, para o conjunto 1 de propriedades, apontou como dosagem ótima a mistura contendo 80% da amostra de solo e 20% de EAEP (M3) para todos os cenários de camadas estruturais. Os gráficos de contorno da Desejabilidade composta, para as misturas envolvendo o solo S2, podem ser observados na Figura 27, e as equações e os coeficientes médios correspondentes são apresentados na Tabela 18.

Figura 26: Gráfico de otimização para o solo S2 – Conjunto 1

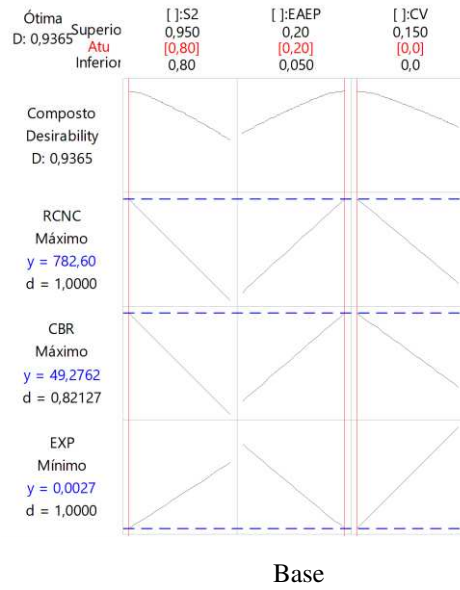
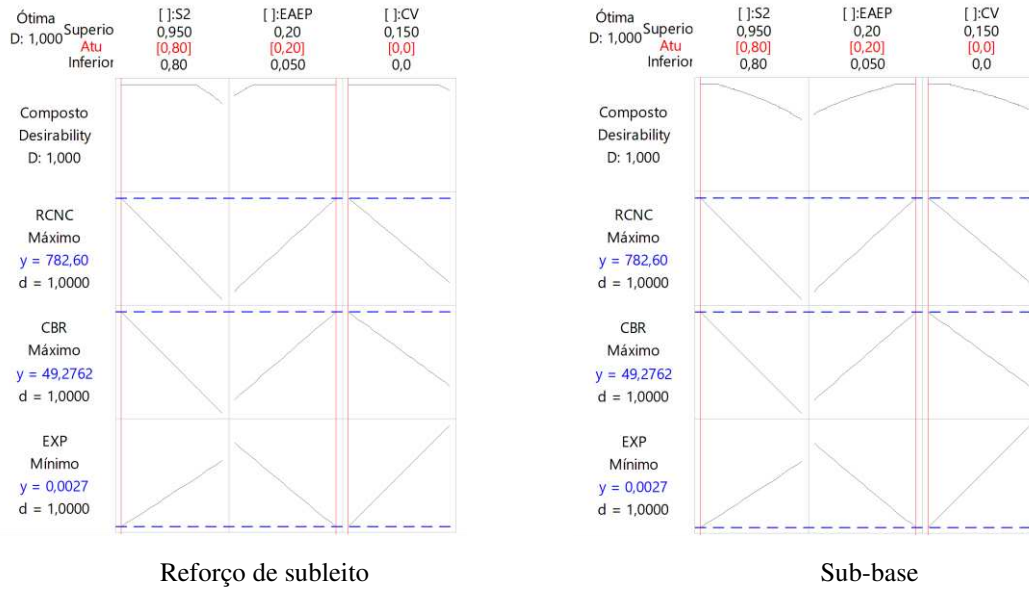
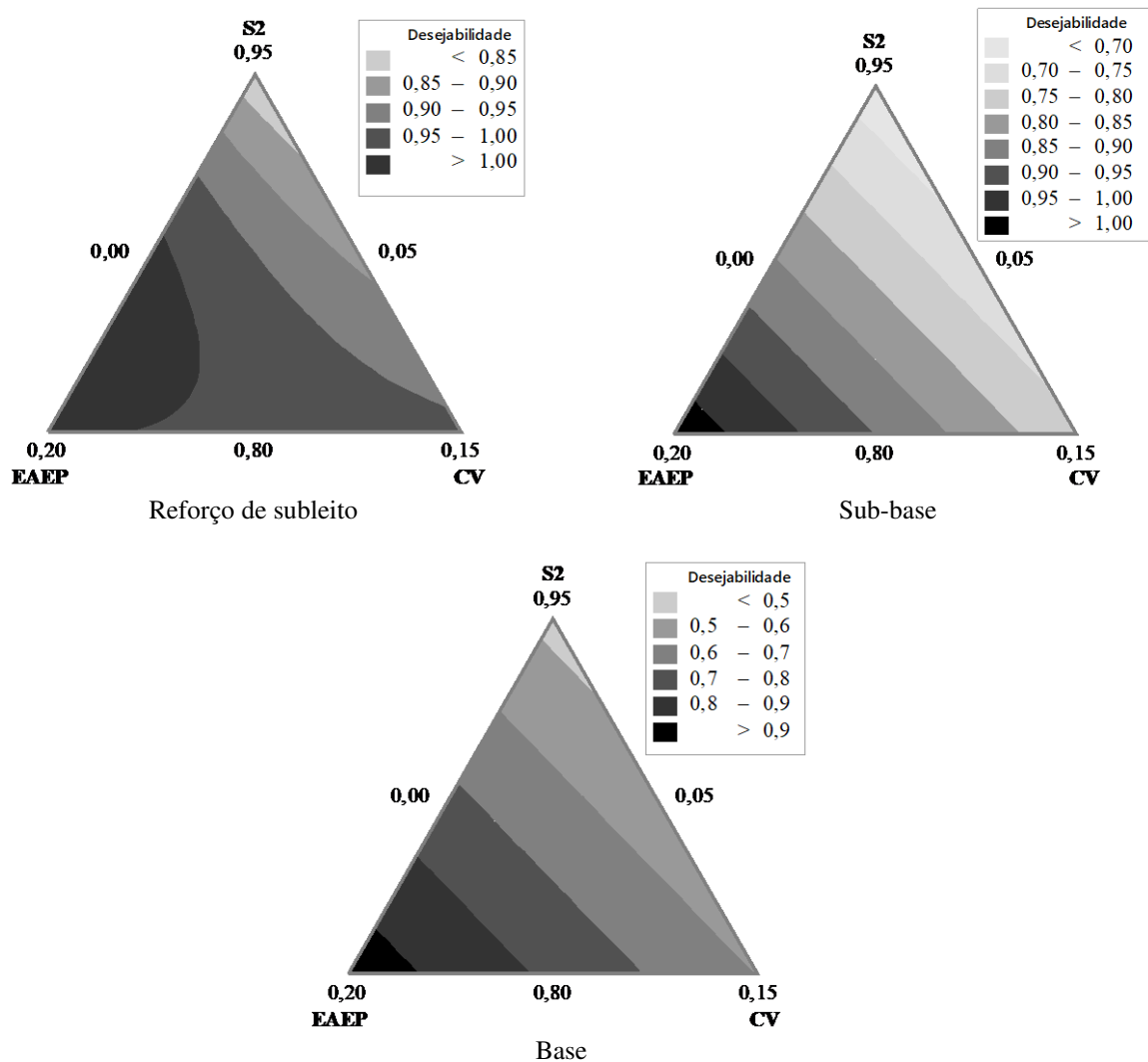


Figura 27: Gráficos de contorno da Desejabilidade composta para a amostra de solo S2 – Conjunto 1

Tabela 18: Equações de regressão referentes à Desejabilidade composta e coeficientes médios (k_m) da amostra S2 para o conjunto 1 de propriedades

| Camada | Equação de regressão | R ² | k_m |
|------------------|---|----------------|-------|
| Reforço subleito | $0,817.S + 1,011.EAEP + 0,96.CV + 0,394.S.EAEP$ | 95,50 | 0,929 |
| Sub-base | $0,668.S + 1,037.EAEP + 0,762.CV$ | 95,34 | 0,822 |
| Base | $0,472.S + 0,964.EAEP + 0,597.CV$ | 98,53 | 0,678 |

Notou-se que as respectivas Desejabilidades compostas para as camadas de reforço de subleito e de sub-base alcançam o valor unitário quando a dosagem se aproxima do máximo valor de EAEP. Entretanto, o valor unitário de Desejabilidade composta não foi alcançado na análise para a camada de base, indicando que, para essa camada, a mistura ótima não foi capaz de atender simultaneamente aos valores limites prescritos para as propriedades consideradas no método de otimização.

Analisando os coeficientes das equações de regressão sem interação (Tabela 18), notou-se, para a camada de reforço de subleito, que a EAEP e a CV são os componentes que geram estatisticamente uma tendência de aumento da Desejabilidade composta ($k_2 > k_m$; $k_3 > k_m$). Para as camadas de base e sub-base, a componente EAEP ($k_2 > k_m$) é a única que estatisticamente contribui com esta tendência.

Verificou-se, através dos gráficos de otimização e de contorno, respectivamente, Figura 26 e Figura 27, a tendência de decréscimo da Desejabilidade composta da camada de reforço do subleito para a camada de base do pavimento, o que está em concordância com o maior nível de exigência das camadas mais nobres em relação às camadas menos nobres do pavimento.

Para a camada de reforço de subleito, verifica-se que o modelo matemático ajustado através do método *stepwise* é não linear, o que significa que os termos que representam as interações entre os pseudocomponentes são significativos estatisticamente. Em contrapartida, as respectivas Desejabilidades compostas das camadas de sub-base e base se enquadram em modelos matemáticos lineares. Pode-se notar, pela equação de regressão correspondente à camada de reforço de subleito, que há um sinergismo na interação solo-EAEP, identificado pelo valor positivo do coeficiente k_{12} multiplicativo de S.EAEP.

3.2.4.1.3. Considerações gerais

A Tabela 19 apresenta os valores de Desejabilidades individual e composta obtidos para as misturas ótimas referentes às camadas estruturais e às amostras de solo S1 e S2, para o conjunto 1 de propriedades. Os valores de Desejabilidade individual foram obtidos pela comparação entre o valor de cada propriedade obtido pela aplicação do modelo matemático do gráfico de contorno e o valor limite aceitável para que o material possa ser utilizado em cada camada estrutural do pavimento. Os valores de Desejabilidade composta foram determinados através da média geométrica dos valores das Desejabilidades individuais.

Tabela 19: Valores de Desejabilidades individual e composta referentes às misturas ótimas para as propriedades analisadas para o conjunto 1

| Propriedade | Desejabilidade individual | | | | | |
|-------------------------|---------------------------|----------------|------------|---------------|----------------|------------|
| | S1 | | | S2 | | |
| | Reforço M3 | Sub-base M3 | Base M3 | Reforço M3 | Sub-base M3 | Base M3 |
| RCNC (kPa) | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| CBR (%) | 1,00 | 1,00 | 0,80 | 1,00 | 1,00 | 0,82 |
| Expansão (%) | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Desejabilidade composta | 1,00 | 1,00 | 0,93 | 1,00 | 1,00 | 0,94 |

As misturas ótimas da amostra de solo S1, considerando as camadas de reforço do subleito e de sub-base (M3), apresentaram valores de Desejabilidade individual iguais a 1,00 para a RCNC, CBR e Expansão, o que significa que a mistura atendeu aos valores limites aceitáveis de acordo com as normas técnicas. Para a mistura ótima da amostra de solo S1, considerando a camada de base (M3), observou-se que apenas o índice CBR não foi superior ao valor limite aceitável para que a mistura possa ser utilizada como camada de base, sendo o valor de CBR correspondente a 80% do valor limite prescrito pela normativa técnica.

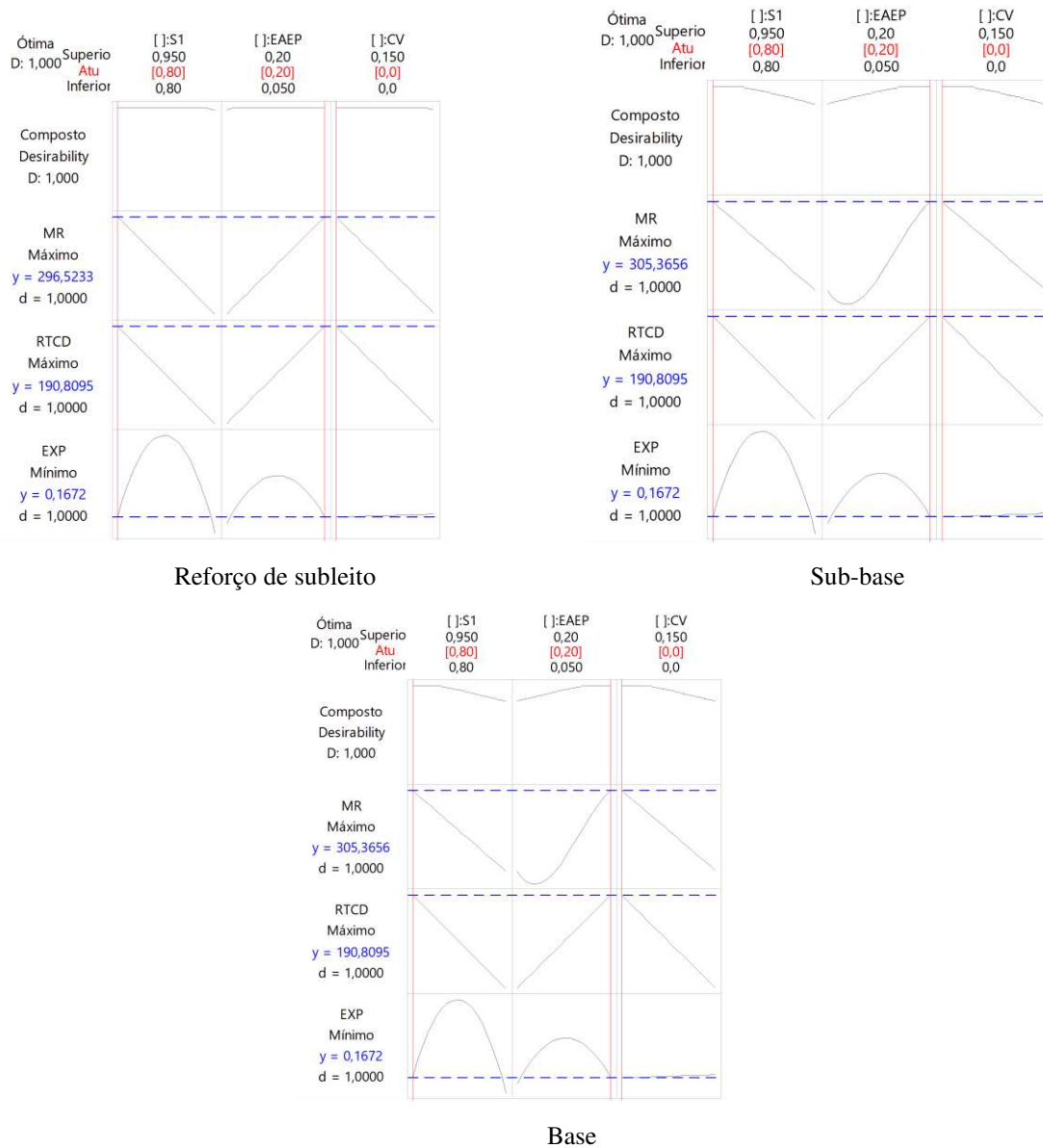
Analisando as misturas ótimas da amostra de solo S2 (M3) para as camadas de reforço de subleito e de sub-base, notou-se que valores de Desejabilidade individual iguais a 1,00 foram atingidos para a RCNC, CBR e Expansão, o que significa que as misturas atenderam a todos os valores limites aceitáveis de acordo com as normas técnicas, resultando em Desejabilidades compostas também iguais a 1,00 para tais camadas estruturais. Quanto à mistura ótima para a camada de base, observa-se que o índice RCNC e a Expansão atenderam aos seus respectivos limites, sendo o valor de CBR correspondente a 82% do valor limite prescrito pela normativa técnica.

3.2.4.2. Conjunto 2: MR, RTCD e Expansão

3.2.4.2.1. Amostra de solo S1

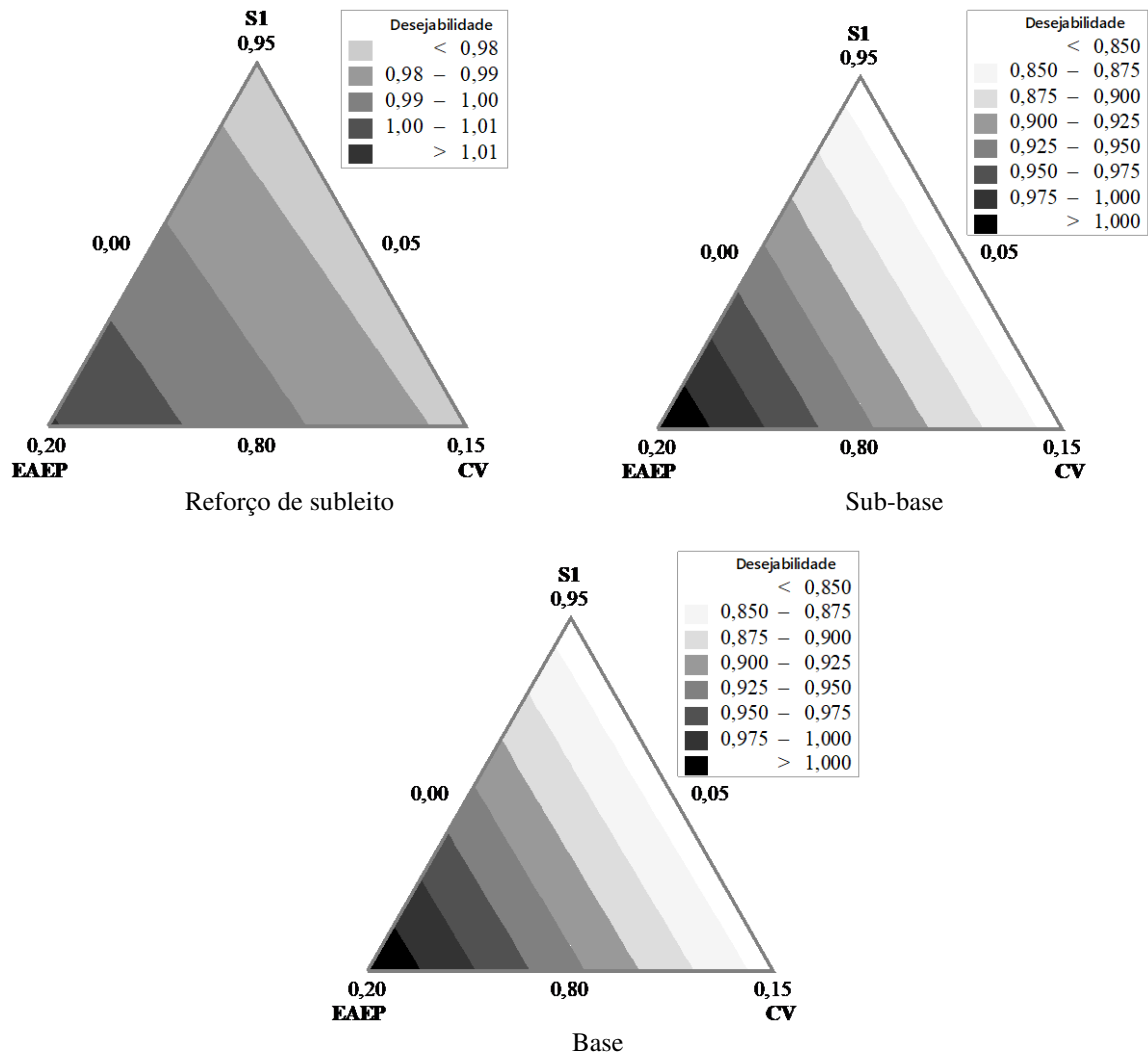
A Figura 28 apresenta os respectivos gráficos de otimização resultantes da ferramenta de otimização de resposta do Minitab 18 associada à função Desejabilidade, os quais indicam, para a amostra de solo S1 e para o conjunto 2 de propriedades, as respectivas dosagens ótimas para as camadas estruturais consideradas nesta pesquisa.

Figura 28: Gráficos de otimização para o solo S1 – Conjunto 2



A função de Desejabilidade para a amostra do solo S1, para o conjunto 2 de propriedades, apresentou dosagem ótima de 80% de solo e 20% de EAEP (M3) para todas as camadas de pavimento. Os gráficos de contorno da Desejabilidade composta, para as misturas envolvendo o solo S1, podem ser observados na Figura 29, e as equações correspondentes são apresentadas na Tabela 20.

Figura 29: Gráficos de contorno da Desejabilidade composta para a amostra de solo S1 – Conjunto 2

Tabela 20: Equações de regressão referentes à Desejabilidade composta e coeficientes médios (k_m) da amostra S1 para o conjunto 2 de propriedades

| Camada | Equação de regressão | R ² | k_m |
|------------------|-----------------------------------|----------------|-------|
| Reforço subleito | $0,974.S + 1,011.EAEP + 0,977.CV$ | 70,06 | 0,987 |
| Sub-base | $0,835.S + 1,025.EAEP + 0,839.CV$ | 94,04 | 0,838 |
| Base | $0,835.S + 1,025.EAEP + 0,839.CV$ | 94,04 | 0,900 |

Observou-se, para as misturas solo-resíduos da amostra de solo S1 otimizadas pelo conjunto 2, através dos gráficos de contorno (Figura 29) e reforçado pelo gráfico de otimização (Figura 28), que a Desejabilidade composta alcança o valor unitário igual a 1,0 em todos pontos da rede Simplex.

Analisando os coeficientes das equações de regressão sem interação (Tabela 20), notou-se, para as camadas de reforço de subleito e de base, que a EAEP é o único componente que gera estatisticamente uma tendência de aumento da Desejabilidade composta ($k_2 > k_m$). Para a camada de sub-base, os componentes EAEP e CV são os que geram estatisticamente uma tendência de aumento da Desejabilidade composta ($k_2 > k_m$; $k_3 > k_m$).

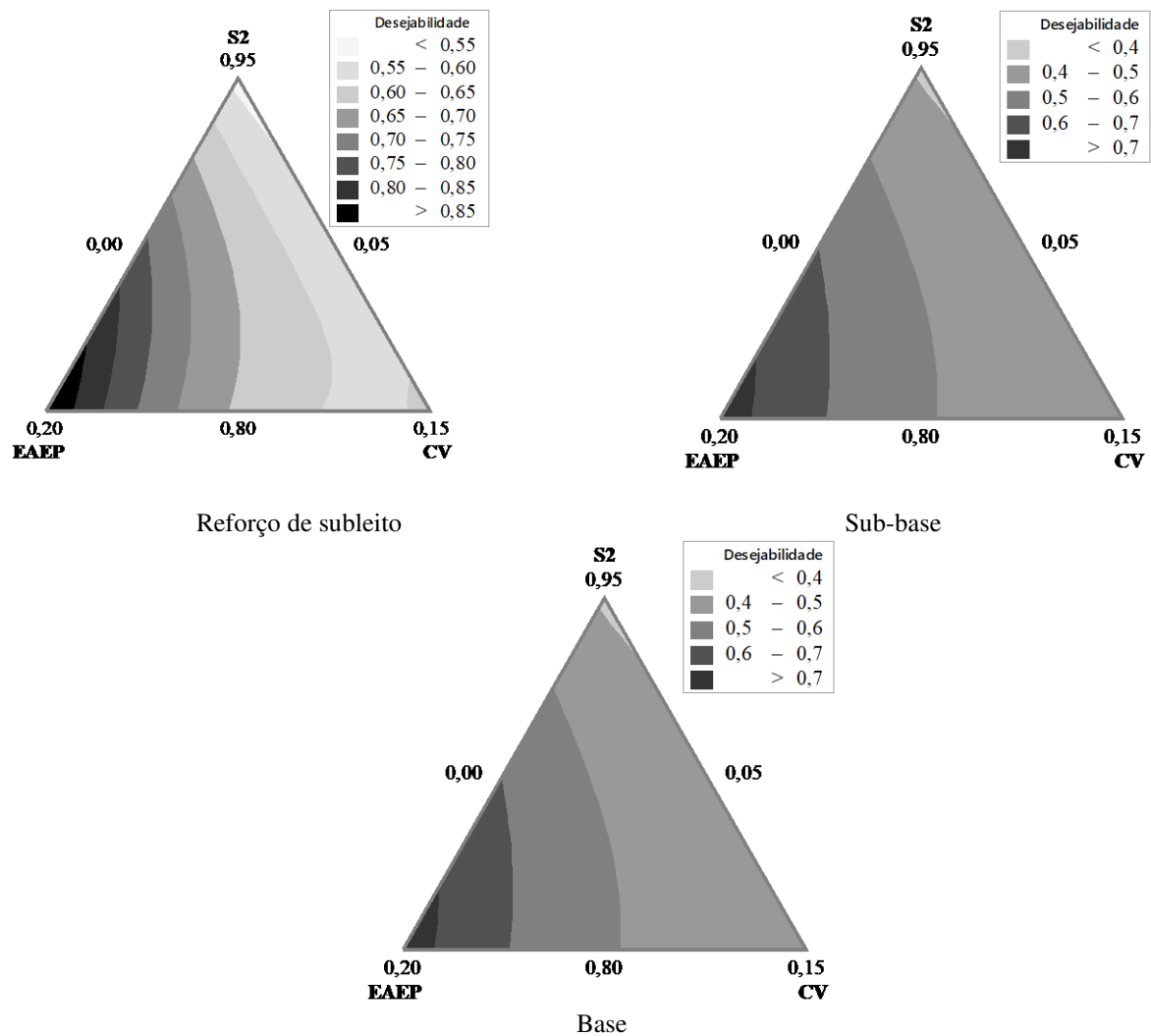
Verificou-se, através dos gráficos de otimização e de contorno, respectivamente, Figura 28 e Figura 29, a tendência de redução da Desejabilidade composta da camada de reforço do subleito para a camada de base do pavimento, o que está em concordância com o maior nível de exigência das camadas mais nobres em relação às camadas menos nobres do pavimento.

Verifica-se que os modelos matemáticos ajustados através do método *stepwise* são lineares para as camadas estruturais, o que significa que os termos que representam as interações entre os pseudocomponentes não são significativos estatisticamente.

3.2.4.2.2. Amostra de solo S2

A Figura 30 apresenta os respectivos gráficos de otimização resultantes da ferramenta de otimização de resposta do Minitab 18 associada à função Desejabilidade, os quais indicam, para a amostra de solo S2 e para o conjunto 2 de propriedades, as respectivas dosagens ótimas para as camadas estruturais consideradas nesta pesquisa.

Figura 31: Gráficos de contorno da Desejabilidade composta para a amostra de solo S2 – Conjunto 2

Tabela 21: Equações de regressão referentes à Desejabilidade composta e coeficientes médios (k_m) da amostra S2 para o conjunto 2 de propriedades

| Camada | Equação de regressão | R ² | k_m |
|------------------|--|----------------|-------|
| Reforço subleito | $0,534.S + 0,899.EAEP + 0,607.CV + 0,173.S.EAEP - 0,445.EAEP.CV$ | 100 | 0,680 |
| Sub-base | $0,387.S + 0,75.EAEP + 0,457.CV + 0,108.S.EAEP - 0,370.EAEP.CV$ | 100 | 0,531 |
| Base | $0,387.S + 0,75.EAEP + 0,457.CV + 0,108.S.EAEP - 0,370.EAEP.CV$ | 100 | 0,531 |

Notou-se, para as misturas solo-resíduos da amostra de solo S2 e para o conjunto 2 de propriedades, que a Desejabilidade composta para todas camadas analisadas não alcança o valor unitário.

Analisando os coeficientes das equações de regressão sem interação (Tabela 21), notou-se, para todas as camadas estruturais, que a EAEP é o único componente que gera estatisticamente uma tendência de aumento da Desejabilidade composta ($k_2 > k_m$).

Verificou-se, através dos gráficos de otimização e de contorno, respectivamente, Figura 30 e Figura 31, a tendência de decréscimo da Desejabilidade composta da camada de reforço do subleito para a camada de base do pavimento, o que está em concordância com o maior nível de exigência das camadas mais nobres em relação às camadas menos nobres do pavimento.

Para as camadas estruturais de pavimento analisadas, verifica-se que os modelos matemáticos ajustados através do método *stepwise* são não lineares, o que significa que os termos que representam as interações entre os pseudocomponentes são significativos estatisticamente. Pode-se notar, pelas equações de regressão, que há um sinergismo na Desejabilidade das propriedades quando há interação solo-EAEP em todas as camadas analisadas, identificado pelo valor positivo do coeficiente k_{12} multiplicativo de S.EAEP. Em contrapartida, as interações EAEP-CV demonstram antagonismo na Desejabilidade, identificado pelo valor negativo do coeficiente k_{23} multiplicativo de EAEP.CV.

3.2.4.2.3. Considerações gerais

A Tabela 22 apresenta os valores de Desejabilidades individual e composta obtidos para as misturas ótimas referentes às camadas estruturais e às amostras de solo S1 e S2, para o conjunto 2 de propriedades. Os valores de Desejabilidade individual foram obtidos pela comparação entre o valor obtido pela aplicação do modelo matemático do gráfico de contorno de cada propriedade e o valor limite aceitável para que o material possa ser utilizado em cada camada estrutural do pavimento. Os valores de Desejabilidade composta foram determinados através da média geométrica dos valores das Desejabilidades individuais.

Tabela 22: Valores de Desejabilidades individual e composta referentes às misturas ótimas para as propriedades analisadas para o conjunto 2

| Propriedade | Desejabilidade individual | | | | | |
|-------------------------|---------------------------|----------------|------------|---------------|----------------|------------|
| | S1 | | | S2 | | |
| | Reforço M3 | Sub-base M3 | Base M3 | Reforço M3 | Sub-base M3 | Base M3 |
| MR (MPa) | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,93 | 0,93 |
| RTCD (kPa) | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,73 | 0,45 | 0,45 |
| Expansão (%) | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Desejabilidade composta | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,90 | 0,75 | 0,75 |

As misturas ótimas da amostra de solo S1 (M3), considerando as camadas de reforço do subleito, sub-base e base, apresentaram valores de Desejabilidade individual iguais a 1,00 para todas as propriedades analisadas, o que significa que as misturas atenderam aos valores limites aceitáveis prescritos pelas normas técnicas.

Analisando a mistura ótima da amostra de solo S2 (M3) para a camada de reforço de subleito, notou-se que valores de Desejabilidade individual iguais a 1,00 foram atingidos para o MR e a Expansão, ou seja, a mistura ótima atendeu ao valor limite aceitável prescrito pelas normas técnicas. A RTCD apresentou uma Desejabilidade individual de 73% do valor limite prescrito pelas normativas técnicas.

Quanto às misturas ótimas para as camadas de sub-base e base (M3), notou-se que os valores de Desejabilidades individual e composta são semelhantes, como observado na Tabela 22, sendo que somente a Expansão alcança o valor igual a 1,0 para a Desejabilidade individual.

4. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados desta pesquisa, as principais conclusões foram que:

- O trabalho atende ao seu objetivo principal de propor e testar um protocolo de dosagem de misturas solo-resíduos siderúrgicos baseado no modelo estatístico de planejamento experimental de misturas em rede Simplex-Centróide, constituindo, assim, uma efetiva contribuição técnico-científica no âmbito da dosagem de misturas similares destinadas aos projetos de obras de terra, tais como os de pavimentação;
- O objetivo secundário da pesquisa também foi atendido, visto que, pela aplicação do protocolo de dosagem proposto, foi possível definir, para as variáveis envolvidas na dosagem (tipos de solo, tipos de camadas estruturais de pavimento e tipos de propriedades de otimização) misturas solo-resíduos siderúrgicos dotadas de propriedades de engenharia otimizadas;
- Para os dois conjuntos de propriedades de engenharia adotados no protocolo de otimização, o conjunto 1 (RCNC, CBR e Expansão) implicou em maiores valores de Desejabilidade individual e, conseqüentemente, de Desejabilidade composta das misturas ótimas. Para o conjunto 2 (MR, RTCD e Expansão), as menores Desejabilidades individuais corresponderam à propriedade RTCD, com subsequente impacto sobre a Desejabilidade composta que tende a ser reduzida, afastando-se do valor unitário. Assim, para as particularidades da presente pesquisa, conclui-se que o conjunto 1 de propriedades de otimização apresentou-se como científica e tecnicamente mais adequado para o protocolo de dosagem proposto;
- Apesar dos melhores valores de Desejabilidade correspondentes ao conjunto 1 de propriedades de otimização (RCNC, CBR e Expansão), ressalta-se que a propriedade MR do conjunto 2 apresentou valores elevados de Desejabilidade individual, o que pode legitimar o seu emprego como propriedade de otimização;

- A pesquisa confirma as constatações experimentais de outros trabalhos que apontam para a perspectiva de melhoria das propriedades de engenharia de solos estabilizados por EAEP e CV, reforçando as viabilidades técnica e ambiental relacionadas ao emprego destes resíduos siderúrgicos em obras de terra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, Y. M. Simplex-lattice strength and permeability optimization of concrete incorporating silica fume and natural pozzolan. **Construction and Building Materials**, v.168, pp. 199–208, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.144>.

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

AKINWUMI, I. Soil Modification by the Application of Steel Slag. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v.58 (4), pp. 371–377, 2014. <https://doi.org/10.3311/PPci.7239>.

AL-AMOUDI, O. S. B.; AL-HOMIDY, A. A.; MASLEHUDDIN, M.; SALEH, T. A. Method and Mechanisms of Soil Stabilization Using Electric Arc Furnace Dust. **Scientific Reports**, 7, n. 1, p. 46676, 2017/04/28 2017.

ALDEEKY, H.; AL HATTAMLEH, O. Experimental study on the utilization of fine steel slag on stabilizing high plastic subgrade soil. **Advances in Civil Engineering**, 11p., 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9230279>.

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

AL-MUKHTAR, M.; KHATTAB, S.; ALCOVER, J.-F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. **Engineering Geology**, v. 139–140, p. 17–27, jun. 2012.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 145-91: Standard Specification for Classification of Soils and Soil Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes**. Washington, 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 220-66: Determination of the Strength of Soil-Lime mixtures**. Washington, 2018.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice**. 3rd ed. [Washington D.C.]: American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, 2020. 978-1-56051-748-1.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5982-15, Standard Test Method for Determining Cement Content of Fresh Soil-Cement (Heat of Neutralization Method)**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. www.astm.org.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2487-17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**. Pensilvânia ASTM International, 2017.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM C618-19, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019a. www.astm.org.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6276-19, Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019b. www.astm.org.

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

ARRIBAS, I.; VEGAS, I.; SAN-JOSE, J. T.; MANSO, J. M. Durability studies on steelmaking slag concretes. **Materials and Design**, v.63, pp.168-176, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.002>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004a.

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11579: Cimento Portland – determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. Rio de Janeiro. 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 18: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro. 2012c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 13: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol**. Rio de Janeiro. 2012d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 15: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel**. Rio de Janeiro. 2012e.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12023: Solo-cimento — Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro. 2012g.

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

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

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro. 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181: Solo - análise granulométrica**. Rio de Janeiro. 2016b.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2016e, 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182: Solo - ensaio de compactação.** Rio de Janeiro. 2016f.

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

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

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

AZEVEDO, A.; ALEXANDRE, J.; MARVILA, M.; ZANELATO, E.; XAVIER, G.; CERQUEIRA, N.; SOUZA, V.; LIMA, T.; MONTEIRO, S. Evaluation of Technological Properties of Soil-Cement Blocks Using Experimental Design of Mixtures. In: Li B. et al. (eds) Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2019. **The Minerals, Metals & Materials Series**. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05749-7_64.

AZEVEDO, A.; ALEXANDRE, J.; ZANELATO, E.; MARVILA, M.; PEDROTI, L.; XAVIER, G.; SANTOS, D.; MONTEIRO, S.; PEIXOTO, M. Characterization of Different Clays for the Optimization of Mixtures for the Production of Ceramic Artifacts. In: Li B. et al. (eds) Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2018. TMS 2018. **The Minerals, Metals & Materials Series**. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72484-3_31.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** 4ª ed. Porto Alegre, Bookman, 2010.

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

BISKRI, Y.; ACHOURA, D.; CHELGHOUM, N.; MOURET, M. Mechanical and durability characteristics of High-Performance Concrete containing steel slag and crystalized slag as aggregates. **Construction and Building Materials**, v.150, pp.167-178, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.083>.

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

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

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

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 mai. 2021, seção 1, ed.58, p. 127

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

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

DEEPAK, M.S.; ROHINI, S.; HARINI, B.S.; ANANTHI, G.B.G. Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil. **Materials Today: Proceedings**, v. 37, Part 2, 2021, p. 2014-2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.497>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 003/94: Coleta de Amostras Deformadas de Solos**. Rio de Janeiro. 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 181/94: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro. 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER CLA259/96: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura**. Rio de Janeiro. 1996a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 199/96: Redução de amostras de campo de agregados para ensaio de laboratório**. Rio de Janeiro. 1996b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 274 p. 2006.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ME 181/2018: Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2018b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ME 419/2019: Pavimentação – Solo-Cal – Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2019.

DINIZ, D. H.; CARVALHO, J. M. F. D.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.29 (9), 7p., 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943- 5533.0001969.

DUCMAN, V.; MLADENOVIČ, A. The potential use of steel slag in refractory concrete. **Materials Characterization**, 2011v. 62(7), pp. 716-723, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matchar..04.016>.

EADES, J. L.; GRIM, R. E.. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. **Highway Research Board**, v. 139, pp. 61-72, 1966.

FALESCHINI, F.; BRUNELLI, K.; ZANINI, M. A.; DABALÀ, M.; PELLEGRINO, C. Electric arc furnace slag as coarse recycled aggregate for concrete production. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v.2, p. 44-50, 2016. DOI 10.1007/s40831-015-0029-1.

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

FIROOZI, A.A.; GUNEY OLGUN, C.; FIROOZI, A.A.; BAGHINI, M.S. Fundamentos da estabilização do solo. **Geo-Engenharia** 8, 26 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>

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

GRAFFITTI, D. F. **Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica**. 2002. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio

Grande so Sul, Porto Alegre, 2002.

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, pp. 102-108, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.172>.

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

GUPTA, T.; SACHDEVA, S. N. Laboratory investigation and modeling of concrete pavements containing AOD steel slag. **Cement and Concrete Research**, v. 124, 11p., 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105808>.

HE, P.; ZHANG, B.; LU, J.; POON, C. S. A ternary optimization of alkali-activated cement mortars incorporating glass powder, slag and calcium aluminate cement. **Construction and Building Materials**, v.240, 9p., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117983>.

HUSSIEN, A. M.; MURAD, M. A. S.; NAJIM, H. Y. Optimal Production Of Bra Block Factory By Using Simplex Method. **Academic Journal of Nawroz University**, v.7(3), pp.10-16, 2018. DOI: 10.25007/ajnu.v7n3a195.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Anuário Estatístico**. Rio de Janeiro-RJ: Instituto Aço Brasil, 2022, 88p.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Relatório de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro - RJ: Instituto Aço Brasil. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>, 2020. Acesso em: 05 jan. de 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320:20040: Particles size analysis-laser diffraction methods**, Ed.1, n.9, 51p., 2020.

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

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

JANZ, M.; JOHANSSON, S. E. (2002). The function of different binding agents in deep stabilization. Linköping (Sweden): **9th Report of Swedish Deep Stabilization Research Centre**.

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

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

KAMPIOTI, A.; KOMILIS, D. Anaerobic co-digestion of coffee waste with other organic substrates: A mixture experimental design. **Chemosphere**, v. 297, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134124>.

KARTHIK, S.; ASHOK, E.; GOWTHAM, P.; ELANGO, G.; GOKUL, D.; THANGARAJ, S. 2014. Soil stabilization by using fly ash. **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v.10 (6), pp.20-26. DOI:10.9790/1684-1062026.

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

LI, C.; CHEN, Z.; WU, S.; LI, B.; XIE, J.; XIAO, Y. Effects of steel slag fillers on the rheological properties of asphalt mastic. **Construction and Building Materials**, v.145, pp.383-391. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.034>.

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

LIMA, N.; NASCIMENTO, J.; VAL FILHO, V.; ALBERNAZ, C. Pavimentos de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria. **In: 10a Reunião Annual de Pavimentação Urbana**, Uberlândia-MG, 2000.

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

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

MAGHOOL, F.; ARULRAJAH, A.; DU, Y.; HORPIBULSUK, S.; CHINKULKIJNIWAT, S. Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v.19, pp.949-958, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1289-6>.

MAGHOOL, F.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.; DU, Y.-J., 2016, **geotechnical properties of ladle furnace slag in roadwork applications**.

MAHEDI, M.; CETIN, B.; DAYIOGLU, A. Y. Leaching behavior of aluminum, copper, iron and zinc from cement activated fly ash and slag stabilized soils. **Waste Management**, v. 95, pp. 334-355, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.018>.

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

MANSO, J. M.; ORTEGA-LOPEZ, V.; POLANCO, J. A.; SETIÉN, J. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 40, pp. 126–134, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.079>.

MARINHO, A. L. B.; SANTOS, C.M.M.; CARVALHO, J.M.F.; MENDES, J.C.; BRIGOLINI, G.J.; PEIXOTO R. A. F. Ladle Furnace Slag as Binder for Cement-Based Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.29 (11), 12p., 2017. DOI: 10.1061/(ASCE) MT.1943-5533.0002061.

MARVILA, M.; AZEVEDO, A.; ALEXANDRE, J.; ZANELATO, E.; MONTEIRO, S.; CERQUEIRA, N. Proposal of Dosing of Mortars Using Simplex Network. In: Li B. et al. (eds), Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2019. **The Minerals, Metals & Materials Series**. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05749-7_75.

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

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

MEDEIROS, V. S. C.; PEDROTI, L. G.; MENDES, B. C.; PITANGA, H. N. et al. Study of mixtures using simplex design for the addition of chamotte in clay bricks. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, 16, n. 6, p. 2349-2361, 2019. <https://doi.org/10.1111/ijac.13346>.

MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, J. C. L.; VIEIRA, C. M. F.; PACHECO, A.A.; AZEVEDO, A. R. G. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. **Construction and Building Materials**, v.227, 13p., 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.050>.

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

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

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

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

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

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

NAIDU, T.S; SHERIDAN, C.M.; DYK, L.D. Basic oxygen furnace slag: Review of current and potential uses. **Minerals Engineering**, v. 149, 18p., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106234>.

NGUM, B. K.; MOHAMED, H.; KATSUMATA, K.; OKADA, K.; AHMAD, Z.A. Using design of mixture experiments to optimize triaxial ceramic tile compositions incorporating Cambodian clays. **Applied Clay Science**, v. 87, p.97-107, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.11.037>.

OKONKWO, U.; AGUNWAMBA, J. Classical Optimization of bagasse ash content in cement-stabilized lateritic soil. **Nigerian Journal of Technology**, v.35 (3), pp.481-490, 2016. <http://dx.doi.org/10.4314/njt.v35i3.3>.

OLUOKUN, F. A. Prediction of Concrete Tensile Strength from Its Compressive Strength: Evaluation of Existing Relations for Normal Weight Concrete. **ACI Materials Journal**. May-June 1991. pp. 302- 309.

OLUWASOLA, E. A.; HAININ, M. R.; AZIZ, M. M. A. Comparative evaluation of dense-graded and gap-graded asphalt mix incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings. **Journal of Cleaner Production**, v.122, pp.315-325, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.051>.

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

ONYELOWE, K. C.; ALANEME, G.; VAN, D. B.; VAN, M. N.; EZUGWU, C.; AMHADI, T.; SOSA, F.; ORJI, F.; UGORJI, B. Generalized Review on EVD and Constraints Simplex Method of Materials Properties Optimization for Civil Engineering. **Civil Engineering Journal**, v.5(3), pp.729-749. 2019a. DOI: 10.28991/cej-2019-03091283.

ONYELOWE, K.. Nanostructured waste paper ash treated lateritic soil and its California bearing ratio optimization. **Global Journal of Technology & Optimization**, v.8(2), 6p., 2017. DOI: 10.4172/2229-8711.1000220.

ONYELOWE, K.; ALANEME, G.; IGBOAYAKA, C.; ORJI, F.; UGWUANYI, H.; VAN, D. B.; VAN, M. N. Scheffe optimization of swelling, California bearing ratio, compressive strength, and durability potentials of quarry dust stabilized soft clay soil. **Materials Science for Energy Technologies**, v.2(1), pp.67-77, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.10.005>.

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

OZDEMIR, M. A. Improvement in Bearing Capacity of a Soft Soil by Addition of Fly Ash. **Procedia Engineering**, v.143, pp. 498–505, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.063>.

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

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

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

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

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

PITANGA, H. N.; SILVA, T. O.; SANTOS, A. L.; SILVA, A. C. B.; LIMA, D. C. Classificação MCT de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante compactadas visando a aplicação em estradas florestais. **Revista Arvore**, v.40(5), pp. 911–919, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622016000500015>.

RAPOSO, C.O. (2005) **Estudo experimental de compactação de expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação**. Dissertação de M. Sc, Universidade Federal do Espírito Santo, PPGE/UFES, Engenharia Civil, 164 p., Espírito Santo.

RIBEIRO RODRIGUES, M. H. **Eficácia do método simplex-centroide na dosagem e otimização de misturas de solos-escória de aciaria-cinza volante destinadas à construção de pavimentos**. Dissertação M. Sc., UFV,Viçosa, 2022.

RODRIGUES, K. H. P. **Utilização de resíduos industriais na estabilização de solos tropicais para aplicação em pavimentos**. Tese D. Sc., UFV,Viçosa, 2022.

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

SANTAMARÍA, A.; GONZÁLEZ, J. J.; LOSÁÑEZ, M. M.; SKAF, M.; ORTEGA-LOPEZ, V. The design of self-compacting structural mortar containing steelmaking slags as aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v.111, 10p., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103627>.

SANTAMARÍA, A.; ROJÍ, E.; SKAF, M.; MARCOS, I.; GONZÁLEZ, J. J. The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars. **Construction and Building Materials**, v.106, pp.364-373, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.121>.

SCHEFFÉ, H. The simplex-centroid design for experiments with mixtures. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, v.25(2), pp.235-263, 1963. <https://www.jstor.org/stable/2984294>.

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

SHALABI, F. I.; ASI, I. M.; QASRAWI, H. Y. Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils. **Journal of King Saud University-Engineering Sciences**, v.29(4), pp.394-399, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.07.004>.

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

SHI, C.; WU, Z.; LV, K.; WU, L. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v.84, pp.387-398, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.079>.

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

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

SKAF, M.; ORTEGA-LÓPEZ, V.; FUENTE-ALONSO, J. A.; SANTAMARÍA, A.; MANSO, J. M. Ladle furnace slag in asphalt mixes. **Construction and Building Materials**, v.122, pp.488-495, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.085>.

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

SORLINI, S.; SANZENI, A.; RONDI, L. Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. **Journal of hazardous materials**, v.209-210, pp.84-91, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.066>.

SOUZA, A. T.; CALDAS, R. B.; LUDVIG, P.; SANTOS, W. J. The effects of mixture's components on the mechanical properties and durability indicators of mixed mortar using simplex network method. **Construction and Building Materials**, v. 249, 13p., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118740>.

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

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

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime stabilization: reactions, properties, design, and construction**, State of the Art Report 5, 64p.,1987. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/state-of-the-art/5/5.pdf>.

WANG, G.; WANG, Y.; GAO, Z. Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. **Journal of Hazardous Materials**, v.184(1–3), pp. 555–560, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.071>.

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

XU, B.; YI, Y. Soft clay stabilization using ladle slag-ground granulated blastfurnace slag blend. **Applied Clay Science**, v.178, 6p., 2019. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105136>.

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

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Experimental evaluation of EAF ladle steel slag as a geo-fill material: Mineralogical, physical & mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v.154, pp.23-33, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.149>.

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

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

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

ZUMRAWI, M. M.; BABIKIR, A. A.-A. A. 2017. Laboratory Study of Steel Slag Used for Stabilizing Expansive Soil. **Asian Engineering Review**, v.4(1), pp.1-6. <https://doi.org/10.20448/journal.508.20>.