

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Avaliação de solos tropicais estabilizados por ativação alcalina para uso em pavimentos

Deborah Castro e Almeida
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

DEBORAH CASTRO E ALMEIDA

Avaliação de solos tropicais estabilizados por ativação alcalina para uso em pavimentos

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

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga

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

T

A447a
2026

Almeida, Deborah Castro e, 1995-

Avaliação de solos tropicais estabilizados por ativação
alcalina para uso em pavimentos / Deborah Castro e Almeida. –
Viçosa, MG, 2026.

1 tese eletrônica (203 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2026.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.294>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. 2. Resíduos
industriais. 3. Pavimentação. I. Pitanga, Heraldo Nunes, 1973-
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

CDD 22. ed. 624.151363

DEBORAH CASTRO E ALMEIDA

Avaliação de solos tropicais estabilizados por ativação alcalina para uso em pavimentos

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

APROVADA: 26 de fevereiro de 2026.

Assentimento:

Deborah Castro e Almeida
Autora

Heraldo Nunes Pitanga
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pela autora em 08/06/2026 às 10:43:20 e pelo orientador em 08/06/2026 às 15:07:34. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **RH99.6T80.4GSS** e clique no botão 'Validar documento'.

Ao meu Senhor e Salvador, Jesus Cristo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, acima de tudo, pois creio que todas as bênçãos provêm d'Ele. Reconheço que esta conquista foi concedida por Sua graça, em cada detalhe, concedendo-me capacidade, sabedoria e discernimento.

Agradeço ao Lucas, meu marido e companheiro, que exerce com excelência seu papel de apoiador e incentivador. Nesta etapa, não foi diferente: sou grata por todo o amor, dedicação, compreensão, paciência e cuidado demonstrados ao longo desse período.

Agradeço aos meus pais, Cober e Janaína, por serem meus primeiros professores e por me ensinarem meu bem mais valioso: servir a Jesus Cristo. Muito obrigada! Sem vocês eu não estaria aqui.

Agradeço aos professores Heraldo Nunes Pitanga, Geraldo Luciano de Oliveira Marques e Klaus Henrique de Paula Rodrigues, por todo o apoio técnico, orientação, contribuições, companheirismo e direcionamento ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço aos técnicos Marcelo Sebastião de Souza e Vitor da Silva Cardoso, pelo companheirismo, dedicação e contribuição essencial para a realização das atividades experimentais.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV), por todo o conhecimento transmitido e pela contribuição para minha formação acadêmica e científica.

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de continuar trilhando minha trajetória acadêmica e pelo suporte institucional ao desenvolvimento desta pesquisa.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

E não somente isto, mas também nos gloriamos nas tribulações; sabendo que a tribulação produz a paciência, e a paciência a experiência, e a experiência a esperança.

E a esperança não traz confusão, porquanto o amor de Deus está derramado em nossos corações pelo Espírito Santo que nos foi dado.

Romanos 5:3-5

RESUMO

ALMEIDA, Deborah Castro e, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Avaliação de solos tropicais estabilizados por ativação alcalina para uso em pavimentos.** Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.

O solo é amplamente empregado em obras de engenharia geotécnica e de pavimentação, entretanto é frequente a ocorrência de solos que não apresentam propriedades mecânicas e de durabilidade suficientes para suportar as solicitações de projeto, o que demanda a adoção de técnicas de melhoramento. A estabilização tradicional com cimento, embora tecnicamente eficiente, está associada a elevados impactos ambientais, especialmente em função das emissões de CO e do consumo de recursos naturais, motivando a busca por soluções mais sustentáveis. Nesse contexto, a estabilização por ativação alcalina tem se consolidado como uma alternativa promissora, uma vez que possibilita o aproveitamento de resíduos industriais e a obtenção de materiais com desempenho mecânico compatível às exigências normativas. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica, o desempenho mecânico e o comportamento sob carregamentos cíclicos de solos tropicais estabilizados por ativação alcalina, utilizando cinza volante (CV) e escória de aciaria elétrica primária (EAEP) como precursores e solução de hidróxido de sódio (NaOH) como ativador, visando à aplicação em camadas estruturais de pavimentos. Foram investigados dois solos residuais de naturezas distintas, um predominantemente arenoso (VS) e outro predominantemente argiloso (BR). Inicialmente, realizou-se a otimização estatística multivariável das dosagens por meio de planejamento experimental do tipo Box–Behnken, considerando simultaneamente a resistência à compressão simples (RCS), o índice de suporte Califórnia (ISC) e o módulo de resiliência (MR) como variáveis de resposta. As dosagens ótimas foram distintas para cada solo, evidenciando a influência das características físico-mineralógicas no processo de ativação alcalina. As misturas otimizadas foram avaliadas aos 0, 7 e 28 dias por meio dos ensaios de ISC, MR e resistência ao cisalhamento direto (σ_v). Os resultados indicaram aumentos expressivos da capacidade de suporte e da rigidez, além de significativa redução da expansão, com ganhos mais pronunciados no solo VS, associados à maior eficiência do preenchimento dos vazios intergranulares e da densificação da matriz. Nos ensaios de cisalhamento, as misturas ativadas apresentaram picos de resistência bem definidos, com incremento de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), indicando comportamento mais rígido e presença de ligações cimentantes.

As análises microestruturais e mineralógicas por microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por energia dispersiva (MEV/EDS), difração de raios X (DRX) e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) confirmaram a formação de géis do tipo NASH e CASH, além de fases secundárias, promovendo uma microestrutura progressivamente mais densa e homogênea ao longo do tempo de cura. Adicionalmente, o comportamento das misturas sob carregamentos repetidos foi avaliado por ensaios de deformação permanente (DP), sendo os resultados interpretados à luz da Teoria do Shakedown. Observou-se redução significativa da DP nas misturas ativadas, com concentração do acúmulo nos ciclos iniciais e tendência de estabilização ao longo do carregamento. De forma geral, os resultados demonstram que a ativação alcalina constitui uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável para a melhoria de solos tropicais aplicados em pavimentação, promovendo ganhos relevantes de resistência, rigidez e estabilidade estrutural, além de contribuir para o reaproveitamento de resíduos industriais.

Palavras-chave: ativação alcalina; resíduos siderúrgicos; propriedades geotécnicas; estabilização de solos; pavimentação

ABSTRACT

ALMEIDA, Deborah Castro e, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026. **Evaluation of Alkali-Activated Tropical Soils for Pavement Applications.** Adviser: Heraldo Nunes Pitanga.

Soil is widely used in geotechnical and pavement engineering; however, soils with insufficient mechanical and durability properties to withstand design loads are frequently encountered, which requires the adoption of soil improvement techniques. Conventional cement stabilization, although technically effective, is associated with significant environmental impacts, particularly due to CO emissions and the consumption of natural resources, motivating the search for more sustainable solutions. In this context, alkali activation has emerged as a promising alternative, as it enables the reuse of industrial by-products and the production of materials with mechanical performance compatible with normative requirements. This research aimed to evaluate the technical feasibility, mechanical performance, and cyclic loading behavior of tropical soils stabilized by alkali activation, using fly ash (FA) and electric arc furnace slag (EAFS) as precursors and sodium hydroxide (NaOH) solution as the activator, for application in pavement structural layers. Two residual soils with distinct characteristics were investigated: a predominantly sandy soil (VS) and a predominantly clayey soil (BR). Initially, multivariate statistical optimization of mix proportions was performed using a Box–Behnken experimental design, simultaneously considering unconfined compressive strength (UCS), California Bearing Ratio (CBR), and resilient modulus (RM) as response variables. The optimal mixtures differed for each soil, highlighting the influence of physicochemical properties on the alkali activation process. The optimized mixtures were evaluated at 0, 7, and 28 days through CBR, RM, and direct shear strength (σ_v) tests. The results indicated substantial increases in bearing capacity and stiffness, as well as significant reductions in expansion, with more pronounced improvements for the sandy soil (VS), associated with more efficient pore filling and matrix densification. In direct shear tests, the activated mixtures exhibited well-defined peak strength, with increased cohesion (c) and internal friction angle (ϕ), indicating stiffer behavior and the presence of cementitious bonding. Microstructural and mineralogical analyses using scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (SEM/EDS), X-ray diffraction (XRD), and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) confirmed the formation of NASH and CASH gels, as well as secondary phases, promoting a progressively denser and more homogeneous microstructure with curing time. Additionally, the cyclic

behavior of the mixtures was evaluated through permanent deformation (PD) tests, and the results were interpreted based on Shakedown Theory. A significant reduction in PD was observed for the activated mixtures, with most of the accumulation occurring in the early loading cycles and a tendency toward stabilization during continued loading. Overall, the results demonstrate that alkali activation represents a technically viable and environmentally sustainable alternative for improving tropical soils used in pavement applications, promoting significant gains in strength, stiffness, and structural stability while contributing to the reuse of industrial residues.

Keywords: alkali activation; steelmaking residues; geotechnical properties; soil stabilization; pavements

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Estudos de projetos de dosagens de solos estabilizados via ativação alcalina	37
Tabela 2.2: Estudos de projetos de dosagens de solos estabilizados via ativação alcalina	41
Tabela 2.3: Estudos obtidos a partir de ensaios de deformação permanente utilizando os métodos de carregamento empregado em estágio único (EU) ou multiestágios (ME).	52
Tabela 2.4: Estudos obtidos a partir de ensaios de deformação permanente utilizando os métodos de carregamento empregado em estágio único (EU) ou multiestágios (ME) (continuação).	53
Tabela 2.5: Estados de tensões indicados para a determinação da DP	54
Tabela 2.6: Estudos relacionados à aplicação da ativação alcalina com o objetivo de estabilização de solos para uso em camadas de pavimentos rodoviários	57
Tabela 2.7: Estudos relacionados à aplicação da ativação alcalina com o objetivo de estabilização de solos para uso em camadas de pavimentos rodoviários (continuação) ..	58
Tabela 2.8: Estudos relacionados à aplicação da ativação alcalina com o objetivo de estabilização de solos para uso em camadas de pavimentos rodoviários (continuação) ..	59
Tabela 3.1: Limites das variáveis independentes	88
Tabela 3.2: Caracterização e classificação geotécnicas das amostras de solo analisadas.	91
Tabela 3.3: Classificações geotécnicas das amostras de solo analisadas.	92
Tabela 3.4: Composições químicas dos solos obtidas por FRX.....	92
Tabela 3.5: Composição química e perda ao fogo de amostra de EAEP.	95
Tabela 3.6: Elementos químicos presentes na amostra de EAEP.....	97
Tabela 3.7: Composição química e perda ao fogo de amostra de Cinza Volante	98
Tabela 3.8: Elementos químicos presentes na amostra de cinza volante.	99
Tabela 3.9: Concentrações dos elementos nos extratos lixiviados.	100
Tabela 3.10: Concentrações dos elementos nos extratos solubilizados.....	100
Tabela 3.11: Parâmetros de ótimo (energia do Proctor Intermediário) das misturas analisadas para as duas amostras de solo	101
Tabela 3.12: Parâmetros de ótimo (energia do Proctor Intermediário) das misturas analisadas para as duas amostras de solo (continuação)	102
Tabela 3.13: RCS, ISC e MR das misturas analisadas.	103
Tabela 3.14: Análise de Variância da otimização das respostas RCS, MR e ISC.	104
Tabela 3.15: Equações referentes às superfícies de resposta de RCS, MR e ISC.	107
Tabela 3.16: Dosagem ótima obtida a partir da função desejabilidade	112
Tabela 3.17: Propriedades mecânicas estimadas para as respectivas misturas ótimas.....	113

Tabela 3.18: Desejabilidades individuais e compostas para as propriedades mecânicas das misturas ótimas	113
Tabela 3.19: Valores mínimos das propriedades de engenharia RCS, ISC e MR para as diferentes camadas de pavimento	114
Tabela 4.1: Parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas ótimas do Solo VS.....	148
Tabela 4.2: Parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas ótimas do solo BR	148
Tabela 5.1: Especificidades do ensaio de Deformação Permanente segundo a EN 13286-7 (CEN, 2004)	173
Tabela 5.2: Síntese dos dados experimentais obtidos nos ensaios de DP: misturas com solo VS	175
Tabela 5.3: Síntese dos dados experimentais obtidos nos ensaios de DP: misturas com solo VS (continuação)	176
Tabela 5.4: Síntese do enquadramento das misturas analisadas segundo a Teoria do Shakedown	182
Tabela 5.5: Síntese do enquadramento das misturas analisadas segundo a Teoria do Shakedown (Continuação)	183
Tabela 5.6: Síntese dos dados experimentais obtidos nos ensaios de DP: misturas com solo BR	185
Tabela 5.7: Síntese dos dados experimentais obtidos nos ensaios de DP: misturas com solo BR (continuação)	186
Tabela 5.8: Síntese do enquadramento das misturas analisadas segundo a Teoria do Shakedown	192
Tabela 5.9: Síntese do enquadramento das misturas analisadas segundo a Teoria do Shakedown (continuação)	193

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Modelo conceitual da reação de ativação alcalina	32
Figura 2.2: Diagrama esquemático do modelo de geopolímero de aluminossilicato de sódio hidratado (NASH).	34
Figura 2.3: Diagrama esquemático do modelo do geopolímero (N, C)-ASH.	35
Figura 2.4: Variações de tensões causadas por uma carga móvel	44
Figura 2.5: Comportamentos de materiais sob cargas cíclicas segundo o conceito original da Teoria do Shakedown	47
Figura 2.6: Comportamentos de materiais sob cargas cíclicas segundo a perspectiva dos estudos de Werkmeister et al. (2001)	48
Figura 2.7: Definição dos limites quanto ao Shakedown a partir dos valores das taxas de acréscimo de deformação permanente – Parte 1	50
Figura 2.8: Definição dos limites quanto ao Shakedown a partir dos valores das taxas de acréscimo de deformação permanente – Parte 2	50
Figura 2.9: Desenvolvimento das deformações permanentes no ensaio triaxial de cargas repetidas: (a) estágio único e (b) multiestágios	51
Figura 2.10: Quatro categorias de afundamento de trilha de roda	56
Figura 3.1: Identificação e composição das misturas experimentais no diagrama obtido através do método central	87
Figura 3.2: Curvas granulométricas das amostras de solo (a) VS e (b) BR.	91
Figura 3.3: Difractogramas das amostras de solo BR (a) e VS (b) obtidos por DRX.....	93
Figura 3.4: Microfotografias obtidas no MEV dos solos empregados na pesquisa: (a) Solo VS; (b) solo BR	94
Figura 3.5: Distribuição granulométrica: (a) Cinza Volante e (b) Escória de aciaria primária	94
Figura 3.6: Difractograma da amostra de EAEP obtido por DRX.....	95
Figura 3.7: Micrografias da amostra de EAEP obtidas por MEV: (a)x160, (b)x300, (c)x650 e (d)x1.800.	96
Figura 3.8: Análise termogravimétrica da amostra de EAEP.....	97
Figura 3.9: Difractograma correspondente à cinza volante.....	98
Figura 3.10: Micrografias de amostra de cinza volante obtidas por MEV: (a)x100 e (b)x3.000.	99
Figura 3.11: Análise termogravimétrica da amostra de cinza volante.	99

Figura 3.12: Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados – Variável de Resposta RCS: (a) VS; (b) BR	104
Figura 3.13: Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados – Variável de Resposta MR: (a) VS; (b) BR	105
Figura 3.14: Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados – Variável de Resposta ISC: (a) VS; (b) BR	105
Figura 3.15: Superfícies de resposta para a RCS das misturas: (a) Solo VS; (b) Solo BR	108
Figura 3.16: Superfícies de resposta para o MR das misturas: (a) Solo VS; (b) Solo BR	110
Figura 3.17: Superfícies de resposta para a ISC das misturas: (a) Solo VS; (b) Solo BR	112
Figura 4.1: Índice de Suporte Califórnia das amostras analisadas.	139
Figura 4.2: Expansão ISC das amostras analisadas.	140
Figura 4.3: Módulo de Resiliência médio das amostras analisadas.	141
Figura 4.4: Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Relativo da Mistura Ótima Solo VS -CV – EAEP – NaOH: (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 28 dias	143
Figura 4.5: Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Relativo da Mistura Ótima Solo VS -CV – EAEP: (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 28 dias.....	144
Figura 4.6: Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Relativo da Mistura Ótima Solo BR -CV – EAEP- NaOH: (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 28 dias	145
Figura 4.7: Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Relativo da Mistura Ótima Solo BR -CV – EAEP: (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 28 dias	146
Figura 4.8: Gráficos de interação dos fatores Ativação alcalina e Tempo de cura (dias) sobre a resposta ISC (%): (a) Mistura ótima do solo VS; (b) Mistura ótima do solo BR.....	149
Figura 4.9: Gráficos de interação dos fatores Ativação alcalina e Tempo de cura (dias) sobre a resposta MR (MPa): (a) Mistura ótima do solo VS; (b) Mistura ótima do solo BR.	149
Figura 4.10: Gráficos de interação dos fatores Ativação alcalina e Tempo de cura (dias) sobre a resposta τ_{pico} (kPa) sob tensão normal de 200 kPa: (a) Mistura ótima do solo VS; (b) Mistura ótima do solo BR.....	149
Figura 4.11: Comparação microestrutural por MEV e análises EDS das misturas ótimas do Solo BR aos 7 dias de cura: (a) Solo BR–CV–EAEP (não ativada); (b) Solo BR–CV-EAEP–NaOH (ativada alcalinamente).	150

Figura 4.12: Comparação microestrutural por MEV e análises EDS das misturas ótimas do Solo BR aos 28 dias de cura: (a) Solo BR–CV–EAEP (não ativada); (b) Solo BR–CV–EAEP–NaOH (ativada alcalinamente).	151
Figura 4.13: Comparação microestrutural por MEV e análises EDS das misturas ótimas do Solo VS aos 7 dias de cura: (a) Solo VS–CV–EAEP (não ativada); (b) Solo VS–CV–EAEP–NaOH (ativada alcalinamente).	151
Figura 4.14: Comparação microestrutural por MEV e análises EDS das misturas ótimas do Solo VS aos 28 dias de cura: (a) Solo VS–CV–EAEP (não ativada); (b) Solo VS–CV–EAEP–NaOH (ativada alcalinamente).	152
Figura 4.15: DRX das misturas ótimas do Solo BR testadas aos 0 dias, 7 dias e 28 dias	154
Figura 4.16: DRX das misturas ótimas do Solo VS testadas aos 0 dias, 7 dias e 28 dias	154
Figura 4.17: FTIR das misturas de ótimas de Solo VS testadas aos 0 dias, 7 dias e 28 dias .	155
Figura 4.18: FTIR das misturas de ótimas de Solo BR testadas aos 0 dias, 7 dias e 28 dias .	156
Figura 5.1: Classificação gráfica conforme a norma brasileira DNIT 179-ME	174
Figura 5.2: Resultados de DP da amostra VS-CV-EAEP-NaOH com (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura	177
Figura 5.3: Resultados de DP da amostra VS-CV-EAEP com (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura	178
Figura 5.4: Variação da taxa de crescimento da DP pela deformação vertical acumulada para as misturas Solo VS-EAEP-CV-NaOH, para (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura	180
Figura 5.5: Variação da taxa de crescimento da DP pela deformação vertical acumulada para as misturas Solo VS-EAEP-CV, para (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura	181
Figura 5.6: Resultados de DP da amostra BR-CV-EAEP-NaOH com (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura(a) (b).....	187
Figura 5.7: Resultados de DP da amostra BR-CV-EAEP com (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura	188
Figura 5.8: Variação da taxa de crescimento da DP pela deformação vertical acumulada para as misturas Solo BR-EAEP-CV-NaOH, para (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura	189

Figura 5.9: Variação da taxa de crescimento da DP pela deformação vertical acumulada para as misturas Solo BR-EAEP-CV-NaOH, para (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura (continuação)	190
Figura 5.10: Variação da taxa de crescimento da DP pela deformação vertical acumulada para as misturas Solo BR-EAEP-CV, para (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura	191

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL 19

1.1	Contextualização do objeto de pesquisa	19
1.2	Objetivos	22
1.3	Estrutura do trabalho	23
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

2 REFERENCIAL TEÓRICO 31

2.1	Estabilização de solos.....	31
2.2	Ativação alcalina	31
2.2.1	Considerações iniciais	31
2.2.2	Mecanismo de reação	33
2.2.3	Ativador.....	35
2.2.4	Precursor.....	38
2.2.5	Dosagem de mistura solo-álcali-ativado.....	40
2.2.6	Vantagens do tratamento de solos através da ativação alcalina	41
2.3	Estado de Tensões no Pavimento	43
2.4	Módulo de Resiliência.....	44
2.5	Deformação Permanente	45
2.6	Teoria do Shakedown.....	46
2.7	Obtenção da deformação permanente em laboratório	50
2.8	Ensaio de deformação permanente conforme norma brasileira DNIT 179/2018 – IE.....	54
2.9	Ensaio de deformação permanente conforme o Comitê Europeu de Normalização — EN 13286-7 (CEN, 2004)	54
2.10	Cisalhamento Direto.....	55
2.11	Alguns trabalhos do uso da ativação alcalina na área de pavimentação	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

3 OTIMIZAÇÃO ESTATÍSTICA MULTIVARIÁVEL DA DOSAGEM DE SOLOS ESTABILIZADOS POR ATIVAÇÃO ALCALINA 76

3.1	INTRODUÇÃO	78
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	82

3.2.1	Materiais	82
3.2.2	Métodos	83
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
3.3.1	Ensaio de caracterização física e classificação geotécnica dos solos	90
3.3.2	Ensaio de caracterização química, mineralógica e microestrutural dos solos	92
3.3.3	Ensaio de caracterização da escória de aciaria elétrica primária e da cinza volante	94
3.3.4	Ensaio de caracterização química, mineralógica e microestrutural	94
3.3.5	Ensaio de caracterização ambiental.....	100
3.3.6	Ensaio de compactação	101
3.3.7	Propriedades mecânicas analisadas	102
3.3.8	Análise de Variância (ANOVA).....	103
3.3.9	Modelo de regressão	106
3.3.10	Superfícies de Resposta	107
3.3.11	Determinação da dosagem ótima através da função desejabilidade.....	112
3.4	Conclusões	114
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE SOLOS TROPICAIS ESTABILIZADOS POR ATIVAÇÃO ALCALINA PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS 131

4.1	INTRODUÇÃO	134
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	136
4.2.1	Materiais	136
4.2.2	Métodos	137
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	139
4.3.1	Ensaio de ISC.....	139
4.3.2	Ensaio de MR.....	141
4.3.3	Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto	142
4.3.4	Avaliação do desempenho em função do tempo de cura	148
4.3.5	Análises químicas, mineralógicas e microestruturais	150
4.4	Conclusões	157
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158

5 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO CÍCLICO DE SOLOS ESTABILIZADOS POR ATIVAÇÃO ALCALINA À LUZ DA TEORIA DO SHAKEDOWN 167

5.1	INTRODUÇÃO	169
5.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	171
5.2.1	Materiais	171
5.2.2	Métodos	172
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	174
5.3.1	Solo VS.....	174
5.3.2	Solo BR	184
5.3.3	Considerações finais	194
5.4	Conclusões	195
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	196

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 202

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Contextualização do objeto de pesquisa

O transporte rodoviário desempenha um papel essencial na sociedade brasileira, viabilizando não apenas o deslocamento de produtos, serviços e pessoas, como também a integração entre os demais modais de transporte (Schreinert, 2021).

A relevância do modal rodoviário evidencia-se por sua predominância na matriz de transportes nacional, sendo responsável por, aproximadamente, 65% da movimentação de cargas e 95% do transporte de passageiros no país (CNT, 2025). Contudo, a condição das rodovias pavimentadas ainda é insatisfatória em termos de conforto ao rolamento e segurança viária, uma vez que cerca de 56,5% dessas vias apresentam algum tipo de deficiência, sendo classificadas como regulares, ruins ou péssimas (CNT, 2025).

Esses dados realçam a enorme demanda nacional por obras de pavimentação com o objetivo de reduzir a ocorrência e a gravidade de acidentes, aliado a um maior conforto ao rolamento. Nesse contexto, tornam-se necessários o desenvolvimento e o aprimoramento de técnicas de melhoramento de solos (Firoozi *et al.*, 2017), bem como a otimização do uso dos materiais locais, contribuindo para a construção de estruturas mais confiáveis e para a redução das distâncias de transporte e dos custos associados (Gajewska; Kraszewski; Rafalski, 2018; Rodrigues, 2022).

Uma das principais técnicas de melhoramento de solos para aplicações no âmbito das engenharias geotécnica e de pavimentação consiste na sua tradicional estabilização com cimento (Chen *et al.*, 2024; Kitazume; Terashi, 2013; Miraki *et al.*, 2022; Naraula *et al.*, 2025; Terashi; Kitazume, 2011; Yi *et al.*, 2015). O uso do cimento é muito comum na indústria da construção civil e sua produção está em constante crescimento. Em 2022, por exemplo, foram produzidas, globalmente, 4,10 bilhões de toneladas de cimento (SNIC, 2025), estimando-se que, até 2030, essa produção alcance, aproximadamente, 4,83 bilhões de toneladas (Gopalakrishnan; Chinnaraju, 2019; Miraki *et al.*, 2022).

No entanto, esse expressivo volume de produção acarreta diversas consequências ambientais negativas. Por exemplo, a fabricação de 1 tonelada de cimento resulta na emissão de, aproximadamente, 0,95 toneladas de CO₂, o que representa cerca de 5% das emissões globais desse gás de efeito estufa (Higgins, 2007; Lemougna *et al.*, 2018; Khalil; Abouzeid, 2025).

Além disso, a produção de cimento consome grandes quantidades de recursos naturais não renováveis (Kodah *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2020), além de, aproximadamente, 5.000 MJ de energia necessários para produzir cada tonelada de cimento (Miraki *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2025).

É neste contexto que surge o estudo do tratamento de solos via ativação alcalina, o qual, comparativamente à técnica tradicional de estabilização com cimento, tem gerado produtos de engenharia (solos álcali-ativados) cujas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas são análogas, como baixa condutividade térmica, alta resistência à compressão e baixa permeabilidade (Severo *et al.*, 2013; Ozer; Soyer-Uzun, 2015; Qiu *et al.*, 2019). Portanto, os solos álcali-ativados podem ser considerados como potenciais alternativas técnicas frente às convencionais misturas solo-cimento.

Os materiais álcali-ativados são produzidos por uma reação química de um aluminossilicato sólido em condições alcalinas, produzindo um ligante capaz de adquirir características de um material consolidado (Ayub; Khan, 2023; Provis, 2014). Sua produção está associada a um processo químico que permite a transformação de determinadas estruturas parcial ou totalmente amorfas em estruturas com propriedades cimentícias (Ayub; Khan, 2023; Rios *et al.*, 2015).

Estudos, como os desenvolvidos por Cristelo, Glendinning e Pinto (2011), Chi e Huang (2013), Soares (2013), Cristelo *et al.* (2013), Rios *et al.* (2015), Caicedo (2020), Acosta (2021), Chen *et al.* (2021), Araújo (2022) e Kodah *et al.* (2025), evidenciaram o potencial de estabilização de solos através da ativação alcalina. Os referidos estudos constataram, dentre outros pontos, que a aplicação da ativação alcalina melhora diversas propriedades de engenharia do solo. Entretanto, a viabilidade técnica e econômica da ativação alcalina em solos deve ser minuciosamente estudada uma vez que o comportamento e o desempenho do material estabilizado para uma dada finalidade estão condicionados a fatores, como o tipo e a concentração do ativador alcalino, a matéria-prima usada como fonte de aluminossilicatos e as condições de cura (Castro, 2015; Chen *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020).

Ainda que a estabilização do solo por meio da aplicação da técnica de ativação alcalina constitua uma estratégia promissora para melhorar as propriedades de engenharia dos solos utilizados em obras rodoviárias, é notável que poucas pesquisas analisaram a otimização das dosagens de misturas de solos álcali-ativados com mais de um parâmetro de resposta em consideração. A utilização de diferentes variáveis de resposta para a otimização de dosagens tem sido aplicada em diversas áreas (Candioti *et al.*, 2014; Galindo *et al.*, 2024; Lafifi; Rouaiguia; Boumazza, 2019; Rodrigues, 2022), contudo o seu uso no desenvolvimento de

materiais álcali-ativados tem sido pouco explorado no meio técnico. Poucos estudos foram encontrados a respeito de sua aplicação na produção de misturas álcali-ativadas (Abdellatief *et al.*, 2024; Aouan *et al.*, 2021; Matsimbe *et al.*, 2024; Shi *et al.*, 2023), porém nenhum deles visando a estabilização de solos para utilização em pavimentação.

Nesse contexto, a primeira proposição deste estudo estabelece uma abordagem metodológica fundamentada no processo de ativação alcalina de solos, com vistas à obtenção de dosagens otimizadas de misturas solo–cinza volante (CV)–escória de aciaria elétrica primária (EAEP)–solução de hidróxido de sódio (NaOH), determinando, por meio de um planejamento experimental apoiado em ferramenta estatística do tipo Box–Behnken, a melhor combinação entre a concentração de NaOH (ativador) e os teores de CV e EAEP (precursores), em relação ao solo, de modo a maximizar as propriedades mecânicas das misturas.

Para a segunda proposição, é importante destacar que fatores, como o tipo e a concentração do ativador alcalino, a natureza da matéria-prima utilizada como fonte de aluminossilicatos e as condições de cura, podem influenciar significativamente o desenvolvimento da resistência de solos estabilizados por ativação alcalina (Castro, 2015; Chen *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020). Além disso, propriedades intrínsecas do solo, como a mineralogia, o teor de argila e a capacidade de troca catiônica, também exercem influência determinante sobre o desempenho mecânico dos materiais estabilizados (Odeh; RKaby, 2022; Wu *et al.*, 2024).

Pesquisas anteriores têm se concentrado predominantemente na estabilização de um único tipo de solo (Adhikari; Khattak; Adhikari, 2021; Abdulwahed; Aljanabi; Abdulkareem, 2022; Eidgahee; Rafiean; Haddad, 2020; Kodah *et al.*, 2025; Leong *et al.*, 2018; Maheepala *et al.*, 2023; Mozumder; Laskar, 2015; Shariatmadari *et al.*, 2021), havendo ainda limitada investigação acerca da eficácia e dos mecanismos subjacentes à estabilização em diferentes classes de solos. Essa lacuna tem resultado em discrepâncias na aplicação de determinadas conclusões a distintos tipos de solo, restringindo a sua generalização.

Diante desse cenário, o segundo estudo desta tese tem como objetivo analisar o comportamento mecânico de misturas de dois solos tropicais geotecnicamente distintos (um arenoso e um argiloso) estabilizados por ativação alcalina, empregados na pavimentação, por meio de ensaios de Módulo de Resiliência (MR), Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Resistência ao Cisalhamento.

A terceira proposição insere-se no contexto da suscetibilidade dos pavimentos asfálticos ao desenvolvimento de patologias estruturais. Em decorrência do crescimento expressivo do volume de tráfego e do aumento da capacidade de carga dos veículos, esses pavimentos têm

sido frequentemente submetidos a níveis de solicitação superiores aos previstos em projeto, o que favorece o surgimento prematuro de danos antes do término de sua vida útil, com destaque para o afundamento plástico nas trilhas de roda (Rodrigues, 2022; Yarahmadi *et al.*, 2022; Zarei *et al.*, 2022).

O processo de degradação de materiais submetidos a carregamentos cíclicos é adequadamente descrito pela Teoria do Shakedown. Segundo Yu *et al.* (2007), essa teoria fundamenta-se na premissa de que, abaixo de um determinado nível de carregamento, o comportamento do material é predominantemente elástico, resiliente e reversível, não ocorrendo acúmulo significativo de deformações plásticas ao longo dos ciclos.

À luz da Teoria do Shakedown, diversos autores têm investigado o comportamento plástico de solos e misturas solo-cimento submetidos a carregamentos repetidos (Anu *et al.*, 2024; Anupam *et al.*, 2016; Bastos, 2024; Cabral, 2021; Chen *et al.*, 2019; Lima *et al.*, 2025; Rios *et al.*, 2022; Schreinert, 2021). Entretanto, ainda são escassos, na literatura técnica, estudos que avaliem esse comportamento em materiais estabilizados por ativação alcalina, especialmente no que se refere à aplicação da Teoria do Shakedown em camadas de base e sub-base de pavimentos.

Diante desse cenário, o terceiro estudo desta pesquisa tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico de misturas não álcali-ativadas (solo–CV–EAEP) em comparação com misturas álcali-ativadas (solo–CV–EAEP–NaOH), aplicáveis à pavimentação, por meio da caracterização do comportamento plástico dos materiais com base na Teoria do Shakedown.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar o potencial de aplicação da técnica de ativação alcalina na estabilização de solos tropicais, empregando hidróxido de sódio (NaOH) como ativador e cinza volante (CV) e escória de aciaria elétrica primária (EAEP) como precursores, visando à sua utilização em obras de pavimentação.

Como objetivos específicos, relacionados ao objetivo principal, citam-se:

- i. Determinar, por meio de planejamento experimental suportado por ferramenta estatística (Box-Behnken), a melhor combinação de concentração de NaOH (ativador) e porcentagens de CV e EAEP (precursores) em relação ao solo que maximize as propriedades mecânicas das misturas, tendo como referência um conjunto multivariado de propriedades de engenharia relevantes em projetos de pavimentação [Resistência à

- Compressão Simples (RCS), Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Módulo de Resiliência (MR)];
- ii. Avaliar a eficiência dos modelos matemáticos polinomiais resultantes do planejamento experimental Box-Behnken na predição do comportamento de engenharia (variáveis de resposta) dos solos estabilizados via ativação alcalina;
 - iii. Definir um protocolo simplificado e replicável de otimização estatística da mistura solo-ativador-precursor fundamentado na consideração simultânea de múltiplas variáveis de resposta e no atendimento de valores mínimos (restrições) destas variáveis conforme prescrições normativas;
 - iv. Avaliar o efeito do tempo de cura sobre propriedades de engenharia relevantes das misturas solo-ativador-precursor otimizadas;
 - v. Correlacionar as propriedades de engenharia das misturas otimizadas com suas respectivas características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais;
 - vi. Diferenciar, por meio das caracterizações química, mineralógica e microestrutural, os produtos cimentícios resultantes da ativação alcalina daqueles resultantes exclusivamente da hidratação da mistura solo-CV-EAEP;
 - vii. Avaliar, de forma abrangente, propriedades mecânicas [Módulo de Resiliência (MR), Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Resistência ao Cisalhamento (τ)] de misturas não álcali-ativadas (misturas solo-CV-EAEP) comparativamente com misturas álcali-ativadas (misturas solo-CV-EAEP-NaOH);
 - viii. Avaliar o desempenho mecânico de misturas não álcali-ativadas (misturas solo-CV-EAEP) comparativamente com misturas álcali-ativadas (misturas solo-CV-EAEP-NaOH) aplicáveis à pavimentação por meio da caracterização do comportamento plástico dos materiais, com base na Teoria do Shakedown.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho de pesquisa está organizado em 6 capítulos, assim distribuídos:

✓ Capítulo 1 – Introdução Geral: apresenta a contextualização geral do tema, destacando a relevância da estabilização de solos por ativação alcalina no contexto da pavimentação, a motivação da pesquisa, os objetivos gerais e específicos, bem como a estrutura e a organização do trabalho;

✓ Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: aborda os principais fundamentos teóricos necessários à compreensão do estudo, incluindo os conceitos de ativação alcalina e sua aplicação em camadas de pavimentos, os mecanismos de formação dos produtos geopoliméricos, o comportamento mecânico de solos estabilizados, o estado de tensões em pavimentos e os princípios da Teoria do Shakedown aplicados à avaliação do desempenho sob carregamentos cíclicos;

✓ Capítulo 3 – Otimização Estatística Multivariável da Dosagem de Solos Estabilizados por Ativação Alcalina: apresenta o desenvolvimento do planejamento experimental baseado no método de Box–Behnken, visando à determinação das dosagens ótimas das misturas solo–cinza volante (CV)–escória de aciaria elétrica primária (EAEP)–hidróxido de sódio (NaOH). São analisadas, de forma integrada, as respostas mecânicas de Resistência à Compressão Simples (RCS), Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Módulo de Resiliência (MR), permitindo a definição das combinações ótimas de ativador e precursores;

✓ Capítulo 4 – Avaliação experimental de solos tropicais estabilizados por ativação alcalina para aplicação em camadas de pavimentos: discute o comportamento mecânico das misturas otimizadas por meio dos ensaios de ISC, MR e resistência ao cisalhamento direto, considerando a influência do tipo de solo e do tempo de cura. Complementarmente, são apresentadas análises microestruturais, mineralógicas e químicas (MEV/EDS, DRX e FTIR), visando à interpretação dos mecanismos responsáveis pelo ganho de resistência, rigidez e estabilidade das misturas;

✓ Capítulo 5 – Avaliação do comportamento cíclico de solos estabilizados por ativação alcalina à luz da Teoria do Shakedown: apresenta a investigação do comportamento das misturas sob carregamentos cíclicos, por meio de ensaios de deformação permanente. Os resultados são interpretados à luz da Teoria do Shakedown, permitindo a classificação dos regimes de resposta plástica, a comparação entre misturas ativadas e não ativadas e a análise da aplicabilidade de critérios normativos para materiais estabilizados.

✓ Capítulo 6 – Considerações finais: apresenta, de forma resumida, as principais contribuições técnicas e científicas geradas pela pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULWAHED, H. S.; ALJANABI, K. R.; ABDULKAREEM, A. H. Optimization of equivalent modulus of RAP-geopolymer-soil mixtures using response surface methodology. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2022. DOI: 10.1016/j.jksues.2022.06.005.
- ACOSTA, C. J. M. *Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de vidro e cal de casca de ovo*. 2021. 202 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- ADHIKARI, B.; KHATTAK, M. J.; ADHIKARI, S. Mechanical and durability characteristics of fly ash-based soil-geopolymer mixtures for pavement base and subbase layers. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 22, n. 10, p. 1193–1212, 2019. DOI: 10.1080/10298436.2019.1668562.
- ANU, J.; KRISHNAN, J. M.; ROBINSON, R. G. Mechanical response of cement-stabilized pond ash during repeated loading based on shakedown concept. *International Journal of Geomechanics*, v. 24, n. 3, art. 04024010, 2024. DOI: 10.1061/IJGNALGMENG-7516.
- ANUPAM, A. K.; KUMAR, P.; RANSINCHUNG, R. N. G. D. Effect of fly ash and rice husk ash on permanent deformation behaviour of subgrade soil under cyclic triaxial loading. *Transportation Research Procedia*, v. 17, p. 596–606, 2016. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.11.114.
- AOUAN, B. *et al.* Compressive strength optimization of metakaolin-based geopolymer by central composite design. *Chemical Data Collections*, v. 31, p. 100636, 2021.
- ARAÚJO, M. T. *Comportamento de solo expansivo estabilizado por ligante álcali-ativado oriundo de resíduos: sustentabilidade, propriedades mecânicas e microestruturais*. 2022. 323 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

AYUB, F.; KHAN, S. A. An overview of geopolymers composites for stabilization of soft soils. *Construction and Building Materials*, v. 404, art. 133195, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133195.

BASTOS, S. D. V. *Estudo do comportamento mecânico-empírico de materiais alternativos e cimentícios em camadas de pavimentos*. 2024. 310 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

CABRAL, W. S. *Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da microregião de Mossoró/RN*. 2021. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

CAICEDO, A. M. L. *Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de cerâmica vermelha e cal de carbureto*. 2020. 262 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

CANDIOTI, L. V. *et al.* Experimental design and multiple response optimization using the desirability function in analytical methods development. *Talanta*, v. 124, p. 123–138, 2014. DOI: 10.1016/j.talanta.2014.01.034.

CASTRO, J. F. A. *Melhoramento de um solo arenoso por ativação alcalina*. 2015. 91 f. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2015.

CHEN, K. *et al.* Modeling and optimization of fly ash–slag-based geopolymers using response surface method and its application in soft soil stabilization. *Construction and Building Materials*, v. 315, p. 125723, 2021.

CHEN, W. B. *et al.* Characterization of permanent axial strain of granular materials subjected to cyclic loading based on shakedown theory. *Construction and Building Materials*, v. 198, p. 751–761, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.012.

CHEN, Y.; XU, Y.; WANG, L.; LI, T. Study on the relationship between matric suction, unconfined compressive strength, and uniaxial tensile strength for compacted expansive soils. *Environmental Earth Sciences*, v. 83, n. 6, art. 165, 2024. DOI: 10.1007/s12665-024-11470-z.

CHI, M.; HUANG, R. Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 291–298, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.003.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. *Anuário CNT do Transporte: estatísticas consolidadas*. Brasília, 2025. <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2025/File/PrincipaisDados.pdf>.

CRISTELO, N. *et al.* Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 925–933, 2013.

CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; PINTO, A. T. Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 164, n. 1, p. 73–82, 2011.

EIDGAHEE, D. R.; RAFIEAN, A. H.; HADDAD, A. A. A novel formulation for the compressive strength of IBP-based geopolymers stabilized clayey soils using ANN and GMDH-NN approaches. *Iranian Journal of Science and Technology – Transactions of Civil Engineering*, v. 44, n. 1, p. 219–229, 2020.

FIROOZI, A. A. *et al.* Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, v. 8, n. 1, p. 26, 2017.

GALINDO, J. R. F. *et al.* Optimization of mixtures of soil, construction and demolition waste, and steel slag using the simplex extreme vertices method. *Transportation Geotechnics*, v. 47, art. 101361, 2024.

GOPALAKRISHNAN, R.; CHINNARAJU, K. Durability of ambient cured alumina silicate concrete based on slag/fly ash blends against sulfate environment. *Construction and Building Materials*, v. 204, p. 70–83, 2019.

HIGGINS, D. Briefing: GGBS and sustainability. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials*, v. 160, n. 3, p. 99–101, 2007.

KITAZUME, M.; TERASHI, M. *The deep mixing method*. London: CRC Press, 2013.

- KODAH, R. A. *et al.* Geopolymer stabilization of expansive soils using zeolitic tuff. *Results in Engineering*, v. 26, art. 105386, 2025.
- LAFIFI, B.; ROUAIGUIA, A.; BOUMAZZA, N. Optimization of geotechnical parameters using DOE, RSM and desirability function. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 4, 2019.
- LEMOUGNA, P. N. *et al.* Review on the use of volcanic ashes for engineering applications. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 137, p. 177–190, 2018.
- LEONG, H. Y. *et al.* Strength development of soil–fly ash geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 8, 2018.
- LIMA, C. D. A. *et al.* Investigation of the deformability of sandy soils under repeated load triaxial tests. *Construction and Building Materials*, v. 477, p. 141367, 2025.
- MAHEEPALA, M. M. A. L. N. *et al.* Mix design development for geopolymer treated expansive subgrades. *Computers and Geotechnics*, v. 161, p. 105534, 2023.
- MIRAKI, H. *et al.* Clayey soil stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 14, n. 2, p. 576–591, 2022.
- MOZUMDER, R.; LASKAR, A. Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer stabilized clayey soil. *Computers and Geotechnics*, v. 69, p. 291–300, 2015.
- NIRAULA, U. *et al.* High-plasticity silt stabilization. *Results in Engineering*, v. 26, art. 104877, 2025.
- OZER, I.; SOYER-UZUN, S. Relations between structural characteristics and compressive strength in metakaolin geopolymers. *Ceramics International*, v. 41, n. 8, p. 10192–10198, 2015.
- PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials. *Materials and Structures*, v. 47, p. 11–25, 2014.
- QIU, J. *et al.* Fly ash/slag geopolymer as binder for mine backfilling. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2019, p. 1–12, 2019.

RIOS, S. *et al.* Structural performance of alkali activated soil-ash versus soil-cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 2, 2015.

RODRIGUES, K. H. P. *Utilização de resíduos industriais na estabilização de solos tropicais*. 2022. 231 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

SCHREINERT, G. G. *Estudo do comportamento mecânico de solos residuais*. 2021. *Dissertação* (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SEVERO, C. G. S. *et al.* Características dos materiais ativados alcalinamente. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 8, n. 2, p. 55–67, 2013.

SHARIATMADARI, N. *et al.* Compressive strength of sandy soils stabilized with alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 11, 2021.

SHEN, Q. *et al.* Mechanical property enhancement of expansive soil by alkali activated slag. *Materials*, v. 18, n. 4, art. 800, 2025.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). *Relatório anual 2023–2024*. Brasília, 2025.

SOARES, E. M. M. *Melhoria do solo residual granítico com recurso à activação alcalina*. 2013. *Dissertação* (Mestrado) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, 2013.

TERASHI, M.; KITAZUME, M. QA/QC para solos misturados profundos. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*, v. 164, n. 3, p. 161–177, 2011.

WU, D.; WANG, Y.; HU, L. Interfacial characteristics of geopolymers stabilizers with clay mineral. *Applied Clay Science*, v. 250, p. 107286, 2024.

YARAHMADI, A. M. *et al.* Effect of nano CaCO_3 on rutting and fatigue. *Construction and Building Materials*, v. 317, p. 126127, 2022.

YI, Y. *et al.* Comparison of reactive GGBS and Portland cement for soil stabilization. *Applied Clay Science*, v. 111, p. 21–26, 2015.

YU, X. *et al.* Synergistic effects of recycled demolition waste and geopolymers. *Case Studies in Construction Materials*, v. 20, p. e03261, 2024.

ZAREI, S. *et al.* Rutting and cracking mechanisms of semi-flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022.

ZHANG, Y. *et al.* Effects of activator types on degradation mechanisms. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, n. 12, art. 04020369, 2020.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, é apresentada uma revisão da literatura dos principais tópicos pertinentes a este estudo, abrangendo a ativação alcalina e sua aplicação em camadas de pavimentos, bem como o estado de tensões no solo e a Teoria do Shakedown.

2.1 Estabilização de solos

Os solos são materiais utilizados em diversas áreas da engenharia, porém, por vezes, estes não respondem de forma adequada às mais diversas solicitações mecânicas e hidráulicas previstas no projeto. Neste cenário, as técnicas de estabilização ou melhoramento de solos buscam melhorá-los com o intuito de que estes atendam às especificações impostas pelo projeto de engenharia (Arcanjo, 2018; Castro, 2015; Rocha, 2018).

A estabilização de solos pode ser realizada de forma mecânica, física ou química. Quando há estabilização mecânica, o melhoramento das características do solo é realizado através da correção granulométrica do solo e pode ser realizada através da compactação do solo *in situ*. Na estabilização física, a modificação das propriedades do solo é realizada através de calor ou eletricidade. Já nos métodos de estabilização química, há a adição de materiais que levam a uma permanente modificação das propriedades do solo. Neste tipo de estabilização, são utilizados aditivos minerais, como cimento, cal, cloreto de sódio, cinzas volantes, pozolanas verdadeiras, tufos naturais, sílica ativa condensada, escórias metalúrgicas, etc. (Castro, 2015; Pereira, 2014; Rocha, 2018; Silva, 2016).

A aplicação de técnicas de estabilização de solos objetiva beneficiar suas propriedades através do controle da expansibilidade, da redução da permeabilidade e deformabilidade e do aumento da resistência e da durabilidade dos solos, buscando, assim, garantir bom desempenho durante toda vida útil da obra (Silva, 2016).

2.2 Ativação alcalina

2.2.1 Considerações iniciais

Ativação alcalina é o termo genérico que é dado à reação de uma fonte de alumino-silicato sólido (denominado precursor) que, sob condições alcalinas (induzidas por um ativador alcalino), produz um ligante endurecido que é baseado em uma combinação de fases álcali-aluminossilicato hidratadas e/ou álcali-alcalino terroso-aluminossilicato hidratadas (Provis, 2014). Trata-se de um processo químico que permite a transformação de determinadas

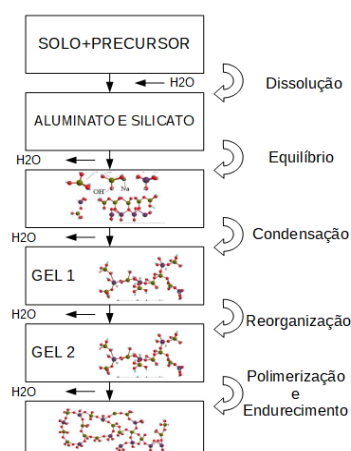
estruturas parcial ou totalmente amorfas em estruturas com propriedades cimentícias (Rios, 2016).

Para o processo de ativação alcalina, é necessário um ambiente fortemente alcalino, o que é obtido através de soluções alcalinas denominadas ativadoras. Nestes ambientes, há a dissolução da sílica (SiO_2) e da alumina (Al_2O_3) presentes nos precursores, e, ao longo do tempo, estas coagulam e dão origem a núcleos maiores. Em termos mecânicos, o aumento do núcleo traduz-se num incremento de magnitude das propriedades mecânicas, o qual cessa quando não é permitida mais a expansão dos núcleos (Arcanjo, 2018; Pereira, 2014).

A Figura 2.1 representa o modelo conceitual do processo de ativação alcalina. Este modelo assume que o processo começa com a dissolução dos materiais de origem pela solução alcalina, o que causa a quebra da ligação aluminossilicato e libera sílica e alumina, principalmente nos materiais de origem (Abdila *et al.*, 2021; Aziz *et al.*, 2019). A carga negativa da cadeia de aluminossilicato é equilibrada por cátions alcalinos, como potássio, sódio ou cálcio. Assim, o conteúdo de sílica e alumina no material de origem tem um efeito significativo que governa o desempenho do geopolímero (Abdila *et al.*, 2021; Thomas *et al.*, 2018).

Além disso, a taxa de dissolução aumenta à medida que a alcalinidade da solução aumenta. Esta taxa controla o tempo necessário para atingir a saturação, após o que uma solução supersaturada de aluminossilicato é alcançada. Em seguida, inicia-se o processo principal de condensação, e o gel de aluminossilicato, na forma de oligômeros, precipita para produzir redes maiores e mais estáveis (Abdila *et al.*, 2021).

Figura 2.1 Modelo conceitual da reação de ativação alcalina



Fonte: Adaptado de Arcanjo (2018).

2.2.2 Mecanismo de reação

Nas discussões sobre a química dos ligantes ativados por álcalis, é fundamental classificar esses sistemas com base no tipo de gel predominante na estrutura. Essa classificação depende principalmente do teor de cálcio presente. Os produtos principais da reação podem ser géis do tipo gel aluminossilicato de sódio hidratado (NASH), quando há baixo teor de cálcio, ou géis do tipo aluminossilicato de cálcio hidratado (CASH), quando o teor de cálcio é elevado (Provis; Bernal, 2014). Os produtos representados pela estrutura química aluminossilicato de sódio hidratado (NASH) requerem condições de síntese agressivas, como um meio altamente alcalino e temperatura elevada (Garcia - Lodeiro *et al.*, 2015).

Há, ainda, o modelo (N, C)-ASH que é formado como resultado da ativação alcalina de uma certa quantidade de material aluminossilicato (por exemplo, cinza volante) misturado com um componente à base de cálcio (por exemplo, escória). Quando esses materiais sofrem a geopolimerização, o modelo (N, C)-ASH é produzido pela combinação de dois géis, ou seja, aluminossilicato de sódio hidratado (NASH) e aluminossilicato de cálcio hidratado (CASH). Ao contrário do modelo NASH, o modelo (N, C)-ASH não requer condições de síntese agressivas, como um meio altamente alcalino e temperatura elevada, pois funciona em temperatura ambiente e condições de baixa alcalinidade (Abdullahe *et al.*, 2020).

2.2.2.1 Modelo - geopolímero NASH

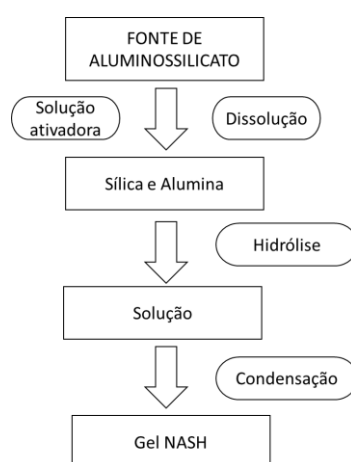
O modelo de geopolímero NASH para estabilização de solos compreende uma mistura de material de aluminossilicato com baixo teor de cálcio e um ativador à base de sódio. Quando o material de aluminossilicato entra em contato com um ativador alcalino, a reação de geopolimerização começa imediatamente (Abdullah; Shahin; Walske, 2020; Duxson *et al.*, 2006). A geopolimerização envolve as seguintes etapas (Figura 2.2):

- 1- Dissolução: nessa etapa, os compostos de aluminossilicato presentes no precursor dissolvem-se na solução ativadora alcalina em níveis de pH elevados. A quebra das ligações Si-O e Al-O requer um ambiente altamente alcalino, e isso é alcançado pela liberação de íons OH^- durante a reação dos ativadores com H_2O (Yi *et al.*, 2014; Provis *et al.*, 2015; Reddy *et al.*, 2024). Os produtos finais desta etapa são íons aluminato (Al^{+3}) e silicato (Si^{+4}) altamente reativos (Reddy *et al.*, 2024; Shariatmadari *et al.*, 2021; Weng; Sagoe, 2007);
- 2- Hidrólise: as reações de hidrólise dos íons aluminato (Al^{+3}) e silicato (Si^{+4}) ocorrem com a dissolução dos compostos de aluminossilicato na solução ativadora, resultando

na formação de íons silicato e aluminato hidrolisados (Pourakbar *et al.*, 2017; Reddy *et al.*, 2024);

- 3- Condensação: o mecanismo de condensação ocorre por meio da substituição nucleofílica, com a qual o pH diminui e os produtos de hidrólise dos íons aluminato e silicato formados durante a etapa de hidrólise condensam-se em um gel de aluminossilicato amorfo (Mohammadini *et al.*, 2018).

Figura 2.2: Diagrama esquemático do modelo de geopolímero de aluminossilicato de sódio hidratado (NASH).



Fonte: (Abdullah; Shahin; Walske, 2020)

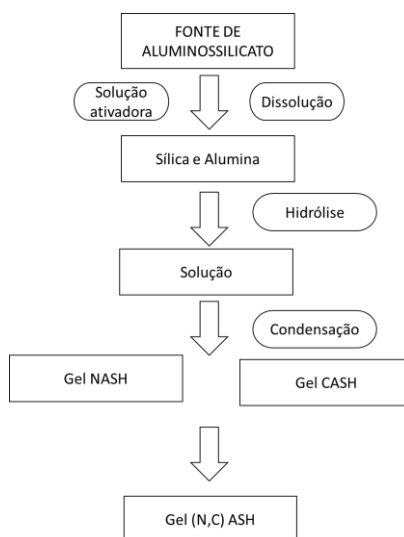
2.2.2.2 Modelo - geopolímero (N, C) -ASH

A utilização de componentes à base de cálcio como materiais suplementares para misturas de geopolímeros por meio do modelo (N, C)-ASH envolve reações mais complexas do que o modelo NASH. Os produtos de geopolimerização consistem em multigéis (ou seja, CASH e NASH), cada um reagindo em taxas diferentes (Abdullah; Shahin; Walske, 2020; Yip *et al.*, 2005).

Lodeiro *et al.* (2013) descreveram os estágios de ativação do modelo (N, C)-ASH usando uma mistura de cinzas volantes e cimento Portland comum como fonte de cálcio. Os autores informaram que o modelo envolve as seguintes etapas: (1) dissolução de componentes de aluminossilicato e cálcio na solução alcalina, por meio da ruptura das ligações Si-O-Si e Al-O-Al nas cinzas volantes, e das ligações Ca-O e Si-O no material à base de cálcio (cimento Portland comum); (2) formação do gel NASH a partir do Na^+ e silício, bem como das espécies dissolvidas de alumínio, e do gel CSH a partir das espécies dissolvidas de cálcio e silício; (3)

desenvolvimento dos géis NASH e CSH através da absorção de mais silício no sistema; (4) difusão do alumínio e cálcio através da matriz cimentícia, resultando na formação do gel (N, C)-ASH, de estrutura tridimensional.

Figura 2.3: Diagrama esquemático do modelo do geopolímero (N, C)-ASH.



Fonte : (Abdullah; Shahin; Walske, 2020)

2.2.3 Ativador

Segundo Palomo *et al.* (1999), a ativação alcalina é um processo químico que transforma estruturas vítreas em compostos compactos e com características cimentantes. No processo de ativação alcalina, é necessário um ambiente fortemente alcalino para que haja a dissolução da sílica e da alumina presentes nos precursores. Este ambiente é obtido através de soluções alcalinas denominadas ativadoras (Arcanjo, 2018; Pereira, 2014). Eles têm a função de acelerar a dissolução dos aluminossilicatos do precursor, favorecer a formação de hidratos de baixa solubilidade e favorecer a formação de uma estrutura compacta com esses hidratos formados (Puertas, 1995).

A reologia da mistura em seu estado fresco e a estrutura e propriedades do material álcali ativado em seu estado endurecido são significativamente influenciadas pelo tipo e dosagem do ativador (Zhang *et al.*, 2016). Devido às propriedades hidráulicas dos precursores, as reações de hidratação ocorrem em uma taxa muito lenta (Reddy *et al.*, 2024; Song *et al.*, 2000). As camadas de aluminossilicato presentes na superfície desses materiais absorvem íons H^+ e liberam íons OH^- , entretanto o aumento do pH devido a esse processo não é suficiente para

quebrar as ligações Si-O e Al-O para as reações posteriores, pois elas requerem um ambiente muito alcalino (Reddy *et al.*, 2024; Yi *et al.*, 2014). Nesses casos, ativadores alcalinos desempenham um papel importante no aumento do pH geral do sistema, tornando a sílica e a alumina presentes nesses compostos reativas.

O início da reação de ativação alcalina se dá com a dissolução provocada pelos ativadores, dos quais os mais utilizados são o hidróxido de sódio, o carbonato de sódio e os silicatos de sódio ou de potássio (Castro, 2015). Estes ativadores podem ser usados individualmente ou em conjunto. O hidróxido garante uma alta alcalinidade da solução, enquanto o silicato solúvel fornece mais SiO₂ ao sistema (Rocha *et al.*, 2018). O uso de compostos, como carbonato de sódio (Na₂CO₃) e sulfato de sódio (Na₂SO₄), também pode ser eficaz para ativar precursores ricos em cálcio, como as escórias (Abdalqader *et al.*, 2016; Humad *et al.*, 2018).

Uma mistura amplamente utilizada como ativador é a solução de silicato de sódio (Na₂SiO₃) e hidróxido de sódio (NaOH) (Abdila *et al.*, 2021; Abdullah; Ahmad, 2017; Sharma; Kumar, 2020; Sihag *et al.*, 2021; Tigue *et al.*, 2018). Essa solução contém íons hidróxido (OH⁻) e íons sódio (Na⁺) que desencadeiam a reação entre os componentes internos de silicato (Si) e aluminato (Al), iniciando o processo de dissolução (Abdila *et al.*, 2021; Abdullah; Ahmad, 2017; Parhi *et al.*, 2018; Sharma; Kumar, 2020; Sihag *et al.*, 2021). A reação do silicato de sódio (Na₂SiO₃) para promover a álcali ativação é crucial na dissolução do Si, enquanto a concentração de hidróxido de sódio (NaOH) também é determinante para garantir a resistência adequada da mistura álcali ativada (Abdila *et al.*, 2021; Abdullah; Ahmad, 2017; Parhi *et al.*, 2018; Sharma; Kumar, 2020; Sihag *et al.*, 2021).

A concentração da solução desempenha um papel crucial e tem um impacto direto nas características do material álcali ativado. A molaridade da solução tem um efeito substancial na trabalhabilidade, no processo de ativação alcalina e na progressão geral da resistência final (Abdila *et al.*, 2021; Ghugal, 2013; Trinh *et al.*, 2018; Xie; Kayali, 2016).

De uma forma geral, os cátions presentes no ativador (Me⁺) têm a dupla função de manter os níveis de pH do sistema e fazer parte da estrutura do gel. Eles neutralizam as cargas elétricas quando um tetraedro de sílica (SiO₄⁻) é substituído por um tetraedro de alumínio (AlO₄⁻) no processo de formação dos produtos de reação (Shi *et al.*, 2006). Já os íons OH⁻ têm função de catalisar a dissolução dos cátions Si⁴⁺ e Al³⁺, induzindo a quebra das ligações covalentes Si-O-Si e Si-O-Al que ocorre com o aumento do pH (Garcia-Lodeiro *et al.*, 2015).

A Tabela 2.1 indica artigos consultados, indicando os materiais utilizados como ativadores para a produção de solos estabilizados via ativação alcalina.

Tabela 2.1: Estudos de projetos de dosagens de solos estabilizados via ativação alcalina

Referências	Ativador	Concentração Molar	Resultados
Sihag; Suthar; Mohanty (2021)	Silicato de sódio (Na_2SiO_3) Hidróxido de sódio (NaOH)	10 M, 12 M e 14 M	Os autores avaliaram o efeito da concentração molar de NaOH para solo estabilizado via ativação alcalina utilizando cinzas volantes como precursor. O estudo encontrou a concentração molar ótima de 12 M.
Parhi <i>et al.</i> (2018)	Silicato de sódio (Na_2SiO_3) Hidróxido de sódio (NaOH)	10 M, 12,5 M e 15 M	Os autores investigaram a estabilização do solo com o uso de um geopolímero à base de cinza volante ativado por álcali. As amostras de 10M apresentaram resistências maiores que as amostras de 12,5 M e 15 M
Cristelo <i>et al.</i> (2013)	Silicato de sódio (Na_2SiO_3) Hidróxido de sódio (NaOH)	10 M, 12,5 M e 15 M	Os autores avaliaram os efeitos de cinzas volantes na ativação alcalina para estabilização dos solos. O estudo mostrou que a concentração de hidróxido de sódio é um fator importante no desenvolvimento da resistência. No entanto, determinou um limite de 12,5 M, uma vez que uma concentração de 15 M resultou em substancial dificuldade de mistura.
Sukprasert <i>et al.</i> (2019)	Hidróxido de sódio (NaOH)	5 M e 15 M	Os autores estudaram à base de cinza volante e escória de alto-forno e identificaram que a resistência à compressão simples (RCS) aumentou com o aumento da concentração de NaOH.
Adhikari <i>et al.</i> (2019)	Silicato de sódio (Na_2SiO_3) Hidróxido de sódio (NaOH)	3 M - 12 M	Os autores investigaram a estabilização de dois solos, um argiloso e um siltoso. Verificou-se que a concentração do ativador teve um efeito significativo na RCS de solos argilosos alcali ativados.
Rios <i>et al.</i> (2017)	Silicato de sódio (Na_2SiO_3) Hidróxido de sódio (NaOH)	5 M – 12,5 M	O aumento da concentração de NaOH resultou em aumento progressivo na RCS.
Phetchuay <i>et al.</i> (2016)	Silicato de sódio (Na_2SiO_3) Hidróxido de sódio (NaOH)	3 M – 18 M	Verificou-se que concentrações muito elevadas (acima de 15 M) dificultam a trabalhabilidade. A concentração ideal depende do tipo de solo.

Arcanjo (2018) afirma que a solução alcalina possui papel fundamental na resistência mecânica dos compostos, sendo que sua escolha depende de fatores, como o custo dos materiais empregados e sua reatividade. Xu e Van Deventer (2000) mostraram que a adição de uma

solução de silicato de sódio com hidróxido de sódio como ativador alcalino é ideal para uma reação de ativação alcalina. O hidróxido de sódio é responsável pela dissolução das matérias-primas, e o silicato de sódio funciona como ligante, promovendo a reorganização da estrutura (Yang *et al.*, 2008). Cristelo *et al.* (2013) mostraram que a concentração de hidróxido de sódio influencia na resistência à compressão simples.

Soutsos *et al.* (2016) mostraram que um aumento na dosagem de álcali [proporção em massa de óxido de sódio (Na_2O) na solução de ativação para o precursor] resultou em um aumento da resistência à compressão. Os autores concluíram ainda que o módulo alcalino (razão em massa de óxido de sódio para sílica na solução de ativação) possui uma faixa ótima de valores, maximizando a resistência mecânica.

2.2.4 Precursor

2.2.4.1 Considerações iniciais

Segundo Pacheco-Torgal *et al.* (2008), qualquer material rico em sílica, alumina e cálcio pode ser ativado alcalinamente, materiais estes que são denominados precursores. Entre os precursores mais utilizados em trabalhos de investigação, estão a escória de alto forno, o metacaulim e as cinzas volantes, que são resíduos provenientes da indústria de mineração e de usinas termoeletricas (Castillo *et al.*, 2021; Farhan *et al.*, 2020).

Algumas características dos precursores influenciam no processo de ativação alcalina. Santos (2017) afirma que as características intrínsecas dos materiais, como o formato e a distribuição de partículas, a presença de impurezas e a finura, interferem diretamente no grau de polimerização. Segundo Rodrigues (2015), uma maior finura das partículas leva a uma maior superfície específica, o que acarreta na aceleração da hidratação da reação. De acordo com o mesmo autor, as substâncias reativas mais importantes num dado material para a produção de um ligante ativado alcalinamente são as sílicas e as aluminas. Sendo assim, é preciso garantir que a reatividade de um dado material seja suficiente para que possa ser usado como precursor.

2.2.4.2 Escória de Aciaria Elétrica Primária

A escória de aciaria elétrica primária é obtida em fornos elétricos e conversores a oxigênio, onde é realizada a fusão de ferro gusa com a sucata. No ano de 2022, a produção de ferro gusa alcançou 32,5 milhões de toneladas, sendo 24,7 milhões produzidos a coque e, em média, 7,8 milhões produzidos a carvão vegetal (SINDIFER, 2023). Estima-se que, para cada tonelada de

aço produzido, gera-se, aproximadamente, 140 kg de escória de aciaria (Castelo Branco, 2004; Freitas; Motta, 2008).

De forma geral, a produção do aço é composta pelas etapas de refino, lingotamento e laminação. No caso das usinas com conversor a oxigênio, é adicionada a etapa de redução. Durante essa cadeia produtiva, são obtidos diversos resíduos, como a escória de alto forno, no processo de redução, etapa onde o minério de ferro é transformado em ferro gusa. Já no momento do refino, fusão do ferro gusa e dos materiais metálicos para a obtenção do aço, são obtidas duas escórias: a de aciaria, durante o processo inicial, e a de forno panela, no refino secundário. Devido ao processo produtivo, a escória de aciaria possui algumas características próprias, como a superfície rugosa e elevada massa (Costa, 2019; Toffolo, 2015). Além disso, no refino, são adicionados fundentes, como calcário e dolomita, para eliminar as impurezas do aço (enxofre e fósforo). A consequência é que as escórias geradas possuem teores significativos de CaO e MgO (Costa, 2019).

A existência de teor de cálcio (CaO) em precursores contribui para o encurtamento do tempo de pega e desenvolvimento da resistência à compressão (Abdila *et al.*, 2021; Oormila; Preethi, 2014; Sharma; Kumar, 2020; Singhi; Laskar, 2016; Thomas *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020). A reação entre um precursor com alto teor de cálcio e a solução do ativador alcalino forma um gel de aluminossilicato de cálcio hidratado (CASH) dentro da matriz do geopolímero. Esses produtos de hidratação, juntamente com a estrutura de aluminossilicato, contribuem significativamente para elevados ganhos de resistência (Abdila *et al.*, 2021; Aziz *et al.*, 2019).

2.2.4.3 Cinzas Volantes

As cinzas volantes são o material fino resultante da queima de vários tipos de carvão, composto principalmente por esferas ocas de silício, alumínio, óxidos ferrosos e carbono não oxidado. Essas partículas têm propriedades semelhantes às de um silte fino de comportamento não plástico (Çokça, 2001).

As cinzas volantes podem ser categorizadas em duas classes (Classe C ou Classe F), dependendo do tipo de carvão utilizado durante o processo de queima. As cinzas Classe C são normalmente obtidas através da queima de carvões sub-betuminosos ou lignitos, caracterizando-se por apresentarem teores mais elevados de CaO (superiores a 20%). Em contrapartida, as cinzas Classe F são produzidas pela queima de carvões betuminosos ou antracitos e possuem teores de CaO mais baixos (inferiores a 10%) (Kim; Prezzi, 2008).

De acordo com Cristelo *et al.* (2013), embora o ativador alcalino seja capaz de reagir com diferentes tipos de cinza volante, a classe F apresenta desempenho superior em termos de ganho de resistência quando comparada à classe C. Esse comportamento é atribuído ao maior teor de sílica e alumina presente na classe F, o que favorece a formação de produtos cimentantes em maior quantidade, resultando em uma estrutura do solo mais consolidada.

Diversos fatores afetam as características das cinzas volantes quando utilizadas como precursores de processos de ativação alcalina. A finura das cinzas volantes é geralmente medida pela distribuição do tamanho das partículas e área superficial específica, afetando a reatividade e a processabilidade da mistura. As cinzas volantes mais finas têm uma área de superfície maior disponível para reação com ativadores alcalinos, o que pode levar a uma maior resistência mecânica (Firdaus; Daud., 2017; Jamkar *et al.*, 2013).

A composição química das cinzas volantes afeta diretamente o desempenho dos geopolímeros, sendo fundamental o conteúdo de sílica reativa durante a ativação das cinzas volantes. Cinzas com maior proporção de sílica ativa produzem maior resistência mecânica, pois reagem com alumina e álcalis para formar um material gelificado (Fernández-Jiménez; Palomo, 2009).

2.2.5 Dosagem de mistura solo-álcali-ativado

A ativação alcalina é influenciada por diversos elementos, tais como o ativador alcalino utilizado, sua concentração e a matéria-prima empregada como fonte de aluminossilicatos. É essencial compreender e analisar esses fatores a fim de identificar a combinação mais adequada de reagentes para a solução alcalina de ativação (Castro, 2015; Chen *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020). Devido ao fato de que o processo de ativação alcalina envolve uma ampla gama de parâmetros, o desenvolvimento de um procedimento de dosagem padrão é complexo, encontrando-se ainda em seu estágio elementar (Farhan *et al.*, 2020). A maioria dos estudos de projeto são baseados em parâmetros críticos que avaliam principalmente sua resistência à compressão (Adikari *et al.*, 2021; Aouan *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2021). A Tabela 2.2 detalha os critérios de projeto e parâmetros adotados em estudos de projetos de solos álcali-ativados.

Tabela 2.2: Estudos de projetos de dosagens de solos estabilizados via ativação alcalina

Referência	Precursor	Parâmetros de entrada	Parâmetro de Saída
Shariatmadari <i>et al.</i> (2021)	Cinza vulcânica	Razão Precursor/Solo; concentração do ativador alcalino, proporções de álcali para aglutinante	RCS
Leong <i>et al.</i> (2018)	Cinza volante	Porcentagens de cinzas volantes em relação ao solo e as proporções de silicato para hidróxido	RCS
Rezazadeh Eidgahee <i>et al.</i> (2020)	Escória granulada moída de alto-forno	Índice de plasticidade do solo, porcentagem de escória de alto-forno moída granulada em relação ao solo, concentração molar de ativador, razões Na/Al e Si/Al	RCS
Maheepala <i>et al.</i> (2023)	Cinzas volantes	Teores de cinzas volantes em relação ao solo, razão $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	RCS
Abdulwahed; Aljanabi; Abdulkareem (2022)	RAP e cinzas volantes	Razão Precursor/Solo; razões de massa de RAP/Cinzas volantes)	MR
Adhikari <i>et al.</i> (2019)	Cinzas volantes	Teores de cinzas volantes em relação ao solo, razão $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ e Concentração de NaOH	RCS
Mozumder e Laskar (2015)	Escória granulada moída de alto-forno e cinzas volantes	Limite de liquidez, índice de plasticidade, porcentagem de escória de alto forno, porcentagem de cinza volante, concentração molar, razão Na/Al e Si/ Al	RCS
Yilmaz <i>et al.</i> (2023)	Cinza volante	Teor de cinza volante, teor de ativador	RCS

2.2.6 Vantagens do tratamento de solos através da ativação alcalina

De acordo com Castro (2015), o cimento Portland é um dos materiais mais utilizados no processo de estabilização química dos solos, produzindo resultados benéficos no que se refere à resistência mecânica dos materiais. Em contraponto, sua produção gera problemas ambientais, tais como emissão de gases poluentes (óxido de enxofre, óxido de nitrogênio, monóxido de carbono), interferência nos *habitats* e na biodiversidade das margens dos cursos d'água onde é

extraída a argila, além de desmoronamento e erosão das pedreiras durante a extração do calcário.

A ativação alcalina ainda conduz a materiais mais resistentes do ponto de vista mecânico, com maior durabilidade e estabilidade, e que atingem esse grau de comportamento mais rapidamente que os materiais fabricados com a utilização do cimento Portland (Pereira, 2014).

Camacho *et al.* (2016) estudaram o potencial de utilização de um aglomerante à base de aluminossilicatos ativados alcalinamente incorporado a dois tipos de solos, areno-argiloso e areno-siltoso, constatando-se um aumento de resistência à compressão dos solos ativados alcalinamente. Cristelo, Glendinning e Pinto (2011) estudaram o uso da ativação alcalina para a melhoria de solos moles e constataram uma melhoria da resistência do solo estudado. Castro (2015) estudou formas de evitar a liquefação de um solo arenoso através da sua estabilização química. Neste estudo, verificou-se um aumento da resistência da mistura melhorada, uma vez que esta não se liquefez.

Segundo Pinto (2006), quando os geopolímeros alcançam a fase de endurecimento rapidamente, são amorfos ou muito pouco cristalinos, o que faz com que os vazios sejam de pequena dimensão, concluindo então que, se o processo de cura/endurecimento for acelerado e acima da temperatura ambiente, a estrutura do geopolímero fecha-se ainda mais e torna-se quase impermeável em condições de pressão normal.

Li *et al.* (2019) verificaram o efeito da ativação alcalina na estabilização de um solo contaminado com cromo. Os pesquisadores adicionaram cal hidratada e metassilicato de sódio ao solo e realizaram testes de lixiviação, resistência à compressão e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados indicaram que a ativação alcalina reduziu a lixiviação de cromo, melhorou a resistência à compressão do solo e reduziu a porosidade, indicando uma maior densidade do solo.

Qiu *et al.* (2019) investigaram o potencial de aproveitamento de um geopolímero baseado em cinzas volantes/escória de alto forno como um novo material de enchimento e concluíram que a sua resistência à compressão depende da concentração de NaOH e dos tipos de materiais de origem. Rios *et al.* (2016) estudaram a ativação alcalina de cinzas volantes para melhorar o desempenho mecânico de uma areia siltosa. Os testes de compressão uniaxial mostraram que a resistência foi aumentada com a adição deste novo ligante. Os resultados descreveram um material de alta rigidez, com redução de volume inicial seguida de dilatação significativa. A principal diferença entre os dois ligantes foi a taxa de cura, com as amostras ativadas por álcali mostrando um aumento de resistência mais progressivo e duradouro.

Miraki *et al.* (2022) estudaram o potencial do uso de escória de alto forno granulada moída ativada por álcali e cinza vulcânica como ligantes em projetos de estabilização de solo argiloso. Os resultados demonstraram que a coexistência de escória de alto forno e cinza vulcânica no processo gerou uma geopolimerização mais efetiva. Por fim, um estudo realizado por Kim *et al.* (2021) avaliou o efeito da ativação alcalina na melhoria das propriedades mecânicas de um solo argiloso. Os pesquisadores adicionaram cal hidratada, cinza volante e metacaulim ao solo e realizaram testes de compressão não confinada e de cisalhamento direto. Os resultados indicaram que a ativação alcalina aumentou a resistência do solo e reduziu sua compressibilidade.

Em resumo, os estudos apresentados indicam que a ativação alcalina pode ser uma técnica eficaz para melhorar as propriedades geotécnicas dos solos. A adição de materiais alcalinos pode aumentar a resistência do solo, reduzir sua compressibilidade e melhorar sua capacidade de suporte de carga.

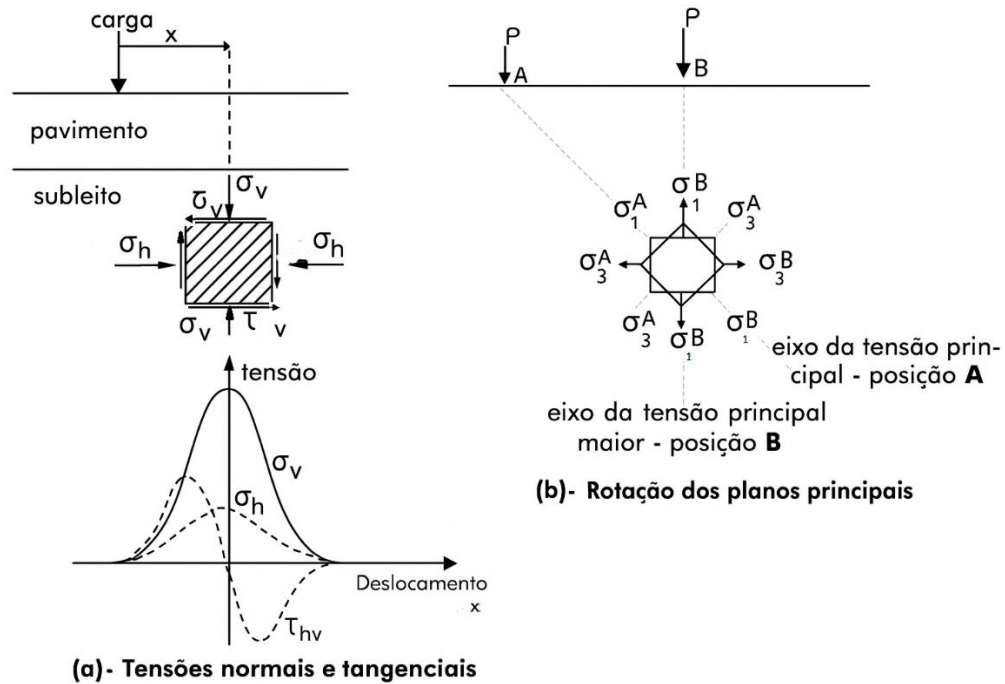
2.3 Estado de Tensões no Pavimento

O estado de tensões desenvolvido no interior de um pavimento em resposta às cargas de tráfego é altamente complexo. Cada elemento da estrutura é submetido a sucessivos pulsos de carregamento, compostos por componentes de tensão vertical, horizontal e de cisalhamento (Lekarp *et al.*, 1996; Schreinert, 2021). Essas tensões são transitórias e variam ao longo da passagem da carga, isto é, da movimentação da roda do veículo (Lekarp *et al.*, 1996).

Tal estado de tensões depende do comportamento mecânico de cada camada do pavimento e do sistema estratificado formado por essas camadas, principal aspecto estudado pela Mecânica dos Pavimentos (Medina, 2006; Santos *et al.*, 2020). Para Silva (2014), o desafio da Mecânica dos Pavimentos está em compatibilizar o estado de tensões e deformações atuantes no pavimento com o estado de tensões e deformações admissíveis para uma determinada vida de projeto.

A Figura 2.4 ilustra as tensões atuantes em um elemento de uma camada de pavimento em função da posição de uma carga móvel. Quando a carga se encontra exatamente acima do elemento, atuam as tensões normais principais e, nessa condição, as tensões de cisalhamento são nulas. Entretanto, à medida que a carga se desloca, ocorre a rotação dos planos principais, passando a existir tensões cisalhantes, cujos valores podem ser determinados por meio do círculo de Mohr (Medina; Motta, 2015).

Figura 2.4: Variações de tensões causadas por uma carga móvel



Fonte: Adaptado de Medina e Motta (2015)

2.4 Módulo de Resiliência

Em Mecânica dos Pavimentos, o Módulo de Resiliência (MR) é definido como a relação entre a tensão cíclica aplicada e a deformação elástica ou recuperável do material. Trata-se de um parâmetro utilizado para caracterizar o comportamento elástico de materiais, como solos e britas, tanto em ensaios de laboratório quanto sob a ação repetida das cargas dos veículos atuantes sobre o pavimento (Norback; Motta, 2018). Por definição, o MR é considerado o principal parâmetro representativo do comportamento elástico dos materiais submetidos a carregamento cíclico (Schreinert, 2021). Segundo Li e Selig (1994), em outras palavras, o MR fornece uma medida da rigidez elástica de solos e agregados, de modo que quanto maior a deformabilidade do material, menor será o seu módulo de resiliência.

Na maioria dos casos, os estudos avaliam de forma separada o desempenho elástico, representado pelo módulo de resiliência (MR), e o acúmulo de deformação permanente sob carregamento cíclico (Lekarp *et al.*, 2000a, 2000b; Mishra; Tutumluer, 2012; Rondón-Quintana; Reyes-Lizcano, 2022). O MR está associado à rigidez elástica do material, uma vez que, em cada ciclo de carregamento, a deformação permanente é pequena quando comparada à deformação resiliente. Entretanto, é amplamente reconhecido que o MR não pode ser utilizado

como um parâmetro único para avaliar o desempenho de materiais sob carregamento cíclico, uma vez que: (i) a relação entre deformação resiliente e deformação permanente não é constante, variando com o nível de tensão aplicado (Nazzal *et al.*, 2020); (ii) a deformação permanente deve ser avaliada conjuntamente com as deformações resilientes (Soliman; Shalaby, 2015; Xiao *et al.*, 2018b); e (iii) nem sempre existe correlação direta entre o MR e o acúmulo de deformação permanente (Kwon *et al.*, 2017; Osouli *et al.*, 2021a; Xiao; Tutumluer, 2016).

Além disso, a resposta resiliente expressa pelo MR está principalmente associada aos mecanismos de fissuração por fadiga da superfície asfáltica, enquanto a formação de trilhas de roda está relacionada ao acúmulo de deformação permanente. Assim, a avaliação desses dois tipos de deterioração deve ser baseada nas deformações desenvolvidas na plataforma do pavimento, especialmente nas camadas granulares (Rondón-Quintana; Martínez; Lizcano, 2025).

A obtenção do módulo de resiliência é realizada por meio de ensaios triaxiais de carga repetida, os quais têm por finalidade reproduzir, em laboratório, as condições de carregamento impostas pelo tráfego à estrutura do pavimento em campo (Cabral, 2021). O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) é conduzido com o objetivo de avaliar a parcela recuperável da deformação do material, bem como a rigidez de amostras de solo compactado. Diversos modelos matemáticos estão disponíveis para a determinação dos parâmetros do MR, incluindo modelos que analisam o módulo em função da tensão de confinamento (Biarez, 1962), da tensão desvio (Svenson, 1980), modelos compostos que consideram ambas as tensões (Pezo, 1982) e o modelo universal, que incorpora invariantes de tensão e a tensão de cisalhamento octaédrica (AASHTO, 2004).

2.5 Deformação Permanente

Um dos principais tipos de desgaste estrutural em pavimentos é a deformação permanente (DP), fenômeno no qual os materiais do pavimento, após serem submetidos a repetidos ciclos oriundos do carregamento do tráfego, sofrem deformações irreversíveis (Guimarães, 2001; Hua; White, 2002; Kim *et al.*, 2009; Motta, 1991). A deformação permanente pode resultar na perda de qualidade do pavimento em relação ao rolamento, ocorrendo comumente onde este apresenta baixa capacidade de suporte das camadas. Ademais, com o acúmulo de água, ocorre a perda de capacidade de drenagem lateral do pavimento, ocasionando problemas de segurança para o usuário (Bastos, 2024; Barksdale, 1972; Balbo, 2015; Bernucci *et al.*, 2008).

Segundo Lima (2016), a deformação permanente dos materiais de pavimentação está diretamente relacionada à história de tensões e tem origem, de acordo com a Mecânica dos Pavimentos, na flexão repetida e pela compressão do tráfego que geram uma deformação total na estrutura, desmembrada em duas parcelas: deformação elástica ou resiliente e deformação plástica ou permanente. Em outras palavras, a deformação permanente é a parcela do deslocamento que não retorna após cessar a aplicação de carga à sua posição inicial anterior à solicitação (Lima, 2020).

2.6 Teoria do Shakedown

Após um elevado número de ciclos de carregamento em obras de pavimentação, a deformação permanente pode evoluir para dois comportamentos distintos: ruptura ou estabilização. Quando essa estabilização ocorre após certo número de ciclos, ela é denominada Shakedown (Bastos, 2024).

Segundo Guimarães (2001), a Teoria do Shakedown avalia se a DP acumulada na estrutura tende a conduzir o material à ruptura ou se evolui para um estado estabilizado após repetidos ciclos de carregamento. Werkmeister *et al.* (2001) definem o Shakedown como o ponto limite a partir do qual ocorre a estabilização da DP. Ultrapassado esse limite, o material passa a apresentar apenas comportamento elástico. Assim, a Teoria do Shakedown descreve a condição em que a deformação permanente se torna estável após determinado número de ciclos, passando o material a responder elasticamente (Sharp; Brooker, 1984; Werkmeister *et al.*, 2001).

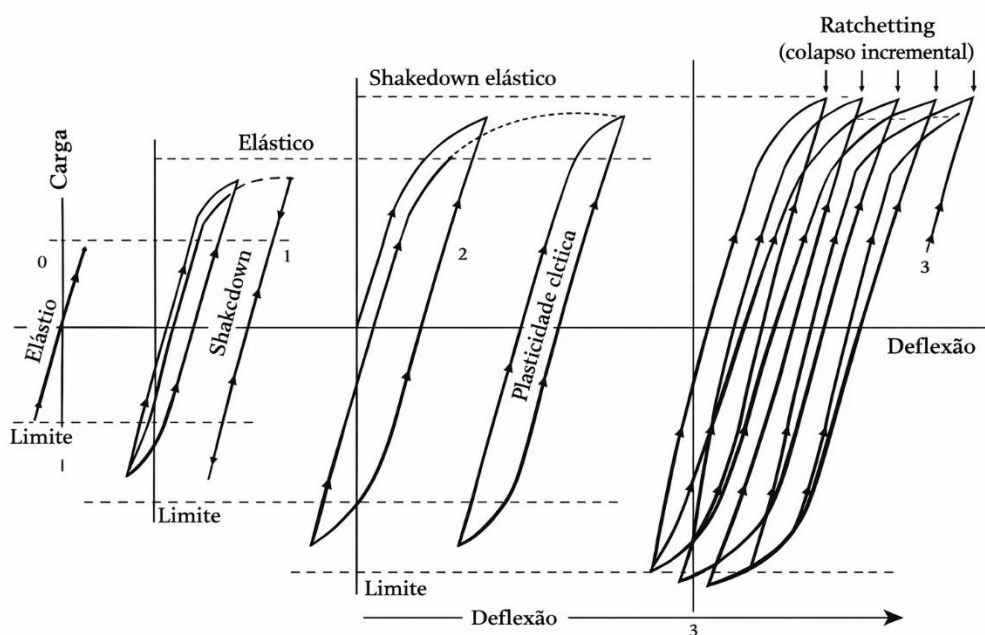
De acordo com Medina e Motta (2015), essa estabilização ocorre quando o corpo desenvolve um campo autoequilibrado de tensões residuais que passa a interagir com as tensões aplicadas em cada ciclo. Dependendo dos parâmetros de escoamento plástico do material, das tensões aplicadas e de outros fatores intervenientes, essas tensões residuais podem atingir intensidade suficiente para impedir que as tensões externas ultrapassem o limite de elasticidade do material. Nessa condição, as respostas tornam-se estritamente elásticas.

De acordo com Qian *et al.* (2016), a utilização da Teoria do Shakedown é um meio efetivo de prever o número de ciclos máximo de carregamento a que o pavimento pode ser submetido até que ocorra a ruptura ou excesso de afundamento.

A Teoria do Shakedown ou da acomodação plástica tem sido amplamente adotada para caracterizar a resposta de solos sob carregamento cíclico (Chen *et al.*, 2019). Essa teoria agrupa o comportamento de deformação em quatro categorias, identificadas na Figura 2.5: puramente

elástico (0), Shakedown elástico (1), Shakedown plástico (2) e colapso incremental (*ratchetting*) (3) (Werkmeister *et al.*, 2001).

Figura 2.5: Comportamentos de materiais sob cargas cíclicas segundo o conceito original da Teoria do Shakedown



Fonte: Adaptado de Johnson (1986)

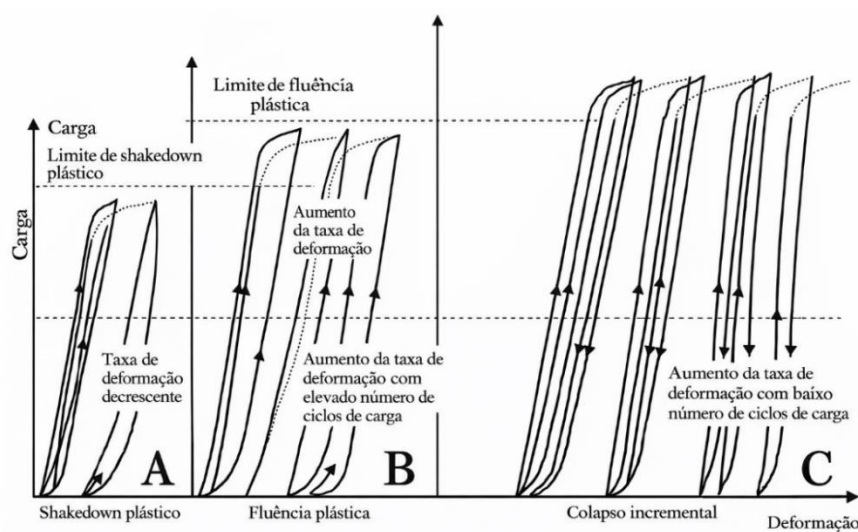
A resposta elástica pode ser observada nos comportamentos 0 e 1. No comportamento 0, denominado puramente elástico, há retorno total das deformações ao cessar a carga. Já o comportamento 1 sofre acúmulo inicial de deformação permanente além da resposta elástica, sendo por isso conhecido como Shakedown elástico.

O comportamento 2, denominado Shakedown plástico, corresponde à condição em que a estrutura alcança Shakedown após um número finito de aplicações de carga. Nesse caso, as tensões residuais tornam-se constantes e não há aumento adicional de deformação permanente, passando o material a apresentar comportamento puramente elástico, semelhante ao tipo 0, ou seja, ocorre acomodação.

O comportamento 3, no qual não há Shakedown, apresenta um “ciclo aberto”, indicando aumento contínuo da deformação plástica até ocasionar a perda da serventia estrutural do pavimento. O *ratchetting* leva à ruptura em um curto período de tempo (Werkmeister *et al.*, 2001).

Na prática da pavimentação, conforme mostrado na Figura 2.6, o comportamento 0 pode ser desconsiderado, restando apenas os comportamentos 1, 2 e 3. Segundo Werkmeister (2003) e Guimarães (2009), o comportamento puramente elástico não representa adequadamente os solos, e não há registros de materiais de pavimentação apresentando esse tipo de resposta.

Figura 2.6: Comportamentos de materiais sob cargas cíclicas segundo a perspectiva dos estudos de Werkmeister *et al.* (2001)



Fonte: Adaptado de Werkmeister *et al.* (2001)

Para a seleção de materiais adequados para infraestruturas de transporte, recomenda-se que o material apresente comportamento dentro da Faixa A, ou, em alguns casos, da Faixa B, ao longo da vida útil. Materiais que se enquadram na Faixa C podem induzir recalques inesperados ou falhas na estrutura devidos ao acúmulo excessivo de deformação plástica, como trilhas de roda, fissuras na superfície do pavimento ou recalque diferencial em sistemas ferroviários. Portanto, a Faixa C deve ser evitada na prática (Chen *et al.*, 2019).

Werkmeister (2003) dividiu as faixas de acomodação com base nos seguintes critérios empíricos:

- Faixa A:

$$\Delta \varepsilon_{ap,5000} - \Delta \varepsilon_{ap,3000} < 4,5 \times 10^{-5}$$

- Faixa B:

$$4,5 \times 10^{-5} < \Delta\varepsilon_{ap,5000} - \Delta\varepsilon_{ap,3000} < 4,0 \times 10^{-4}$$

- Faixa C:

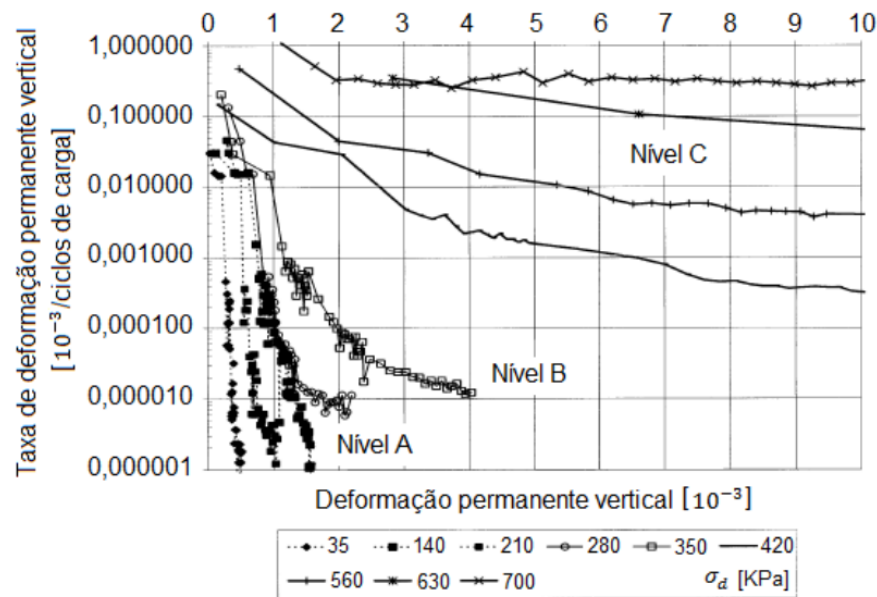
$$\Delta\varepsilon_{ap,5000} - \Delta\varepsilon_{ap,3000} > 4,0 \times 10^{-4}$$

onde $\Delta\varepsilon_{ap,3000}$ e $\Delta\varepsilon_{ap,5000}$ são as deformações axiais permanentes acumuladas no 3000º e no 5000º ciclo, respectivamente. Esses critérios também estão incorporados na norma europeia EN 13286-7 (CEN, 2004).

Guimarães (2009) propôs, a partir da observação dos resultados de DP em seu amplo estudo experimental com solos tropicais em âmbito nacional, a introdução de um quarto padrão de comportamento, denominado AB, para o qual a deformação permanente acumulada nos ciclos iniciais é bastante significativa (semelhante ao comportamento do tipo B), tornando-se constante após um determinado número de repetições de carga (como observado no tipo A).

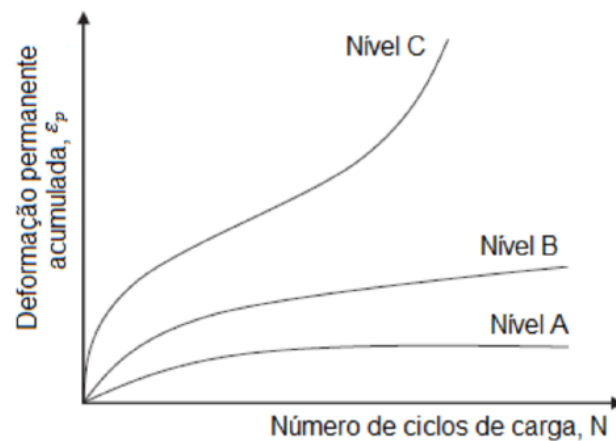
Apesar dessa ampla difusão da Teoria do Shakedown no estudo do desempenho mecânico de agregados e solos para pavimentação, nota-se que ainda não há uma unanimidade na literatura com relação ao método empregado na definição dos designados limites de Shakedown e, conseqüentemente, no enquadramento da resposta plástica dos materiais nas regiões de comportamento (A, B, AB e C). Segundo Lima (2020), existem diferentes formas possíveis de definir os limites quanto ao Shakedown, cabendo citar os seguintes: graficamente, pelo modelo Dawson e Wellner (1999), incluindo os valores das taxas de acréscimo de deformação permanente (conforme exemplo na Figura 2.7); graficamente, pela análise das curvas de DP no gráfico $\varepsilon_p \times N$ (Figura 2.8); e pelos limites definidos segundo inequações propostas por Werkmeister *et al.* (2001), as quais estão inseridas na Norma Europeia (CEN, 2004).

Figura 2.7: Definição dos limites quanto ao Shakedown a partir dos valores das taxas de acréscimo de deformação permanente – Parte 1



Fonte: Adaptado de Dawson e Wellner (1999)

Figura 2.8: Definição dos limites quanto ao Shakedown a partir dos valores das taxas de acréscimo de deformação permanente – Parte 2



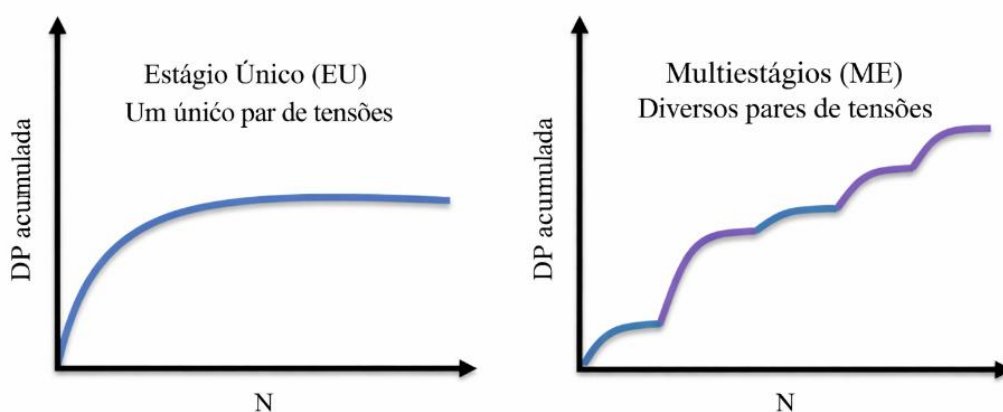
Fonte: Adaptado de Werkmeister *et al.* (2001)

2.7 Obtenção da deformação permanente em laboratório

Para o estudo da deformação permanente (DP) e a obtenção de suas estimativas, são realizados ensaios mais sofisticados e demorados, que exigem conhecimentos práticos e técnicos mais consolidados (Cabral, 2021).

Destaca-se que a rotina experimental do ensaio de DP depende do método de carregamento empregado em estágio único (EU) ou multiestágios (ME), conforme Figura 2.9. Nos ensaios de DP-EU, a amostra é submetida a um único estágio de N ciclos de carga, ou seja, é imposto um mesmo nível de tensões durante todo o ensaio. Nos ensaios de DP-ME, por outro lado, uma única amostra é submetida a uma sequência de estágios de N ciclos cada. Em ambos os casos, a partir dos valores de deslocamentos plásticos obtidos durante o ensaio, estima-se a contínua evolução da deformação permanente em função do número de repetições de carga (Schreinert, 2021).

Figura 2.9: Desenvolvimento das deformações permanentes no ensaio triaxial de cargas repetidas: (a) estágio único e (b) multiestágios



Fonte: Adaptado de Schreinert (2021)

Rahman (2015) ressalta que, pelo fato do ensaio de DP-ME aplicar vários pares de tensões a uma única amostra, esse proporciona as seguintes vantagens: (a) inclui o efeito do histórico de tensões, (b) reduz o tempo, consumo e esforço necessários para estudar a influência de vários níveis de carga e (c) reduz a dispersão experimental usualmente associada ao ensaio de vários corpos de prova.

A Tabela 2.3 lista artigos consultados, indicando os resultados obtidos a partir de ensaios de deformação permanente utilizando os métodos de carregamento empregado em estágio único (EU) ou multiestágios (ME).

Tabela 2.3: Estudos obtidos a partir de ensaios de deformação permanente utilizando os métodos de carregamento empregado em estágio único (EU) ou multiestágios (ME).

Referências	EU / ME	Resumo da Pesquisa
Santos, Silva e Guimarães (2022)	EU	Os autores avaliaram a incerteza de medição associada aos ensaios de deformação permanente (DP) em solos lateríticos utilizados em camadas de pavimentos rodoviários. A metodologia adotada para o ensaio de deformação permanente, conforme procedimentos do DNIT 179/2018, com análise específica dos resultados aos 50.000 ciclos. O principal resultado em relação à deformação permanente indicou que os valores medidos variaram significativamente conforme o nível de tensões aplicado.
Lima <i>et al.</i> (2025)	EU	Os autores avaliaram o comportamento mecânico de 11 solos arenosos por meio do módulo de resiliência (MR) e da deformação permanente (DP), caracterizados a partir de ensaios triaxiais de carga repetida. A análise dos parâmetros do modelo preditivo de DP indicou sua sensibilidade à baixa coesão dos solos arenosos e o efeito significativo da tensão desviadora sobre a DP.
Bastos (2024)	ME	A autora avaliou o comportamento mecânico de misturas cimentadas em camadas de pavimentos, à luz de parâmetros mecanicistas, tais como Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (DP). Avaliaram-se cinco solos coletados na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), com teores de 3% e 6% de cimento e dois tempos de cura (7 e 28 dias). No que se refere ao parâmetro de DP, observou-se uma tendência de estabilização das deformações acumuladas obtidas a partir de 6000 ciclos de aplicação carga.

Tabela 2.4: Estudos obtidos a partir de ensaios de deformação permanente utilizando os métodos de carregamento empregado em estágio único (EU) ou multiestágios (ME) (continuação).

Referências	EU / ME	Resumo da Pesquisa
Cabral (2021)	EU e ME	O autor avaliou a DP de solos utilizados em pavimentos da microrregião de Mossoró para o desenvolvimento de modelos a serem usados em métodos de dimensionamento mecanístico empíricos de pavimentos à luz de ensaios mais rápidos e da técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA). Para tanto avaliou-se o método de ensaio de DP a ser utilizado usando as normas brasileira (DNIT 179/2018) e europeia (CEN 13286–7/2004); Os resultados mostraram que o ensaio triaxial de múltiplos estágios, baseada na norma europeia, apresentou vantagens operacionais e foi recomendado como método para obtenção de DP das amostras.
Lima, Motta e Aragão (2021)	EU	Os autores avaliaram a influência do número de ciclos de aplicação de carga na caracterização dos materiais. Para tal, foram analisados sete materiais na umidade ótima, e um deles compactado também em condição acima da umidade ótima, totalizando oito conjuntos de dados. Foram avaliados quatro diferentes valores de N, considerando 150.000 ciclos como a referência: descartando os 500 primeiros ciclos, mas considerando a DP acumulada neste intervalo; descartando os 500 primeiros ciclos e a DP acumulada neste intervalo; N final de 80.000; e N final de 100.000. Para os materiais analisados, não foram observadas diferenças significativas na previsão de DP, mesmo considerando ensaios com 50.000 ou 70.000 ciclos a menos do que os 150.000 ciclos exigidos em norma. .
Bona e Guimarães (2021)	EU	Os autores realizaram ensaios de caracterização geotécnica, de módulo resiliente e de deformação permanente de um solo laterítico oriundo do pavimento de um trecho existente da rodovia BR-163/PA. A análise da deformação permanente indicou contribuição praticamente nula do material para o afundamento de trilha de roda total, e a pesquisa de ocorrência do <i>Shakedown</i> mostrou tendência ao acomodamento em todos os ensaios realizados.
Medeiros, Santana e Silva (2023)	ME	Os autores analisaram a deformação permanente de três solos tropicais, em um aparelho triaxial de carregamento cíclico, utilizando cargas crescentes em múltiplos estágios. Para este ensaio, foram utilizados três solos da faixa de domínio da BR-040 (Km 06: A-7-5, Km 26: A-1-b e Km 824: A-2-4). O ensaio de deformação permanente foi realizado segundo a técnica de carregamento em múltiplos estágios. Os resultados indicam que o solo no Km 26 atingiu os maiores valores de deformação permanente e, além disso, o corpo de prova ensaiado em umidade ótima +2% atingiu o DP máximo possível de ser registrado pelo LVDT do equipamento, no segundo ciclo de carregamento (5% SD).

2.8 Ensaio de deformação permanente conforme norma brasileira DNIT 179/2018 – IE

A norma que descreve as instruções de ensaio para a determinação da deformação permanente no Brasil é a DNIT IE 179 (DNIT, 2018). Essa norma permite ensaios em solos, brita graduada e materiais não estabilizados quimicamente. Para cada corpo de prova, são aplicados, no mínimo, 150.000 ciclos de carga para cada par de tensões confinante (σ_3) e desviadora (σ_d), conforme descrito na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Estados de tensões indicados para a determinação da DP

σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_1/σ_3
40	40	2
40	80	3
40	120	4
80	80	2
80	160	3
80	240	4
120	120	2
120	240	3
120	360	4

Fonte: Adaptado da norma DNIT IE 179 (2018).

2.9 Ensaio de deformação permanente conforme o Comitê Europeu de Normalização — EN 13286-7 (CEN, 2004)

A norma publicada pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN) — EN 13286-7 (CEN, 2004) — especifica procedimentos de ensaio para a determinação do comportamento resiliente e da deformação permanente de materiais granulares, sob condições que simulam os estados de tensões e as condições físicas desses materiais em camadas de pavimentos submetidas a cargas móveis. Esse método emprega o ensaio triaxial de carga repetida em múltiplos estágios (RLT – *Repeated Load Triaxial Test*), permitindo uma avaliação rápida da deformação permanente (DP) gerada por carregamentos cíclicos de magnitudes variáveis, conduzidos em um único corpo de prova. Ressalta-se que, na norma brasileira, apresentada no subitem anterior, para cada par de tensões, são necessários corpos de prova distintos.

Segundo Nguyen e Ahn (2019), o ensaio RLT possibilita a investigação do comportamento de materiais granulares sob múltiplas tensões de confinamento e tensões desviadoras utilizando uma única amostra. O ensaio triaxial de carga repetida é amplamente reconhecido como um método laboratorial eficaz para a avaliação das deformações permanentes (Erlingsson; Rahman, 2013; Li *et al.*, 2019a; Li *et al.*, 2019b; Saeed *et al.*, 2001).

A metodologia europeia estabelece a aplicação de 10.000 ciclos de carga para cada combinação de tensões adotada, seguindo uma sequência de múltiplas combinações pré-definidas em uma mesma amostra. Para uma análise adequada, a norma recomenda a realização de, no mínimo, três pares de tensões, totalizando 30.000 ciclos de carga aplicados ao mesmo corpo de prova. De acordo com essa metodologia, o afundamento responsável por danos ao pavimento ocorre antes da aplicação dos 10.000 ciclos e, após esse limite, o material não apresenta deformações significativas para a compreensão do seu comportamento, fato evidenciado pela estabilização dos valores de deformação permanente obtidos nos ensaios EN 13286-7 (CEN, 2004).

Estudos realizados por Jing *et al.* (2019), Jing *et al.* (2018) e Sormunen e Kolisoja (2018), empregando a norma europeia para a análise do comportamento mecânico de materiais em relação à deformação permanente, apresentaram resultados considerados satisfatórios. Esses autores observaram que os valores de deformação atenderam aos critérios normativos, indicando que a aplicação de até 10.000 ciclos de carga foi suficiente para a compreensão da ocorrência e das consequências da deformação permanente em pavimentos. Adicionalmente, pesquisas desenvolvidas por Mendes (2017) e Vasconcelos (2018) demonstraram que, para materiais estabilizados quimicamente, as deformações permanentes se estabilizam com um número de ciclos inferior a 10.000, para os diferentes pares de tensões aplicados.

Ao comparar a execução de ensaios de deformação permanente pelo método de carga repetida em múltiplos estágios, com aplicação de 10.000 ciclos de carga por par de tensões, com o procedimento normatizado pelo DNIT, que exige, no mínimo, 150.000 ciclos, observa-se que, ao programar ensaios com o número mínimo de pares de tensões recomendado pela norma europeia (totalizando 30.000 ciclos), o tempo total de execução corresponde a cerca de um quinto do período requerido pelos procedimentos estabelecidos pelo DNIT (Cabral, 2021).

2.10 Cisalhamento Direto

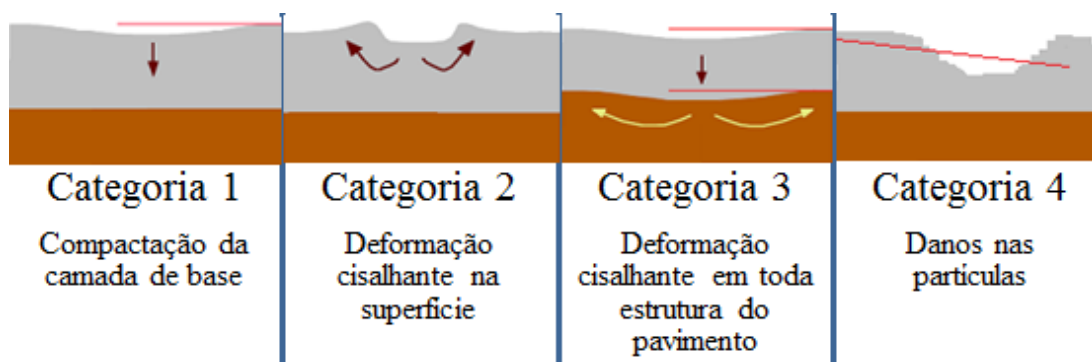
Segundo Holtz e Kovacs (1981), a resistência ao cisalhamento do solo constitui um dos aspectos mais relevantes da engenharia geotécnica, pois influencia diretamente a capacidade de

carga de fundações superficiais e profundas, a estabilidade de encostas, o dimensionamento de estruturas de contenção e, de forma indireta, o projeto de pavimentos.

O ensaio de cisalhamento direto é o ensaio de laboratório mais antigo empregado no estudo da resistência ao cisalhamento dos solos (Li *et al.*, 2026). Trata-se de um ensaio fundamental para a compreensão do comportamento do solo sob condições de cisalhamento, apresentando ampla aplicação em projetos de fundações, taludes, barragens de terra e outras obras geotécnicas (Bezih *et al.*, 2025). A resistência ao cisalhamento pode ser definida como a máxima tensão que o solo é capaz de suportar sem que ocorra ruptura, sendo influenciada por fatores físicos e físico-químicos, como o atrito entre partículas e a coesão do material (Arcanjo, 2019).

No contexto da pavimentação, Dawson e Kolisoja (2004) classificam os afundamentos em trilha de roda em quatro categorias, considerando camadas granulares sem revestimento ou com revestimentos de pequena espessura, conforme ilustrado na Figura 2.10. Esses afundamentos podem ser decorrentes de diferentes mecanismos, tais como a fluência plástica do material, a densificação, a ruptura por cisalhamento e/ou a quebra de partículas. Destes mecanismos, duas categorias são relacionadas às tensões cisalhantes (categorias 2 e 3).

Figura 2.10: Quatro categorias de afundamento de trilha de roda



Fonte: Adaptado de Dawson e Kolisoja, 2004

2.11 Alguns trabalhos do uso da ativação alcalina na área de pavimentação

As Tabelas 2.6, 2.7 e 2.8 apresentam os estudos mais recentes relacionados à aplicação da ativação alcalina com o objetivo de estabilização de solos para uso em camadas de pavimentos rodoviários.

Tabela 2.6: Estudos relacionados à aplicação da ativação alcalina com o objetivo de estabilização de solos para uso em camadas de pavimentos rodoviários

Referência	Propriedades Mecânicas analisadas	Resumo da Pesquisa
Cui <i>et al.</i> (2025)	RCS, MR, Resistência À Tração Por Compressão Diametral	Os autores utilizaram areia do deserto como agregado fino e resíduos de escória e cinzas volantes ativados por álcalis como aglomerante para investigar sistematicamente o desempenho mecânico e a durabilidade ao congelamento e descongelamento de bases de areia do deserto estabilizadas com geopolímero. Os resultados indicaram que com o aumento do teor de areia do deserto, o teor de aglomerante geopolimérico diminui, reduzindo seu efeito de revestimento e cimentação nas partículas de areia, enquanto a porosidade aumenta, resultando em declínios na resistência à compressão não confinada, no módulo de resiliência e na resistência à tração por compressão diametral.
Chatchawan, Nuntasarn e Chindaprasirt (2025)	RCS, ISC	Os autores investigaram a utilização de agregados reciclados de rocha britada e de pavimento asfáltico reciclado por meio do uso de geopolímeros à base de cinza de bagaço e cinza volante, visando sua aplicação como material de base para pavimentos. As misturas otimizadas — 40% de cinza volante com ativador NaOH a 8 M e 60% de cinza volante com NaOH a 5 M — alcançaram resistências à compressão simples (RCS) de 2.557 kPa e 2.667 kPa, respectivamente. Esses resultados evidenciam um desempenho equilibrado entre resistência mecânica, absorção de energia, tempo de trabalhabilidade e melhoria do ISC, com valores variando de 82,0% (0% de cinza volante) a 99,6%.

Tabela 2.7: Estudos relacionados à aplicação da ativação alcalina com o objetivo de estabilização de solos para uso em camadas de pavimentos rodoviários (continuação)

Referência	Propriedades Mecânicas analisadas	Resumo da Pesquisa
Xie <i>et al.</i> (2024)	RCS, τ , MR e DP	Este estudo desenvolveu uma nova abordagem através da síntese de um geopolímero derivado de resíduos de construção e demolição para estabilizar solos de subleito com alto limite de liquidez. Foram realizados ensaios de RCS, τ , MR e DP para investigar os efeitos da dosagem do geopolímero derivado de resíduos de construção e demolição, do tempo de cura, do estado de tensão e da umidade sobre as propriedades geotécnicas do solo estabilizado. Os resultados demonstraram que o aumento da dosagem do geopolímero melhorou efetivamente a RCS, a τ e o MR, além de reduzir a DP.
Souza (2023)	RCS, MR e ISC	O autor avaliou a influência do teor de cinza de bagaço de cana de açúcar (CBCA) álcali ativada com hidróxido de sódio (NaOH) sobre a resistência mecânica de um solo estabilizado com estes materiais. Os ensaios mecânicos realizados foram compressão simples, ciclos de gelo e degelo, módulo de resiliência e índice de suporte Califórnia. Com base nos resultados obtidos, pode-se inferir que a associação da CBCA álcali ativada ao solo proporcionou uma melhora das propriedades mecânicas em termos de 340% no módulo de resiliência e 9 vezes de aumento no valor para o índice de suporte Califórnia em comparação com o solo puro.
Arcanjo (2018)	RCS e ISC	O autor avaliou um aglomerante álcali-ativado aplicado na estabilização química de solos para pavimentos rodoviários. A pesquisa realizou o desenvolvimento das dosagens do aglomerante álcali ativado. O precursor foi o metacaulim, o ativador silicato de sódio alternativo. Foram realizadas cinco misturas com 5, 7, 10, 15 e 20% de metacaulim mais ativador alcalino. Estes foram comparados à mistura do solo-cimento com 7% de adição e com o solo natural. Na avaliação das amostras com adição foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e ISC. Os resultados mostraram que o aglomerante álcali-ativado modificou a estrutura do solo promovendo reações de caráter geopolimérico, gerando maior aderência entre os grãos e assim interferindo nas propriedades do solo.

Tabela 2.8: Estudos relacionados à aplicação da ativação alcalina com o objetivo de estabilização de solos para uso em camadas de pavimentos rodoviários (continuação)

Referência	Propriedades Mecânicas analisadas	Resumo da Pesquisa
Silva (2016)	RCS, ISC, Ensaios triaxiais	Neste trabalho foi utilizado um solo argiloso o qual foi ensaiado na sua forma original e com várias misturas com cinzas ativadas alcalinamente. Foi realizado um conjunto significativo de ensaios laboratoriais, nomeadamente: ensaios de compressão uniaxial, ensaios índice de suporte Califórnia e ensaios triaxiais que permitiram avaliar, quantitativamente, o melhoramento conseguido nas propriedades mecânicas com a aplicação da técnica de ativação alcalina de cinzas volantes no solo. Paralelamente, como meio de comparação dos resultados obtidos, foram realizados ensaios em misturas de solo com ligantes tradicionais (cimento e cal). Os resultados mostram que a técnica de ativação alcalina como forma de melhoramento de solos conduz a resultados competitivos em termos de características mecânicas com as melhores misturas utilizando ligantes tradicionais.
Adhikari <i>et al.</i> (2019)	RCS, MR	Neste estudo, solos de plasticidade média e alta foram utilizados para avaliar as características físicas, microestruturais, mecânicas e de durabilidade de misturas de solo-geopolímero à base de cinzas volantes. Cinzas volantes de classe F foram utilizadas com uma mistura de silicato de sódio e hidróxido de sódio para preparar as misturas. Um planejamento experimental foi desenvolvido incorporando diversas combinações de teor de cinzas volantes, relação silicato de sódio/hidróxido de sódio e concentração de hidróxido de sódio. Os testes de módulo resiliente, durabilidade, FTIR, DRX e microscopia eletrônica de varredura (MEV) também realizados para as misturas selecionadas. Os resultados indicaram que o geopolímero apresentou desempenho satisfatório sob cargas estáticas e dinâmicas, e atendeu aos critérios de durabilidade em condições úmidas e secas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALQADER, A. F.; JIN, F.; AL-TABBAA, A. Development of greener alkali-activated cement: utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures. *Journal of Cleaner Production*, v. 113, p. 66–75, fev. 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.010.
- ABDILA, S. R.; MUSTAFA, M.; BAKRI, A.; AHMAD, R.; ZAMREE, S.; RAHIM, A.; RYCHTA, M.; WNUK, I.; NABIAŁEK, M.; MUSKALSKI, K. *et al.* Evaluation on the mechanical properties of ground granulated blast slag (GGBS) and fly ash stabilized soil. *Materials*, v. 14, p. 2833, 2021. DOI: 10.3390/ma14112833.
- ABDULLAH, H. H.; SHAHIN, M. A.; WALSKE, M. L. Review of fly ash based geopolymers for soil stabilisation with special reference to clay. *Geosciences*, Basel, v. 10, n. 7, art. 249, 2020. DOI: 10.3390/geosciences10070249.
- ABDULLAH, M. S.; AHMAD, F. Effect of alkaline activator to fly ash ratio for geopolymer stabilized soil. *MATEC Web of Conferences*, v. 97, art. 01012, 2017. DOI: 10.1051/mateconf/20179701012.
- ABDULWAHED, H. S.; ALJANABI, K. R.; ABDULKAREEM, A. H. Optimization of equivalent modulus of RAP-geopolymer-soil mixtures using response surface methodology. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2022. DOI: 10.1016/j.jksues.2022.06.005.
- ADHIKARI, B.; KHATTAK, M. J.; ADHIKARI, S. Mechanical and durability characteristics of fly ash-based soil-geopolymer mixtures for pavement base and subbase layers. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 22, n. 10, p. 1193–1212, 2019. DOI: 10.1080/10298436.2019.1668562.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). *M 145: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for New and Rehabilitated Pavement Structures – Final Report*. Washington, DC: NCHRP, 2004.
- AOUAN, B.; ALEHYEN, S.; FADIL, M.; ALOUANI, M.; KHABBAZI, A.; ATBIR, A. F.; TAIBI, M. H. L. Compressive strength optimization of metakaolin-based geopolymer by central composite design. *Chemical Data Collections*, v. 31, p. 100636, 2021.

ARCANJO, D. M. O. *Estudo da aplicação de aglomerantes álcali-ativados na estabilização de solos para pavimentações*. 2018. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

AZIZ, I. H.; ABDULLAH, M. M. A. B.; HEAH, C. Y.; LIEW, Y. M. Behaviour changes of ground granulated blast furnace slag geopolymers at high temperature. *Advances in Cement Research*, v. 32, n. 10, p. 465–475, 2020. DOI: 10.1680/jadcr.18.00162.

BALBO, J. T. *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

BARKSDALE, R. D. Laboratory evaluation of rutting in base course materials. In: *PROCEEDINGS OF THE THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS*. London, 1972. p. 161–174.

BASTOS, S. D. V. *Estudo do comportamento mecanístico-empírico de materiais alternativos e cimentícios em camadas de pavimentos*. 2024. 310 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. *et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. 4. ed. Rio de Janeiro: Petrobrás/ABEDA, 2008. v. 1.

BIAREZ, J. *Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sols et des matériaux pulvérulents*. 1962. Thèse (Doctorat) – Université de Grenoble, Grenoble, 1962.

BONA, A. C. D.; GUIMARÃES, A. C. R. Avaliação da deformação permanente e resiliente de uma laterita alternativa utilizada em base de pavimento rodoviário. *Transportes*, v. 29, n. 3, p. 1–13, 2021. DOI: 10.14295/transportes.v29i3.2404.

CABRAL, W. S. *Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da microregião de Mossoró/RN*. 2021. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

CAMACHO, D. L. D. *et al.* Influência das propriedades do solo melhorado com aglomerante álcali-ativado. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, XXVIII., 2016, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABMS, 2016.

CASTELO BRANCO, V. T. F. *Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado*. 2004. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

CASTILLO, H. *et al.* Fatores que afetam a resistência à compressão de geopolímeros: uma revisão. *Minerals*, v. 11, n. 12, p. 1317, 2021.

CASTRO, J. F. A. *Melhoramento de um solo arenoso por ativação alcalina*. 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2015.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION). *EN 13286–7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures*. Brussels: European Standard, 2004.

CHATCHAWAN, S.; NUNTASARN, R.; CHINDAPRASIRT, P. Stabilization of demolished road materials for pavement base applications: utilization of bagasse ash and fly ash geopolymer composite. *Construction and Building Materials*, v. 497, art. 143848, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.143848.

CHEN, K. *et al.* Modeling and optimization of fly ash–slag-based geopolymer using response surface method and its application in soft soil stabilization. *Construction and Building Materials*, v. 315, p. 125723, 2021.

CHEN, W. B.; FENG, W. Q.; YIN, J. H.; BORANA, L.; CHEN, R. P. Characterization of permanent axial strain of granular materials subjected to cyclic loading based on shakedown theory. *Construction and Building Materials*, v. 198, p. 751–761, fev. 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.012.

ÇOKÇA, E. Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 127, n. 7, p. 568–573, 2001. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(568).

COSTA, L. C. B. *Desempenho de concretos de escória de aciaria frente a ataque de cloretos*. 2019. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

CRISTELO, N. *et al.* Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 925–933, 2013.

CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; PINTO, A. T. Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*, v. 164, n. 1, p. 73–82, 2011.

CUI, C.; LI, P.; HU, J.; WANG, L.; PENG, H. Effect of desert sand content on road performance of geopolymer stabilized desert sand pavement base. *Construction and Building Materials*, v. 506, art. 144844, 2026. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144844.

DAWSON, A. R.; WELLNER, F. *Plastic behavior of granular materials*. Nottingham: University of Nottingham, 1999. Final Report ARC Project 933.

DAWSON, A.; KOLISOJA, P. *Permanent deformation*. Report on Task, v. 2, 2004.

DE PAULA, M. O. *Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland*. 2006. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *DNIT 179/2018 – IE: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio*. Brasília, 2018.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, v. 42, p. 2917–2933, 2007.

EIDGAHEE, D. R.; RAFIEAN, A. H.; HADDAD, A. A novel formulation for the compressive strength of IBP-based geopolymer stabilized clayey soils using ANN and GMDH-NN approaches. *Iranian Journal of Science and Technology – Transactions of Civil Engineering*, v. 44, n. 1, p. 219–229, 2020. DOI: 10.1007/s40996-019-00263-1.

ERLINGSSON, S.; RAHMAN, M. S. Evaluation of permanent deformation characteristics of unbound granular materials by means of multistage repeated load triaxial tests. *Transportation Research Record*, n. 2369, p. 11–19, 2013.

FARHAN, K. Z.; JOHARI, M. A. M.; DEMIRBOĞA, R. Avaliação de importantes parâmetros envolvidos na síntese de compósitos geopoliméricos: uma revisão. *Construction and Building Materials*, v. 264, p. 120276, 2020.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Nanoestrutura/microestrutura de geopolímeros de cinzas volantes. In: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (org.). *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. p. 89–117.

FIRDAUS, I. Y.; DAUD, R. Contribution of fineness level of fly ash to the compressive strength of geopolymer mortar. *MATEC Web of Conferences*, v. 103, art. 01026, 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201710301026.

FREITAS, H. B.; MOTTA, L. M. G. Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado. *Transportes*, v. 16, n. 2, p. 5–12, 2008.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. In: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (org.). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. p. 19–47.

GHUGAL, Y. M. Effect of fly ash fineness on workability and compressive strength of geopolymer concrete. *Indian Concrete Journal*, v. 1, p. 57–62, 2013.

GUIMARÃES, A. C. R. *Estudo de deformação permanente em solos e teoria do shakedown aplicada a pavimentos flexíveis*. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

GUIMARÃES, A. C. R. *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. *An introduction to geotechnical engineering*. 1. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1981.

HUA, J.; WHITE, T. A study of nonlinear tire contact pressure effects on HMA rutting. *International Journal of Geomechanics*, v. 2, n. 3, p. 353–376, 2002.

HUMAD, A. M.; PROVIS, J. L.; CWIRZEN, A. Alkali activation of a high MgO GGBS – fresh and hardened properties. *Magazine of Concrete Research*, v. 70, n. 24, p. 1256–1264, 2018. DOI: 10.1680/jmacr.17.00436.

JAMKAR, S. S.; GHUGAL, Y. M.; PATANKAR, S. V. Effect of fly ash fineness on workability and compressive strength of geopolymer concrete. *Indian Concrete Journal*, v. 87, n. 4, p. 57–61, 2013.

JING, G. Q.; AELA, P.; FU, H.; YIN, H. Numerical and experimental analysis of single tie push tests on different shapes of concrete sleepers in ballasted tracks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, v. 233, n. 7, p. 666–677, 2019.

JING, P.; NOWAMOOZ, H.; CHAZALLON, C. Permanent deformation behaviour of a granular material used in low-traffic pavements. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 2, p. 289–314, 2018. DOI: 10.1080/14680629.2016.1259123.

JOHNSON, K. L. Plastic flow, residual stresses, and shakedown in rolling contact. In: *PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTACT MECHANICS AND WEAR OF RAIL/WHEEL SYSTEMS*. 1986.

KIM, B.; PREZZI, M. Evaluation of the mechanical properties of class F fly ash. *Waste Management*, v. 28, n. 3, p. 649–659, 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.04.006.

KIM, J.; LEE, S.; LEE, S.; LEE, J.; KIM, Y. Mechanical properties of clayey soil improved by alkaline activation using blended cementitious materials. *Construction and Building Materials*, v. 283, p. 122740, 2021.

KWON, J.; KIM, S.-H.; TUTUMLUER, E.; WAYNE, M. H. Characterisation of unbound aggregate materials considering physical and morphological properties. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 18, n. 4, p. 303–308, 2017. DOI: 10.1080/10298436.2015.1065997.

LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. State of the art. I: resilient response of unbound aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, v. 126, n. 1, p. 66–75, 2000.

LEONG, H. Y.; ONG, D. E. L.; SANJAYAN, J. G.; NAZARI, A. Strength development of soil–fly ash geopolymer: assessment of soil, fly ash, alkali activators, and water. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 8, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002363.

LI, D.; SELIG, E. T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 122, p. 1006–1013, 1996.

LI, N.; MA, B.; LI, R.; SI, W. Performance of unbound aggregate materials under single-stage and multistage loading modes based on precision unbound material analyzer. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, v. 13, n. 2, p. 1–12, 2019a.

LI, N.; WANG, H.; MA, B.; LI, R. Investigation of unbound granular material behavior using precision unbound material analyzer and repeated load triaxial test. *Transportation Geotechnics*, v. 18, p. 1–9, 2019b.

LIMA, C. D. A. *Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas*. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

LIMA, C. D. A. *Estudo da deformação permanente de duas britas graduadas para uso em camadas de pavimentos*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; ARAGÃO, F. T. S. Ensaio de deformação permanente: efeito do número de ciclos na interpretação do comportamento de solos e britas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 3, e13044, 2021. DOI: 10.1590/S1517-707620210003.13044.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; GUIMARÃES, A. C. R.; MOTA, B. C.; ARAGÃO, T. S. Investigation of the deformability of sandy soils for pavement layers under repeated load triaxial tests. *Construction and Building Materials*, v. 477, p. 141367, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141367.

LODEIRO, I. G.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Variation in hybrid cements over time: alkaline activation of fly ash–Portland cement blends. *Cement and Concrete Research*, v. 52, p. 112–122, 2013.

MAHEEPALA, M. M. A. L. N.; NASVI, M. C. M.; ROBERT, D. J.; GUNASEKARA, C.; KURUKULASURIYA, L. C. Mix design development for geopolymer treated expansive

subgrades using artificial neural network. *Computers and Geotechnics*, v. 161, p. 105534, 2023. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105534.

MEDEIROS, A. S.; SANTANA, C. S. A.; SILVA, M. A. V. Permanent deformation analysis of three tropical soils at different humidities using multistage loading. *Journal of Engineering Research*, v. 15, n. 3, p. 2–17, 2023. DOI: 10.22533/at.ed.3173152308055.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. *Mecânica dos pavimentos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MENDES, A. J. C. *Análise da deformabilidade de solos tropicais da microrregião de Viçosa-MG, visando à aplicação em estruturas de pavimentos flexíveis*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

MIRAKI, H.; SHARIATMADARI, N.; GHADIR, P.; JAHANDARI, S.; TAO, Z.; SIDDIQUE, R. Clayey soil stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 14, n. 2, p. 576–591, 2022. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.08.012.

MOHAMMADINIA, A.; ARULRAJAH, A.; D'AMICO, A.; HORPIBULSUK, S. Alkali activation of fly ash and cement kiln dust mixtures for stabilization of demolition aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 186, p. 71–78, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.103.

MOTTA, L. M. G. *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas*. 1991. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

MOZUMDER, R.; LASKAR, A. Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer stabilized clayey soil using artificial neural network. *Computers and Geotechnics*, v. 69, p. 291–300, 2015.

NAZZAL, M. D.; MOHAMMAD, L. N.; AUSTIN, A. Evaluating laboratory tests for use in specifications for unbound base course materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, n. 4, p. 04020036, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003042.

NGUYEN, T. H.; AHN, J. Experimental evaluation of the permanent strains of open-graded aggregate materials. *Road Materials and Pavement Design*, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2019.1702086.

NORBACK, C.; MOTTA, L. M. G. Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de duas misturas solo-brita. In: *CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES (ANPET)*, 32., 2018, Gramado. Anais... Rio de Janeiro: ANPET, 2018. p. 2098–2109.

OORMILA, T. R.; PREETHI, T. V. Effect of stabilization using fly ash and GGBS in soil characteristics. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, v. 11, n. 6, p. 284–289, 2014.

OSOULI, A.; ADHIKARI, P.; TUTUMLUER, E.; SHOUP, H. Properties of aggregate fines influencing modulus and deformation behaviour of unbound aggregates. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 22, n. 4, p. 498–513, 2021. DOI: 10.1080/10298436.2019.1623402

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: a review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 7, p. 1315–1322, 2008.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ash: a cement for the future. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 8, p. 1323–1329, 1999.

PARHI, P. S.; GARANAYAK, L.; MAHAMAYA, M.; DAS, S. K. Stabilization of an expansive soil using alkali activated fly ash based geopolymer. In: *SUSTAINABLE CIVIL INFRASTRUCTURES*. 2018. p. 36–50. DOI: 10.1007/978-3-319-61931-6_4.

PEREIRA, P. D. M. *Avaliação da aplicabilidade de solos estabilizados com cinzas ativadas alcalinamente em camadas de pavimentos rodoviários*. 2014. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Minho, 2014.

PEZO, R. F. A general method of reporting resilient modulus tests of soils: a pavement engineer's point of view. In: *ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD*, 72., 1993, Washington, D.C. *Proceedings...* Washington, D.C., 1993.

PHETCHUAY, C.; HORPIBULSUK, S.; ARULRAJAH, A.; SUKSIRIPATTANAPONG, C.; UDOMCHAI, A. Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer. *Applied Clay Science*, v. 127–128, p. 134–142, 2016. DOI: 10.1016/j.clay.2016.04.005.

PINTO, A. T. *Introdução ao estudo dos geopolímeros*. Vila Real: Geo-Pol Geopolymer System, 2006. 88 p.

POURAKBAR, S.; HUAT, B. B. K. Laboratory-scale model of reinforced alkali-activated agro-waste for clayey soil stabilization. *Advances in Civil Engineering Materials*, v. 6, n. 1, p. 83–105, 2017. DOI: 10.1520/ACEM20160023.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? *Materials and Structures*, v. 47, p. 11–25, 2014.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, v. 44, p. 299–327, 2014.

PROVIS, J. L.; PALOMO, A.; SHI, C. Advances in understanding alkali activated materials. *Cement and Concrete Research*, v. 78, p. 110–125, 2015. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.04.013.

PUERTAS, F. Cementos de escorias activadas alcalinamente: situación actual y perspectivas de futuro. *Materiales de Construcción*, Madrid, v. 45, n. 239, p. 53–64, jul./set. 1995. DOI: 10.3989/mc.1995.v45.i239.413.

QIAN, J.; WANG, Y.; LIN, Z. *et al.* Dynamic shakedown analysis of flexible pavement under traffic moving loading. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION GEOTECHNICS (ICTG)*, 3., 2016, Guimarães. *Proceedings...* Guimarães, 2016.

QIU, J.; ZHAO, Y.; XING, J.; SUN, X. Fly ash/blast furnace slag-based geopolymer as a potential binder for mine backfilling: effect of binder type and activator concentration. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2019, p. 1–12, 2019. DOI: 10.1155/2019/2028109.

RAHMAN, M. S. *Characterising the deformation behaviour of unbound granular materials in pavement structures*. 2015. PhD Thesis – Division of Highway and Railway Engineering, Department of Civil and Architectural Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015.

REDDY, S. R.; IYER, K. R. K.; DAVE, T. N. Alkali activated soil stabilization as a sustainable pathway for the development of resilient geotechnical infrastructure. *Indian Geotechnical Journal*, 2024. DOI: 10.1007/s40098-024-00893-x.

RIOS, S.; CRISTELO, C.; VIANA DA FONSECA, A.; FERREIRA, C. Stiffness behavior of soil stabilized with alkali-activated fly ash from small to large strains. *International Journal of Geomechanics*, p. 1–18, 2017.

RIOS, S.; CRISTELO, C.; VIANA DA FONSECA, A.; FERREIRA, C. Structural performance of alkali activated soil-ash versus soil-cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016.

ROCHA, G. S. *Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica*. 2018. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

RODRIGUES, I. P. *Ligantes de baixo impacto ambiental e baixo custo, baseados na ativação química de escórias de aciaria*. 2015. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Minho, 2015.

RONDÓN-QUINTANA, H. A. Extensión de una ecuación constitutiva hipoplástica para simular ensayos triaxiales cíclicos. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, v. 18, n. 2, p. 215–227, 2010.

RONDÓN-QUINTANA, H. A.; BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G.; REYES-LIZCANO, F. A. Permanent deformation of unbound granular materials: a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, v. 12, n. 5, p. 1228–1253, 2025. DOI: 10.1016/j.jtte.2024.11.009.

SAEED, A.; HALL JR, J. W.; BARKER, W. Testes relacionados ao desempenho de agregados para uso em camadas de pavimento não ligadas. 2001.

SANTOS, F. A. *Estudo da variação da relação SiO_2/Al_2O_3 na produção de geopolímeros para imobilizar contaminantes*. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

SANTOS, J. T. A.; SILVA, P. A. L.; GUIMARÃES, A. C. R. Determinação da incerteza de medição nos ensaios de deformação permanente de solos lateríticos. *Transportes*, v. 30, n. 2, p. 2678, 2022. DOI: 10.14295/transportes.v30i2.2678.

SANTOS, T. A.; PINHEIRO, R. J. B.; SPECHT, L. P.; BRITO, L. A. T. Análise do desempenho de subleitos rodoviários à luz de conceitos da mecânica dos pavimentos. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 3, e12817, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200003.1117.

SCHREINERT, G. G. *Estudo do comportamento mecânico de solos residuais para emprego em pavimentação*. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SELLITTO, M. A.; KADEL JR., N.; BORCHARDT, M.; MEDEIROS PEREIRA, G.; DOMINGUES, J. Coprocessamento de cascas de arroz e pneus inservíveis e logística reversa na fabricação de cimento. *Ambiente & Sociedade*, Campinas, v. 16, n. 1, p. 141–162, jan./mar. 2013.

SHARIATMADARI, N. *et al.* Compressive strength of sandy soils stabilized with alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 11, p. 04021295, 2021.

SHARMA, K.; KUMAR, A. Utilization of industrial waste-based geopolymers as a soil stabilizer: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 5, art. 97, 2020. DOI: 10.1007/s41062-020-00350-7.

SHI, C.; KRIVENKO, P. V.; ROY, D. M. *Alkali-activated cements and concretes*. Abingdon: Taylor & Francis, 2006. 376 p.

SIHAG, P.; SUTHAR, M.; MOHANTY, S. Estimation of UCS-FT of dispersive soil stabilized with fly ash, cement clinker and GGBS by artificial intelligence. *Iranian Journal of Science and Technology – Transactions of Civil Engineering*, v. 45, p. 901–912, 2021.

SILVA, C. F. S. C. *Análise de tensões em pavimentos a partir de modelo físico instrumentado*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SILVA, M. C. A. *Melhoramento de um solo argiloso com recurso à ativação alcalina de resíduos para aplicação em infraestruturas de transporte*. 2016. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Minho, 2016.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO FERRO NO ESTADO DE MINAS GERAIS (SINDIFER). *Anuário*. Belo Horizonte: SINDIFER, 2023. 26 p.

SINGHI, B.; LASKAR, A. I.; AHMED, M. A. Investigation on soil–geopolymer with slag, fly ash and their blending. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 41, p. 393–400, 2016.

SOLIMAN, H.; SHALABY, A. Permanent deformation behavior of unbound granular base materials with varying moisture and fines content. *Transportation Geotechnics*, v. 4, p. 1–12, 2015.

SONG, S.; SOHN, D.; JENNINGS, H. M.; MASON, T. O. Hydration of alkali activated ground granulated blast furnace slag. *Journal of Materials Science*, v. 35, n. 1, p. 249–257, 2000. DOI: 10.1023/A:1004742027117.

SORMUNEN, L. A.; KOLISOJA, P. Mechanical properties of recovered municipal solid waste incineration bottom ash: the influence of ageing and changes in moisture content. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 2, p. 252–270, 2018.

SOUTSOS, M.; BOYLE, A. P.; VINAI, R.; HADJIERAKLEOUS, A.; BARNETT, S. J. Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, v. 110, p. 355–368, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.045.

SOUZA, J. M. *Solo estabilizado com cinza do bagaço da cana-de-açúcar álcali-ativada na pavimentação*. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

SUKPRASERT, S.; HOY, M.; HORPIBULSUK, S.; ARULRAJAH, A.; RASHID, S. A.; NAZIR, R. Fly ash based geopolymer stabilisation of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications. *Road Materials and Pavement Design*, v. 22, n. 6, p. 1–15, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2019.1621190.

SVENSON, M. *Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos*. 1980. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1980.

THOMAS, A.; TRIPATHI, R. K.; YADU, L. K. A laboratory investigation of soil stabilization using enzyme and alkali-activated ground granulated blast-furnace slag. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 43, p. 5193–5202, 2018.

TIGUE, A. A. S.; DUNGCA, J. R.; HINODE, H.; KURNIAWAN, W.; PROMENTILLA, M. A. B. Synthesis of a one-part geopolymer system for soil stabilizer using fly ash and volcanic ash. In: *MATEC WEB OF CONFERENCES*. 2018. v. 156, art. 05017. DOI: 10.1051/matecconf/201815605017.

TOFFOLO, R. *Pavimentos sustentáveis*. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

TRINH, S. H.; ANH, Q.; BUI, T. Influencing of clay and binder content on compressive strength of soft soil stabilized by geopolymer based fly ash. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 13, p. 7954–7958, 2018.

VASCONCELOS, S. D. *Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usinas termelétricas para construção de camadas de pavimentos*. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

WANG, Y. *et al.* Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer. *Journal of Cleaner Production*, v. 244, p. 118852, 2020.

WENG, L.; SAGOE-CRENTSIL, K. Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I – low Si/Al ratio systems. *Journal of Materials Science*, v. 42, n. 9, p. 2997–3006, 2007.

WERKMEISTER, S. *Permanent deformation behavior of unbound granular materials in pavement constructions*. 2003. Tese (Doutorado) – Technische Universität Dresden, Dresden, 2003.

WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Record*, v. 1757, n. 1, p. 75–81, 2001.

XIAO, Y. *et al.* Modelagem da dependência da trajetória de tensão na acumulação de deformação plástica cíclica de materiais granulares não ligados sob cargas de rodas em movimento. *Materials & Design*, v. 137, p. 9–21, 2018.

XIAO, Y.; TUTUMLUER, E. Verificações de desempenho para modelos de previsão de deformação permanente de base agregada não ligada sob estados de tensão dinâmica induzidos por carregamento de roda móvel. *Procedia Engineering*, v. 143, p. 979–990, 2016.

XIE, J.; KAYALI, O. Effect of superplasticiser on workability enhancement of class F and class C fly ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, v. 122, p. 36–42, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.067.

XIE, J.; ZHANG, J.; CAO, Z.; BLOM, J.; VUYE, C.; GU, F. Feasibility of using building-related construction and demolition waste-derived geopolymer for subgrade soil stabilization. *Journal of Cleaner Production*, v. 450, p. 142001, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142001.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, v. 59, n. 3, p. 247–266, 2000. DOI: 10.1016/S0301-7516(99)00074-5.

YANG, X.; NI, W.; ZHANG, X.; WANG, Y. Effect of alkali-activation on aluminosilicate based cementitious materials. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, v. 15, p. 796–801, 2008.

YI, Y.; AL-TABBAA, A.; LISKA, M. Properties and microstructure of magnesia–GGBS pastes. *Advances in Cement Research*, v. 26, n. 2, p. 114–122, 2014.

YILMAZ, F.; KUVAT, A.; KAMILOĞLU, H. A. Optimizing and investigating durability performance of sandy soils stabilized with alkali activated waste tuff fly ash mixtures. *Sādhanā*, v. 48, art. 185, 2023. DOI: 10.1007/s12046-023-02250-9.

YIP, C.; LUKEY, G.; VAN DEVENTER, J. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 1688–1697, 2005.

ZHANG, Z. H.; ZHU, H. J.; ZHOU, C. H.; WANG, H. Geopolymer from kaolin in China: an overview. *Applied Clay Science*, v. 119, p. 31–41, 2016. DOI: 10.1016/j.clay.2015.04.023.

3 OTIMIZAÇÃO ESTATÍSTICA MULTIVARIÁVEL DA DOSAGEM DE SOLOS ESTABILIZADOS POR ATIVAÇÃO ALCALINA

RESUMO

O solo é um material complexo e variável, com ampla aplicação nas engenharias geotécnica e de pavimentação. Entretanto, é comum encontrar solos que não possuem as propriedades necessárias para suportar as cargas impostas pelas solicitações previstas, implicando na necessidade de desenvolvimento de técnicas de seu melhoramento. Diante disso, o tratamento de solos por meio da ativação alcalina surge como uma alternativa técnica promissora, visto que diversos estudos indicam melhorias nas propriedades de engenharia de solos ativados alcalinamente por meio da otimização de sua composição. Neste contexto, esta pesquisa visa realizar uma abordagem metodológica fundamentada no processo de ativação alcalina de solos com vistas à obtenção de dosagens otimizadas de misturas de solo - cinza volante (CV) - escória de aciaria elétrica primária (EAEP) - solução de hidróxido de sódio (NaOH). O objetivo principal da proposta é o de determinar, por meio de planejamento experimental suportado por ferramenta estatística (Box-Behnken), a combinação de concentração de NaOH (ativador) e porcentagens de CV e EAEP (precursores) em relação ao solo que maximize as propriedades mecânicas das misturas, tendo como referência um conjunto multivariado de propriedades de engenharia relevantes em projetos de pavimentação [Resistência à Compressão Simples (RCS), Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Módulo de Resiliência (MR)]. Os resultados mostraram que a dosagem ótima foi distinta para cada solo: para o solo predominantemente arenoso (solo VS), a mistura otimizada foi de 5% de CV, 20% de EAEP e 9 mol de NaOH. Já para o solo predominantemente argiloso (solo BR), a melhor formulação foi de 12% de CV, 5% de EAEP e 12 mol de NaOH. A aplicação da ativação alcalina na estabilização de solos tropicais mostrou-se tecnicamente viável, pois proporcionou propriedades mecânicas compatíveis com os limites normativos exigidos, além de contribuir para o aproveitamento dos resíduos siderúrgicos.

Palavras-chave: ativação alcalina; resíduos siderúrgicos; propriedades geotécnicas; estabilização de solos; pavimentação.

ABSTRACT

Soil is a complex and variable material, widely used in geotechnical and pavement engineering. However, it is common to encounter soils that do not exhibit the required properties to withstand the loads imposed by design demands, which makes the development of soil improvement techniques necessary. In this context, soil treatment by alkali activation emerges as a promising technical alternative, since several studies have reported improvements in the engineering properties of alkali-activated soils through optimization of their composition. Accordingly, this research aims to establish a methodological approach based on the alkali activation of soils to obtain optimized mix designs of soil–fly ash (FA)–primary electric arc furnace slag (EAFS)–sodium hydroxide (NaOH) systems. The main objective is to determine, through an experimental design supported by statistical tools (Box–Behnken design), the optimal combination of NaOH concentration (activator) and FA and EAFS contents (precursors) relative to the soil that maximizes the mechanical performance of the mixtures, considering a multivariate set of engineering properties relevant to pavement design [Unconfined Compressive Strength (UCS), California Bearing Ratio (CBR), and Resilient Modulus (RM)]. The results indicated that the optimal mix design differed for each soil. For the predominantly sandy soil (VS soil), the optimized mixture consisted of 5% FA, 20% EAFS, and 9 M NaOH. For the predominantly clayey soil (BR soil), the best formulation was 12% FA, 5% EAFS, and 12 M NaOH. The application of alkali activation for the stabilization of tropical soils proved to be technically and environmentally feasible, providing mechanical properties compatible with the required normative limits.

Keywords: alkali activation; steelmaking residues; geotechnical properties; soil stabilization; pavements.

3.1 INTRODUÇÃO

O solo é um material complexo, variável e com extensa aplicação nas engenharias geotécnica e de pavimentação. Em projetos de rodovias, cenário de interface técnica entre tais engenharias, ele é utilizado como material de suporte e também como componente das camadas estruturais do pavimento rodoviário. Para tal aplicação, esse material de construção, em geral compactado, deve apresentar propriedades de engenharia que o habilitem a absorver as solicitações a que estará submetido. Porém, não é incomum a ocorrência de materiais que não atendam, em seu estado original e ainda que compactado, às exigências técnicas correspondentes às solicitações previstas em projeto. Sendo assim, tornou-se necessário à Engenharia Civil o desenvolvimento de técnicas de melhoramento do solo para atender a exigências de projeto cada vez mais rigorosas e a um cenário de disponibilidade cada vez menor desse material de construção diante das restrições impostas pela legislação ambiental (Arcanjo, 2018; Castro, 2015; Kodah *et al.*, 2025; Rocha, 2018).

Uma das principais técnicas de melhoramento do solo para aplicações como material de construção no âmbito das engenharias geotécnica e de pavimentação consiste na sua tradicional estabilização com cimento (Chen *et al.*, 2024; Kitazume; Terashi, 2013; Miraki *et al.*, 2022; Naraula *et al.*, 2025; Terashi; Kitazume, 2011; Yi *et al.*, 2015). O uso do cimento é muito comum na indústria da construção civil e sua produção está em constante crescimento. Em 2022, por exemplo, foram produzidas, globalmente, 4,10 bilhões de toneladas de cimento (SNIC, 2025), estimando-se que, até 2030, essa produção alcance, aproximadamente, 4,83 bilhões de toneladas (Gopalakrishnan; Chinnaraju, 2019; Miraki *et al.*, 2022).

No entanto, esse expressivo volume de produção acarreta diversas consequências ambientais negativas. Por exemplo, a fabricação de 1 tonelada de cimento resulta na emissão de, aproximadamente, 0,95 toneladas de CO₂, o que representa cerca de 5% das emissões globais desse gás de efeito estufa (Higgins, 2007; Khalil; Abouzeid, 2025; Lemougna *et al.*, 2018). Além disso, a produção de cimento consome grandes quantidades de recursos naturais não renováveis (Kodah *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2020), além de, aproximadamente, 5.000 MJ de energia que são necessários para produzir cada tonelada de cimento (Miraki *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a estabilização de solos por ativação alcalina tem se destacado como uma alternativa à técnica convencional de solo-cimento, permitindo a obtenção de materiais com propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas comparáveis, como elevada resistência à

compressão, baixa permeabilidade e reduzida condutividade térmica (Ozer; Soyer-Uzun, 2015; Qiu *et al.*, 2019; Severo *et al.*, 2013; Shou *et al.*, 2024).

Os materiais álcali-ativados são produzidos por uma reação química de um aluminossilicato sólido em condições alcalinas, produzindo um ligante capaz de adquirir características de um material consolidado (Ayub; Khan, 2023; Provis, 2014). Sua produção está associada a um processo químico que permite a transformação de determinadas estruturas parcial ou totalmente amorfas em estruturas com propriedades cimentícias (Ayub; Khan, 2023; Rios *et al.*, 2015).

Diversos estudos, como os desenvolvidos por Cristelo, Glendinning e Pinto (2011), Chi e Huang (2013), Soares (2013), Cristelo *et al.* (2013), Rios *et al.* (2015), Caicedo (2020), Acosta (2021), Chen *et al.* (2021), Araújo (2022) e Kodah *et al.* (2025), têm demonstrado o potencial da ativação alcalina na estabilização de solos. Todavia, a viabilidade técnica e econômica dessa técnica deve ser avaliada de forma criteriosa, uma vez que o desempenho do material estabilizado depende de múltiplos fatores, tais como o tipo e a concentração do ativador alcalino, a natureza da matéria-prima utilizada como fonte de aluminossilicatos e as condições de cura adotadas (Castro, 2015; Chen *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020).

Os geopolímeros ou aglutinantes ativados por álcali são geralmente feitos pela mistura de resíduos de aluminossilicatos (precursores) com uma solução ativadora alcalina (Ayub; Khan, 2023; Chi; Huang, 2013; Qiu *et al.*, 2019). Há uma grande variedade de reagentes de aluminossilicatos que podem ser usados para produzir os geopolímeros. As fontes mais comuns são o metacaulim e subprodutos industriais, como cinzas volantes, rejeitos de mineração e escórias de alto forno (Castro, 2015; Chi; Huang, 2013; Cristelo *et al.*, 2013; Elnour; Demiroz, 2024; Miraki *et al.*, 2022; Qiu *et al.*, 2019; Rios *et al.*, 2016; Soares, 2013; Yi *et al.*, 2015).

Dentro da vasta gama de subprodutos com potencial para serem utilizados como precursores no processo de ativação alcalina de solos, destacam-se, neste trabalho, a cinza volante (CV) e a escória de aciaria elétrica primária (EAEP). As cinzas volantes são materiais produzidos a partir da combustão do carvão nas centrais termoeletricas, sendo constituídas, essencialmente, por partículas esféricas muito finas, compostas, principalmente, por materiais sílico-aluminosos. Tratam-se de materiais com propriedades pozolânicas, que contêm um elevado teor de sílica em forma reativa (Elnour; Demiroz, 2024; Silva, 2016). Durante o processo de ativação alcalina, a sílica e a alumina nas cinzas volantes reagem com uma solução alcalina para formar um gel de aluminossilicato hidratado (Ayub; Khan, 2023; Marvila; Azevedo; Vieira, 2021).

As escórias são subprodutos parcialmente cristalinos dos processos siderúrgicos para a produção de aço, em que os constituintes metálicos e não metálicos são separados do minério

bruto (Traven; Češnovar; Ducman, 2019). A escória de aciaria elétrica primária, em particular, é produzida por um forno elétrico à arco no refinamento primário da produção do aço bruto. Nesse processo, uma corrente elétrica é usada para aquecer a cal e a dolomita até o estado líquido. Ao longo do processo de fusão, a cal e a dolomita são combinadas com sucata não metálica para formar uma escória líquida, que flutua no topo do material fundido e, posteriormente, é separada e resfriada, formando a EAEP (Rodrigues, 2022). A composição química da EAEP varia conforme o tipo de tratamento metalúrgico, as condições e os aditivos usados durante o processo de fabricação (EUROSLAG, 2019). Devido à adição de cal e dolomita como fundentes, esse material possui teores significativos de CaO e MgO (Costa, 2019).

Diversos estudos comprovaram a eficácia da utilização de cinzas volantes como precursores do processo de ativação alcalina (Chen *et al.*, 2021; Chi; Huang, 2013; Cristelo; Glendinning; Pinto, 2011; Cristelo *et al.*, 2013; Maheepala *et al.*, 2023; Rios *et al.*, 2015; Soares, 2013; Yilmaz *et al.*, 2023). Já em relação à escória de aciaria elétrica primária, apenas alguns estudos foram realizados sobre o seu uso como precursor desse processo (Apithanyasai *et al.*, 2018; Hafez *et al.*, 2021; Ozturk *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2025).

Estudos constataram que as propriedades mecânicas e a microestrutura dos materiais álcali-ativados à base de cinzas volantes podem ser melhoradas pela inclusão de precursores ricos em cálcio, como as escórias (Guo *et al.*, 2010; Phummiphan *et al.*, 2018; Reddy *et al.*, 2024). Isso ocorre porque o sistema constituído de cinza volante com um precursor rico em cálcio formará gel aluminossilicato de cálcio hidratado (CASH) que coexistirá com gel de aluminossilicato de sódio hidratado (NASH) (Abdullah; Shahin; Walske, 2020; Bernal *et al.*, 2013; Ismail *et al.*, 2014; Phummiphan *et al.*, 2018; Reddy *et al.*, 2024).

A utilização de escória de aciaria elétrica primária como precursora em misturas álcali-ativadas tem sido vista como uma alternativa promissora para a confecção de geopolímeros (Apithanyasai *et al.*, 2018; Hafez *et al.*, 2021; Ozturk *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2025). No entanto, apesar da potencial viabilidade dessa abordagem, há uma carência de estudos específicos que examinem a utilização da EAEP como precursora para a estabilização de solos, justificando técnico-cientificamente o seu emprego nesta pesquisa.

Adicionalmente à justificativa técnico-científica, ressalta-se que o cenário de geração de escória de aciaria elétrica primária em quantidades significativas aponta para a necessidade de viabilização de seu aproveitamento, a princípio porque constitui um indesejável, mas inevitável passivo ambiental para as indústrias do setor siderúrgico (Naidu; Sheridan; Dyk, 2020; Palod;

Deo; Ramtekkar, 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). Esse aproveitamento é convergente com os princípios da economia circular, a qual se propõe a eliminar a noção de resíduos, mantendo os materiais em utilização pelo maior tempo possível e, assim, trazendo benefícios econômicos, sociais e ambientais à sociedade (Filho; Frasson; Conti, 2019).

Ainda que a estabilização do solo por meio da aplicação da técnica de ativação alcalina constitua uma estratégia promissora para melhorar as propriedades de engenharia dos solos utilizados em obras rodoviárias, é notável que poucas pesquisas analisaram a otimização das dosagens de misturas de solos álcali-ativados com mais de um parâmetro de resposta em consideração. A utilização de diferentes variáveis de resposta para a otimização de dosagens tem sido aplicada em diversas áreas (Candioti *et al.*, 2014; Galindo *et al.*, 2024; Lafifi; Rouaiguia; Boumazza, 2019; Rodrigues, 2022), contudo o seu uso no desenvolvimento de materiais álcali-ativados tem sido pouco explorado no meio técnico. Poucos estudos foram encontrados a respeito de sua aplicação na produção de misturas álcali-ativadas (Abdellatief *et al.*, 2024; Aouan *et al.*, 2021; Matsimbe *et al.*, 2024; Shi *et al.*, 2023), porém nenhum deles visando a estabilização de solos para utilização em pavimentação.

Uma consulta bibliográfica extensiva permite constatar diversos estudos relacionados à otimização de misturas de solos álcali-ativados através, predominantemente, da determinação da Resistência à Compressão Simples (RCS) como parâmetro de resposta (Abdulwahed; Aljanabi; Abdulkareem, 2022; Adhikari; Khattak; Adhikari, 2021; Eidgahee; Rafiean; Haddad, 2020; Kodah *et al.*, 2025; Leong *et al.*, 2018; Maheepala *et al.*, 2023; Mozumder; Laskar, 2015; Shariatmadari *et al.*, 2021). Dado o fato que a RCS isoladamente não corresponde a uma propriedade de engenharia capaz de representar adequadamente o comportamento mecânico de camadas estruturais de pavimentos sob condições de serviço, justifica-se técnico-cientificamente a proposição de um protocolo de otimização que contemple múltiplas variáveis de resposta associadas ao comportamento estrutural de pavimentos, permitindo o preenchimento dessa lacuna.

Por fim, é importante destacar que, em qualquer procedimento de dosagem, a adoção do planejamento experimental de misturas pode ser aplicada para obter os teores adequados de cada matéria-prima componente da mistura e analisar a interação entre elas. Esta ferramenta compreende um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas e pode ser utilizada para formular novos materiais ou melhorar os já existentes (Mendes *et al.*, 2023).

Usando o planejamento experimental de misturas, as porcentagens de matérias-primas podem ser otimizadas para obter o melhor comportamento ou atender aos padrões técnicos pré-estabelecidos. Além disso, é possível determinar, através da função Desejabilidade, as condições que garantam a conformidade com os critérios de todas as variáveis de resposta envolvidas e, ao mesmo tempo, forneçam o melhor valor na resposta conjunta, sendo esse valor o mais desejável. Isso envolve a conversão das múltiplas variáveis de resposta em uma única função composta, seguida pela sua otimização (Candioti *et al.*, 2014).

Neste contexto, a presente pesquisa propõe uma abordagem metodológica fundamentada no processo de ativação alcalina de solos com vistas à obtenção de dosagens otimizadas de misturas de solo - cinza volante (CV) - escória de aciaria elétrica primária (EAEP) - solução de hidróxido de sódio (NaOH). O objetivo principal é determinar, por meio de planejamento experimental suportado por ferramenta estatística (Box-Behnken), a melhor combinação de concentração de NaOH (ativador) e porcentagens de CV e EAEP (precursores) em relação ao solo que maximize as propriedades mecânicas das misturas, tendo como referência um conjunto multivariado de propriedades de engenharia relevantes em projetos de pavimentação [Resistência à Compressão Simples (RCS), Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Módulo de Resiliência (MR)].

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Materiais

3.2.1.1 Solos

No programa experimental desta pesquisa, foram utilizados dois solos granulometricamente distintos: o primeiro, predominantemente argiloso, denominado solo BR, é um solo residual maduro de grande extensão territorial no relevo do município de Viçosa-MG, cuja amostra foi coletada do horizonte B de um talude de corte localizado à margem da Rodovia BR 120, nas proximidades do trevo de acesso ao campus Viçosa da Universidade Federal de Viçosa (UFV); o segundo, predominantemente arenoso, denominado solo VS, é um solo residual jovem, cuja amostra foi coletada de um talude de corte localizado na Vila Secundino, no campus Viçosa da UFV. As amostras de solos foram coletadas em estado deformado, nas respectivas jazidas de empréstimo, conforme o procedimento PRO 003 (DNER, 1994a).

3.2.1.2 Escória de aciaria elétrica primária

A amostra de escória de aciaria elétrica primária (EAEP) foi coletada em seu estado bruto no pátio da unidade siderúrgica da Vallourec, situada no município de Jeceaba-MG, em conformidade com a NBR 10007 (ABNT, 2004a). A coleta desse resíduo siderúrgico em seu estado bruto se deu sobre material estocado por, no mínimo, 6 meses e já submetido ao processo de beneficiamento para a retirada da fração metálica. Para que fosse utilizada como precursora da ativação alcalina dos solos, a amostra de escória de aciaria elétrica primária bruta foi submetida ao processo de moagem em aparelho de abrasão *Los Angeles*, seguido de peneiramento para a retirada de partículas maiores que 0,6mm (peneira #30), procedimento que visou diminuir a granulometria e aumentar a superfície específica do resíduo com vistas ao aumento da eficácia de sua ação precursora.

3.2.1.3 Cinza volante

A amostra de cinza volante empregada na pesquisa 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-SC. Conforme informações do fabricante, o material é classificado como cinza volante Classe C e atende aos requisitos de materiais pozolânicos prescritos na norma técnica NBR 12653 (ABNT, 2014).

3.2.1.4 Hidróxido de Sódio

Foi utilizado Hidróxido de Sódio (NaOH) comercial em flocos, com teor de pureza de 98%, para a produção da solução alcalina ativadora.

3.2.2 Métodos

3.2.2.1 Considerações Gerais

O programa experimental propõe um protocolo metodológico com vistas à obtenção de dosagens otimizadas de misturas de solo - cinza volante (CV) - escória de aciaria elétrica primária (EAEP) - solução de hidróxido de sódio (NaOH), visando determinar, por meio do planejamento experimental Box-Behnken, a melhor combinação de concentração de NaOH (ativador) e porcentagens de CV e EAEP (precursores) em relação ao solo que maximize as propriedades mecânicas das misturas, tendo como referência um conjunto multivariado de propriedades de engenharia relevantes em projetos de pavimentação (RCS, ISC, MR).

A primeira etapa consistiu na caracterização dos materiais individuais, com a determinação das propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais dos solos e dos precursores (CV e EAEP). Em seguida, foram realizados ensaios de compactação das misturas solo-CV-EAEP para determinar os parâmetros de ótimo [teor de umidade ótimo ($w_{\text{ótimo}}$) e peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{\text{dmáx}}$)] na energia do Proctor Intermediário. Os ensaios envolveram misturas de solo-CV-EAEP com múltiplas combinações de seus componentes individuais (15 misturas) em termos de massa seca total da mistura, definidas pelo planejamento experimental realizada no Box-Behnken.

Com os respectivos teores de umidade ótimos, foram preparadas as correspondentes misturas de solo-CV-EAEP-NaOH, variando as concentrações de NaOH. Salienta-se que a solução de NaOH foi incorporada à umidade ótima de compactação de cada mistura. As misturas foram compactadas em suas respectivas umidades ótimas e submetidas a ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS), Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Módulo de Resiliência (MR) após 3 dias de cura em câmara úmida.

A análise estatística dos resultados dos ensaios foi realizada utilizando o software Minitab 2018®, e a análise de variância (ANOVA) foi empregada para determinar modelos matemáticos polinomiais representativos da tendência de variação das propriedades (RCS, ISC, MR) em função das variáveis de entrada (concentração de NaOH e percentagens de CV e de EAEP) das misturas. Por meio da função Desejabilidade do Minitab 2018®, foi definida a melhor mistura de solo álcali-ativado (mistura ótima), ou seja, aquela que maximiza os resultados das múltiplas variáveis mecânicas previamente consideradas.

3.2.2.2 Ensaios de caracterização dos solos

3.2.2.2.1 Ensaios de caracterização física e classificação geotécnica

Os ensaios de caracterização geotécnica realizados para as amostras de ambos os solos foram os seguintes: análise granulométrica, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016a); limite de liquidez e limite de plasticidade, conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016b) e a NBR 7180 (ABNT, 2016c), respectivamente; e peso específico dos sólidos, conforme a ME 093 (DNER, 1994b).

Após a caracterização geotécnica, os solos foram classificados segundo os sistemas *Unified Soil Classification System* (USCS) e *Transportation Research Board* (TRB), segundo as prescrições contidas nas normas D2487-17 (ASTM, 2017) e M 145-91 (AASHTO, 2017), respectivamente. As amostras de solos também foram classificadas de acordo com a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), conforme as recomendações da norma

técnica CLA 259 (DNIT, 2023a). Para realizar a classificação através da metodologia MCT, as amostras de solo foram submetidas aos ensaios de Compactação dinâmica Mini-MCV, conforme o método de ensaio ME 258 (DNIT, 2023b), e de Perda de massa por imersão em água, conforme o método de ensaio ME 256 (DNIT, 2023c).

3.2.2.2.2 Ensaios de caracterização química, mineralógica e microestrutural

A caracterização química dos solos foi realizada pelas técnicas de Fluorescência de Raios-X (FRX). A caracterização mineralógica dos solos foi realizada utilizando a técnica de Difração de Raios-X (DRX). A caracterização microestrutural dos solos foi realizada pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3.2.2.3 Ensaios de compactação

Foi adotada a energia de compactação Proctor Intermediária, embora a NBR 12023 (ABNT, 2012a) admita a utilização da energia Proctor Normal para misturas solo-cimento. A escolha da energia intermediária fundamenta-se em estudos desenvolvidos por Rodrigues et al. (2021) e Rodrigues (2022), nos quais foi verificado que a energia Proctor Normal não proporcionou compactação adequada para misturas contendo escória de aciaria e cinza volante.

Sendo assim, visando a determinação da umidade ótima de compactação e do peso específico aparente seco máximo das amostras de solos, foram realizados ensaios de compactação na energia Proctor Intermediária, de acordo com a norma técnica NBR 7182 (ABNT, 2025).

3.2.2.4 Ensaios de desempenho mecânico

Para ambos os solos, foram moldados corpos de prova na umidade ótima de compactação da energia Proctor Intermediária, visando à determinação das seguintes propriedades de engenharia (aqui designadas propriedades de desempenho):

- Resistência à Compressão Simples (RCS), determinada segundo a norma técnica NBR 12770 (ABNT, 2022);
- Índice de Suporte Califórnia (ISC), determinado conforme a norma técnica NBR 9895 (ABNT, 2016d);
- Módulo de Resiliência (MR), determinada segundo a norma 134/2018 - ME (DNIT, 2018a).

Essas propriedades determinadas para os solos puros compactados foram comparadas com as determinadas para as respectivas misturas ótimas solo-CV-EAEP-NaOH. Para cada propriedade de desempenho, foi considerada a média de três determinações de ensaios, com coeficiente de variação máximo de 10%.

3.2.2.5 Ensaios de caracterização da escória de aciaria elétrica primária e da cinza volante

3.2.2.5.1 Ensaios de caracterização física

Amostras de escória de aciaria elétrica primária e de cinza volante foram submetidas à análise granulométrica por técnica de Difração à laser conforme a norma ISO 13320 (ISO, 2020). As respectivas massas específicas de amostras desses materiais foram determinadas mediante ensaios regidos pela norma técnica NBR 16605 (ABNT, 2017). Os respectivos índices de finura das amostras desses materiais foram determinados por peneiramento, segundo a NBR 11579 (ABNT, 2012b).

3.2.2.5.2 Ensaios de caracterização química, mineralógica e microestrutural

As composições químicas das amostras de escória de aciaria elétrica primária e de cinza volante foram determinadas através das técnicas de Fluorescência de Raios-X (FRX) e de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS). Adicionalmente, esses materiais foram submetidos ao ensaio de determinação de perda ao fogo, de acordo com a NBR NM 18 (ABNT, 2012c).

A caracterização mineralógica das amostras de escória de aciaria elétrica primária e de cinza volante foi realizada através da técnica de Difração de Raios-X (DRX). A caracterização microestrutural das amostras desses materiais foi realizada através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Em relação às amostras de EAEP, ainda foram realizados ensaios de determinação de óxido de cálcio livre, conforme a NBR NM 13 (ABNT, 2012d), e de determinação de resíduo insolúvel, de acordo com a NBR NM 15 (ABNT, 2012e).

3.2.2.5.3 Ensaios de caracterização ambiental

A caracterização ambiental das amostras de escória de aciaria elétrica primária e cinza volante foi realizada segundo os seguintes ensaios e respectivas normas:

- i Ensaio de lixiviação, segundo a NBR 10005 (ABNT, 2004b);
- ii Ensaio de solubilização, segundo a NBR 10006 (ABNT, 2004c).

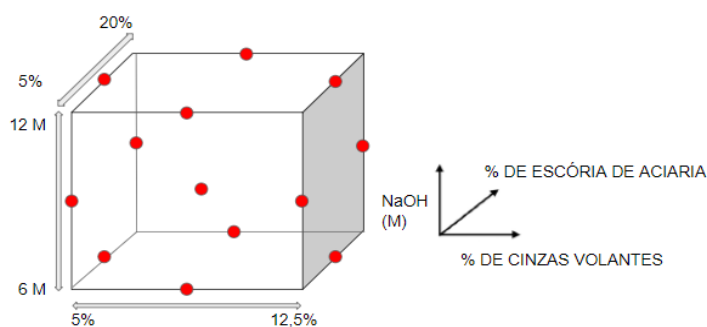
3.2.2.6 Protocolo de dosagem das misturas de solos álcali-ativados

3.2.2.6.1 Planejamento experimental baseado no método Box-Behnken

Por meio de extensiva consulta bibliográfica (Abdulwahed; Aljanabi; Abdulkareem, 2022; Adhikari; Khattak; Adhikari, 2021; Aouan *et al.*, 2021; Cristelo *et al.*, 2013; Dayalan, 2019; Mandal; Singh, 2016; Oormila; Preethi, 2014; Pinto, 2006; Rios *et al.*, 2015), foram definidas as seguintes faixas de variação dos componentes empregados na ativação alcalina dos solos: concentração de NaOH (ativador) na faixa de 6M a 12M; percentagem de escória de aciaria elétrica primária (precursor) na faixa de 5% a 20% em relação à massa seca total da mistura com solo; percentagem de cinza volante (precursor) na faixa de 5% a 12,5% em relação à massa seca total da mistura com solo.

Com a definição do intervalo de variação dos valores que cada componente (fator) pode assumir nas misturas solo-CV-EAEP-NaOH, foi aplicado, com auxílio do software Minitab 2018®, o método estatístico Box-Behnken para a realização do planejamento experimental, o qual constitui uma classe de experimentos de segunda ordem rotativos ou quase rotativos baseados em experimentos fatoriais incompletos de três níveis. Cada ponto experimental é caracterizado pela combinação de valores de concentração de NaOH (fator 1) e percentagens de escória de aciaria elétrica primária e cinza volante (fatores 2 e 3, respectivamente). Para estes três fatores, a representação gráfica do planejamento experimental pode ser vista em um cubo que consiste no ponto central e nos pontos médios das arestas (Figura 3.1).

Figura 3.1: Identificação e composição das misturas experimentais no diagrama obtido através do método central



Para a presente pesquisa, as concentrações de NaOH e as percentagens de escória de aciaria elétrica primária e de cinza volante de cada uma das misturas (Mi) do planejamento experimental definida no Box-Behnken são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Limites das variáveis independentes

MISTURA	Cinza Volante	Escória de Aciaria	Concentração de NaOH (M)
M1	5,00%	20,00%	9
M2	8,50%	5,00%	6
M3	12,00%	12,50%	6
M4	12,00%	5,00%	9
M5	8,50%	5,00%	12
M6	5,00%	12,50%	6
M7	12,00%	20,00%	9
M8	5,00%	5,00%	9
M9	5,00%	12,50%	12
M10	8,50%	12,50%	9
M11	8,50%	20,00%	12
M12	8,50%	12,50%	9
M13	8,50%	12,50%	9
M14	8,50%	20,00%	6
M15	12,00%	12,50%	12

3.2.2.7 Preparação das soluções alcalinas

As soluções alcalinas foram preparadas pela dissolução de flocos de NaOH em água destilada com antecedência mínima de 24 horas antes do uso. Como sua reação com a água é exotérmica, é necessário um período de resfriamento. As soluções alcalinas foram preparadas com molaridades de 6M, 9M e 12M, conforme tabela 3.1. Antes da compactação dos corpos de prova na umidade ótima de compactação, a solução ativadora foi adicionada à mistura seca de solo-CV-EAEP até a sua homogeneização por cerca de 10 minutos (Abdulwahed; Aljanabi; Abdulkareem, 2022).

3.2.2.8 Ensaios de compactação sobre as misturas do planejamento experimental

Visando a determinação da umidade ótima de compactação e do peso específico aparente seco máximo das amostras de cada uma das 15 (quinze) misturas (M1-M15) previstas no planejamento experimental (Tabela 3.1), foram realizados ensaios de compactação de acordo

com a norma técnica NBR 12023 (ABNT, 2012a), visando a determinação dos parâmetros de ótimo [teor de umidade ótimo ($w_{\text{ótimo}}$) e peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{\text{dmáx}}$)] na energia do Proctor Intermediário. Ainda que as misturas M1-M15 sejam referidas às soluções de NaOH, estas não foram adicionadas às misturas solo-CV-EAEP para fins de determinação das curvas de compactação, ou seja, os ensaios de compactação envolveram as misturas de solo-CV-EAEP (sem a solução ativadora). A solução ativadora de NaOH com sua correspondente concentração molar foi incorporada à umidade ótima de compactação de cada mistura M1-M15 para fins de moldagem dos corpos de prova destinados à determinação das variáveis de resposta consideradas na dosagem (RCS, ISC, MR).

3.2.2.9 Ensaios de determinação das variáveis de resposta das misturas do planejamento experimental

As variáveis de resposta correspondem aos valores das propriedades de engenharia das misturas solo-CV-EAEP-NaOH, compactadas na umidade ótima, que serviram de referência para a obtenção estatística de modelos matemáticos (equações) que as correlacionam com as variáveis de entrada (concentração de NaOH e percentagens de EAEP e de CV). Nesta pesquisa, foram adotadas e determinadas as seguintes variáveis de resposta:

- Resistência à Compressão Simples (RCS), determinada segundo a norma técnica NBR 12025 (ABNT, 2012f);
- Índice de Suporte Califórnia (ISC), determinado conforme a norma técnica NBR 9895 (ABNT, 2016d);
- Módulo de Resiliência (MR), determinado segundo a norma 181/2018 - ME (DNIT, 2018b).

Para cada uma das misturas solo-CV-EAEP-NaOH contempladas no planejamento experimental, essas propriedades foram determinadas em ensaios realizados sobre corpos de prova moldados na respectiva umidade ótima de compactação (na qual estará incluída a respectiva concentração de NaOH), submetidos à cura selada em câmara úmida por um período de 3 (três) dias, considerando-se a média de três determinações de ensaios, com coeficiente de variação máximo de 10%.

3.2.2.10 Modelos descritivos e superfícies de resposta

A partir dos resultados dos ensaios de determinação das variáveis de resposta (RCS, ISC e MR) das misturas M1-M15, foram definidos modelos matemáticos polinomiais através de um

processo interativo, utilizando-se o software Minitab 2018® e a análise de variância (ANOVA), de forma a obter as equações de regressão que melhor se ajustaram aos dados experimentais com relevância estatística (nível de significância de 5% e limite de confiança de 95%).

Cada um dos modelos matemáticos polinomiais descreveu uma das propriedades de engenharia analisadas (RCS, ISC e MR) em função das variáveis de entrada (concentração de NaOH e percentagens de EAEP e de CV). Para o modelo matemático que proporcionou a melhor resposta estatística para as propriedades analisadas, foi definida a correspondente superfície de resposta, a saber, o lugar geométrico dos pontos que representam o modelo ou a equação matemática resultante. Uma análise estatística comparativa foi realizada entre os valores das variáveis de resposta estimados pelos respectivos modelos matemáticos polinomiais e os determinados experimentalmente.

3.2.2.11 Otimização da dosagem através da função Desejabilidade

A otimização das misturas foi realizada utilizando a função Desejabilidade (*Desirability*) disponível no software Minitab 2018®. Essa função tem como objetivo encontrar as condições (composição dos fatores) que garantam a conformidade do comportamento de engenharia da mistura de solo álcali-ativado com os critérios técnicos (requisitos mínimos ou restrições) de todas as respostas de engenharia envolvidas e, simultaneamente, fornecer o melhor valor na resposta conjunta, sendo esse valor o mais desejável. Isso envolve a conversão das múltiplas variáveis de resposta em uma única função composta, seguida pela sua otimização (Candioti *et al.*, 2014).

Através dessa função, é obtido o Índice de Desejabilidade (ID), variando de 0 a 1, que representa o quão próximas as misturas otimizadas estão de atingir os valores de contorno definidos durante a otimização. A otimização da dosagem das misturas de solos álcali-ativados foi realizada com o objetivo de obter uma proporção dos componentes precursores EAEP - CV e uma concentração da solução ativadora de NaOH que maximizem as propriedades mecânicas de RCS, ISC e MR.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

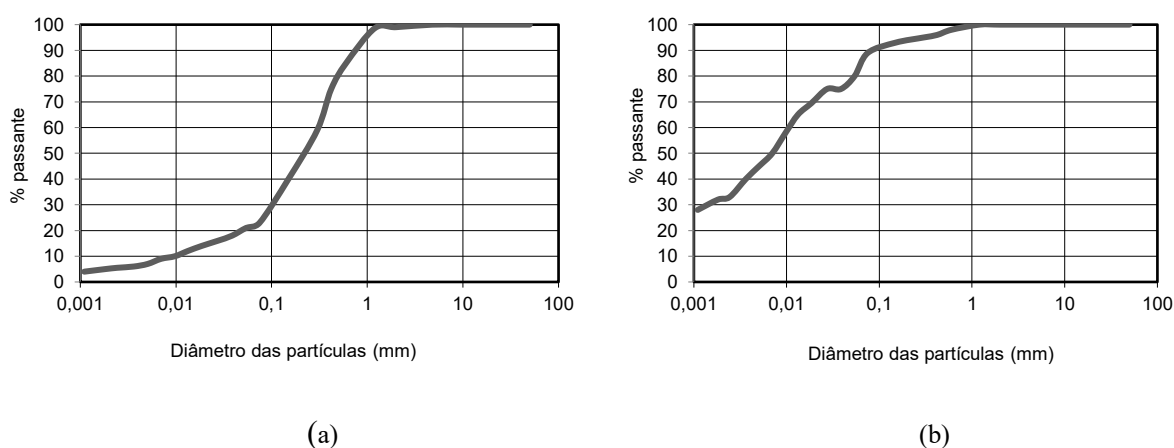
3.3.1 Ensaios de caracterização física e classificação geotécnica dos solos

Os ensaios realizados para fins de caracterização geotécnica das amostras de solos foram: análise granulométrica conjunta, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e peso específico dos sólidos (γ_s). Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Caracterização e classificação geotécnicas das amostras de solo analisadas.

Parâmetro		SOLO	
Frações granulométricas (%)		BR	VS
Areia	Grossa $0,6 \leq \varnothing < 2,0$ mm	3	15
	Média $0,2 \leq \varnothing < 0,6$ mm	16	40
	Fina $0,06 \leq \varnothing < 0,2$ mm	9	26
Silte	$0,002 \leq \varnothing < 0,06$ mm	7	16
Argila	$\varnothing < 0,002$ mm	65	3
Limite de Liquidez – LL (%)		66	26
Limite de Plasticidade – LP (%)		37	23
Índice de Plasticidade – IP (%)		29	3
Peso específico dos sólidos - γ_s (kN/m ³)		27,43	25,32

A Figura 3.2 apresenta as curvas granulométricas das amostras de solos BR e VS. As curvas de distribuição granulométrica permitiram concluir que a amostra de solo BR possui um alto teor de partículas de tamanho argila (argila areno-siltosa), enquanto na amostra de solo VS predominam as partículas de tamanho areia (areia silto-argilosa).

Figura 3.2: Curvas granulométricas das amostras de solo (a) VS e (b) BR.

Após a caracterização geotécnica, os solos foram classificados segundo os sistemas *Unified Soil Classification System* (USCS) e *Transportation Research Board* (TRB). As amostras de solos também foram classificadas de acordo com a metodologia MCT. As respectivas classes dos solos são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Classificações geotécnicas das amostras de solo analisadas.

CLASSIFICAÇÃO	SOLO	
	BR	VS
SUCS	CH (argila com areia)	SM (areia siltosa)
TRB	A-7-5 (17)	A-2-4 (0)
MCT	LG' (Laterítico Argiloso)	NA' (Não-Laterítico Arenoso)

3.3.2 Ensaios de caracterização química, mineralógica e microestrutural dos solos

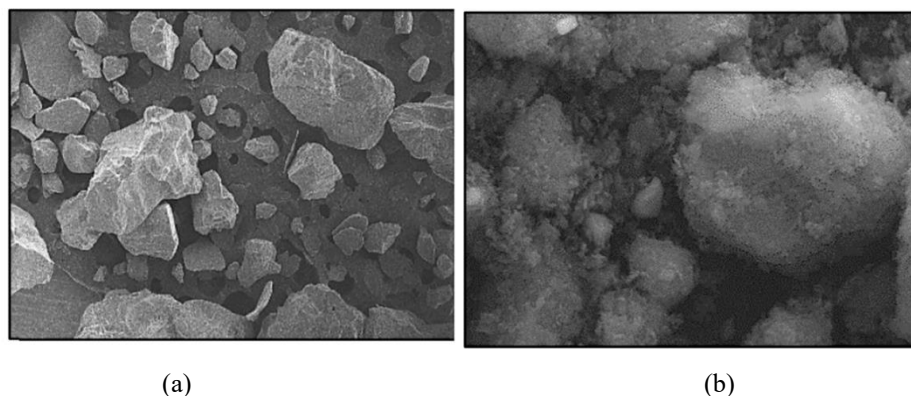
As análises químicas das amostras de solos foram realizadas pela técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), sendo os resultados apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Composições químicas dos solos obtidas por FRX

Solo	Compostos químicos		Unidade	Resultado
BR	Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	%	36,40
	Dióxido de Silício	SiO ₂	%	32,93
	Óxido Férnico	Fe ₂ O ₃	%	22,99
	Dióxido de Titânio	TiO ₂	%	3,31
	Óxido de Cálcio	CaO	%	0,21
	Óxido Sulfúrico	SO ₃	%	0,11
VS	Dióxido de Silício	SiO ₂	%	52,25
	Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	%	40,18
	Pentóxido de Fósforo	P ₂ O ₅	%	0,43
	Óxido Férnico	Fe ₂ O ₃	%	2,54
	Óxido de Potássio	K ₂ O	%	2,36
	Óxido de Cálcio	CaO	%	0,30
	Dióxido de Titânio	TiO ₂	%	0,23
	Cloro	Cl	%	0,11

Os resultados da análise de DRX são apresentados nas Figuras 3.3 (a) e 3.3 (b) para as amostras de solo BR e VS, respectivamente. Os seguintes minerais foram identificados: quartzo (Q), caulinita (K), gibbsita (Gi), goethita (Go), Microclínio (M), Biotita (B), Hematita (H) e Dolomita (D).

Figura 3.4: Microfotografias obtidas no MEV dos solos empregados na pesquisa: (a) Solo VS; (b) solo BR

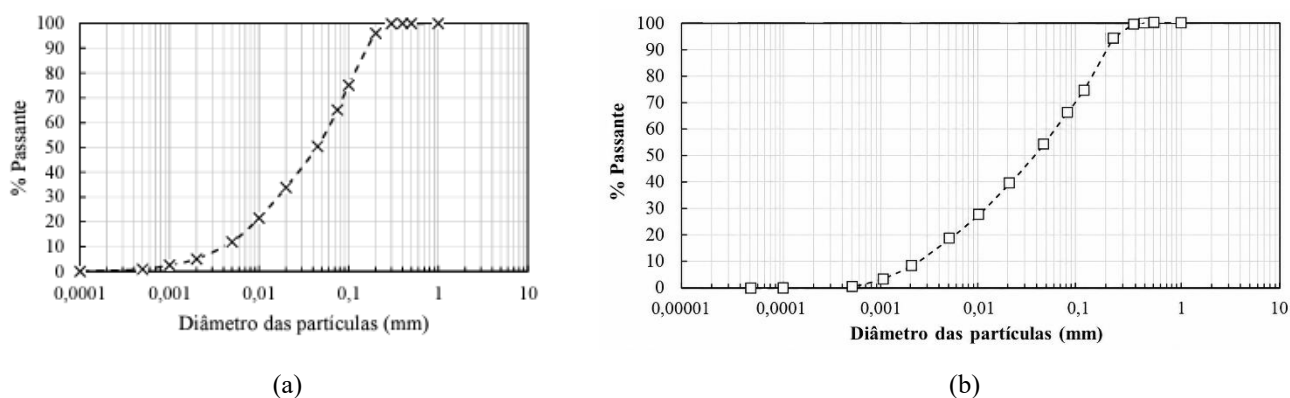


3.3.3 Ensaios de caracterização da escória de aciaria elétrica primária e da cinza volante

3.3.3.1 Ensaios de caracterização física

A amostra de cinza volante apresentou índice de finura por peneiramento de 23,71%, superfície específica de 1788,24 cm²/g e massa específica dos sólidos de 2,08 g/cm³. Já a amostra de EAEP moída apresentou índice de finura por peneiramento de 24,88%, superfície específica pelo método de Blaine de 2000,00 cm²/g e massa específica dos sólidos de 3,7 g/cm³. As Figuras 3.5 (a) e (b) apresentam a distribuição granulométrica da amostra de cinza volante e escória de aciaria, respectivamente.

Figura 3.5: Distribuição granulométrica: (a) Cinza Volante e (b) Escória de aciaria primária



3.3.4 Ensaios de caracterização química, mineralógica e microestrutural

3.3.4.1.1 Escória de aciaria

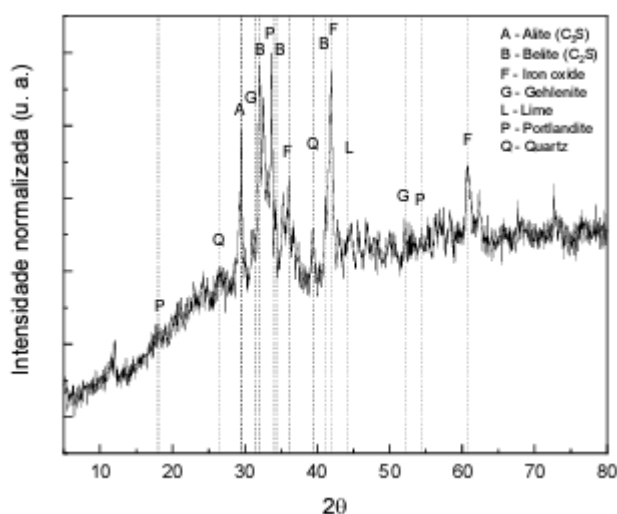
Os resultados da análise por FRX e perda ao fogo para a amostra de EAEP são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Composição química e perda ao fogo de amostra de EAEP.

Material	Compostos químicos		Unidade	Resultado
EAEP	Dióxido de silício	SiO ₂	%	21,35
	Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	%	5,17
	Óxido Férrico	Fe ₂ O ₃	%	24,50
	Óxido de cálcio	CaO	%	33,15
	Óxido de magnésio	MgO	%	1,01
	Óxido de potássio	K ₂ O	%	0,30
	Óxido de sódio	Na ₂ O	%	0,00
	Dióxido de titânio	TiO ₂	%	0,64
	Trióxido de enxofre	SO ₃	%	0,18
	Cloro	Cl	%	0,32
	Perda ao fogo	PF	%	0,19

A Figura 3.6 mostra os resultados da análise mineralógica da amostra de EAEP obtida por difração de raios-X (DRX). No difratograma, percebe-se uma ampla variedade de minerais presentes no material. Os picos de alta intensidade, correspondentes ao óxido de cálcio e ao óxido de ferro, confirmam os dados obtidos na análise por fluorescência de raios-X (FRX). A presença de óxidos de cálcio e magnésio pode causar problemas de expansão volumétrica devido à sua reação com a água (Brand *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020). Já os óxidos de ferro contribuem para a elevada dureza e densidade da EAEP (Arribas *et al.*, 2015).

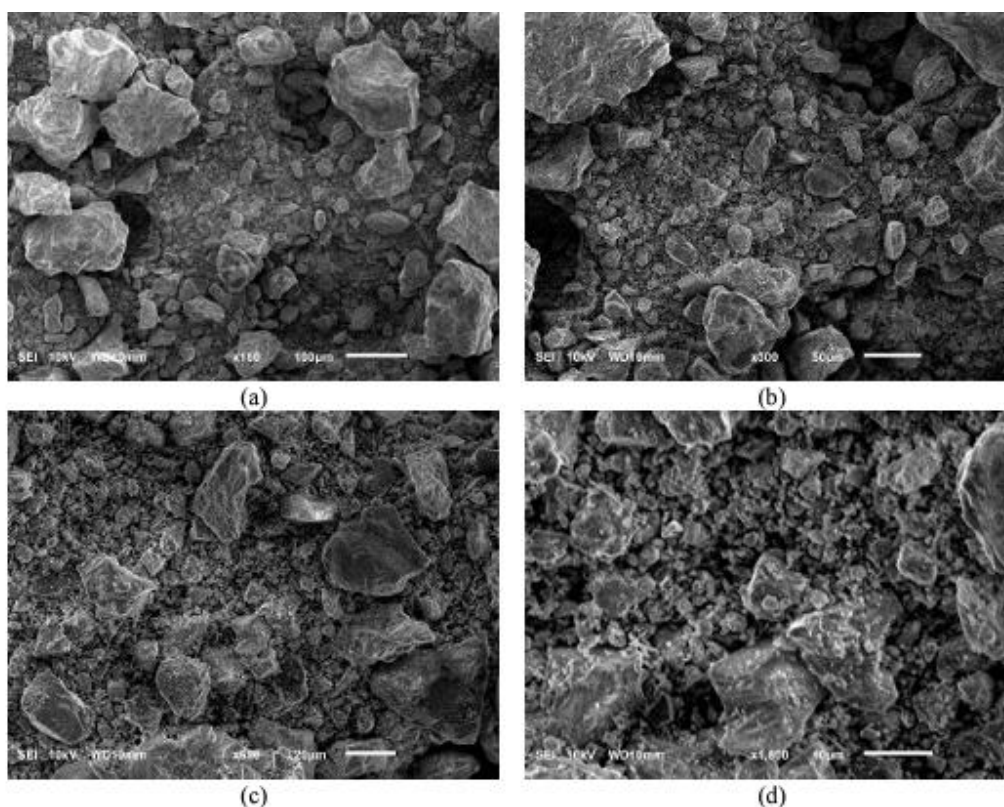
Figura 3.6: Difratograma da amostra de EAEP obtido por DRX.



A amostra de EAEP apresentou 7,94% de resíduo insolúvel e 0,74% de cal livre. O valor de cal livre, inferior a 1%, enquadra o material como adequado para aplicação em obras rodoviárias (Graffitti, 2002).

A Figura 3.7 exibe as micrografias da amostra de EAEP obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As imagens revelam partículas com formas variadas, variando de alongadas a cúbicas, e com superfícies rugosas e irregulares. Essa morfologia influencia diretamente a trabalhabilidade de materiais cimentícios (Coppola *et al.*, 2016; Lim; Cheah; Ramli, 2019), além de favorecer a aderência e a interação com outros componentes, o que pode resultar em maior resistência mecânica do material composto (Lim; Cheah; Ramli, 2019). A rugosidade e a forma das partículas também são determinantes no ângulo de atrito interno do material, sendo que partículas mais irregulares e ásperas tendem a aumentar esse ângulo e, por consequência, a resistência ao cisalhamento (Cho; Dodds; Santamarina, 2006; Marzulli *et al.*, 2021; Sandeep; He; Senetakis, 2018).

Figura 3.7: Micrografias da amostra de EAEP obtidas por MEV: (a)x160, (b)x300, (c)x650 e (d)x1.800.

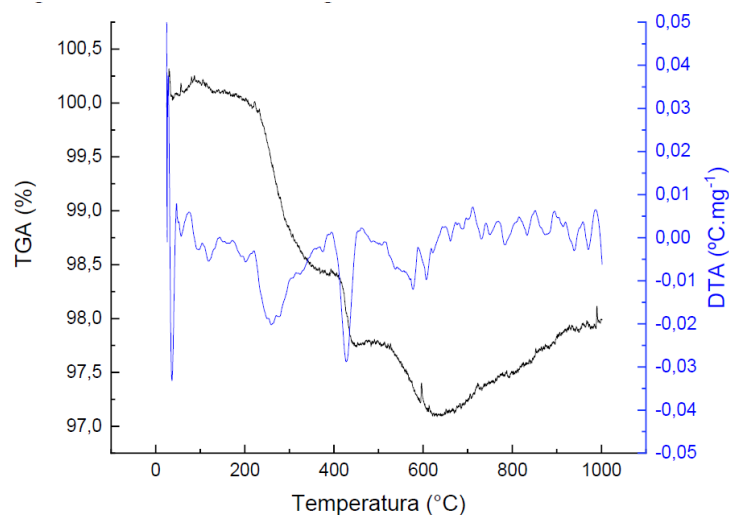


O ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi realizado para se obter os elementos químicos presentes na amostra de EAEP (Tabela 3.6).

Tabela 3.6: Elementos químicos presentes na amostra de EAEP

Fórmula química	% em massa
C	3.51
O	35.17
Na	0.04
Mg	2.65
Al	2.79
Si	5.80
P	0.34
S	0.15
K	0.03
Ca	29.57
Mn	2.92

A análise termogravimétrica da amostra de EAEP é apresentada na Figura 3.8. As maiores variações de massa foram observadas nas duas primeiras faixas de temperatura, com destaque para a decomposição do Ca(OH)_2 entre 400°C e 500°C, o que confirma os resultados obtidos nas análises de FRX e DRX, evidenciando a presença de compostos de cálcio.

Figura 3.8: Análise termogravimétrica da amostra de EAEP.

3.3.4.2 Cinza Volante

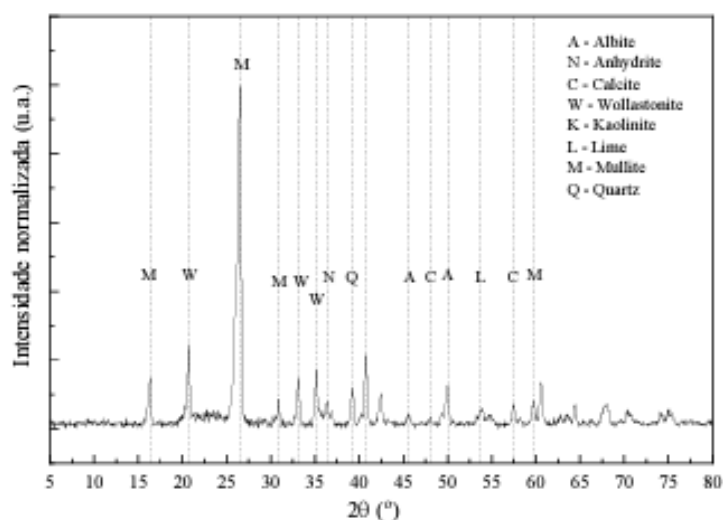
Os resultados da análise por FRX e perda ao fogo são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Composição química e perda ao fogo de amostra de Cinza Volante

Material	Compostos químicos		Unidade	Resultado
Cinza Volante	Dióxido de silício	SiO ₂	%	57,50
	Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	%	22,69
	Óxido Férrico	Fe ₂ O ₃	%	4,00
	Óxido de cálcio	CaO	%	1,66
	Óxido de magnésio	MgO	%	1,03
	Óxido de potássio	K ₂ O	%	2,67
	Óxido de sódio	Na ₂ O	%	1,33
	Dióxido de titânio	TiO ₂	%	1,06
	Trióxido de enxofre	SO ₃	%	0,35
	Cloro	Cl	%	0,20
	Perda ao fogo	PF	%	1,50

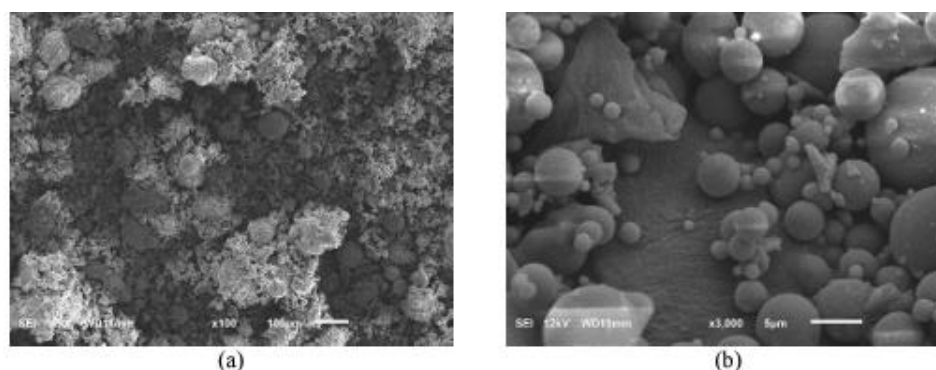
A mineralogia, obtida por DRX, é apresentada na Figura 3.9. Observou-se que a alta intensidade do composto químico mullite (Al₂O₃.SiO₂) está de acordo com o resultado encontrado na análise química por FRX. Nesse ponto, destaca-se que, nas cinzas volantes, esses compostos (SiO₂ e Al₂O₃) estão em fase amorfa, proporcionando a reação efetiva com NaOH (Phetchuay *et al.*, 2016).

Figura 3.9: Difratoograma correspondente à cinza volante



As imagens microestruturais da amostra de cinza volante (Figura 3.10) mostraram que o material apresenta partículas de diversos diâmetros com forma predominantemente esférica.

Figura 3.10: Micrografias de amostra de cinza volante obtidas por MEV: (a)x100 e (b)x3.000.



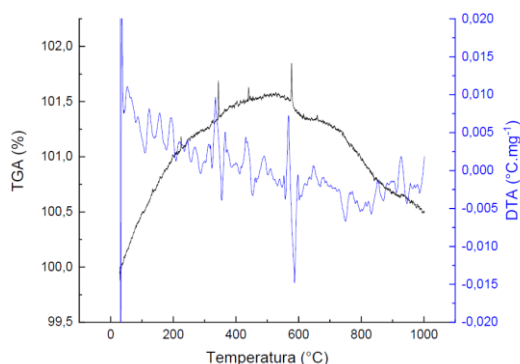
Através do ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (Tabela 3.8), verificou-se que a amostra de cinza volante é constituída, principalmente, pelos elementos químicos Carbono, Oxigênio, Silício e Alumínio, estando de acordo com os resultados obtidos por FRX.

Tabela 3.8: Elementos químicos presentes na amostra de cinza volante.

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

O resultado da análise termogravimétrica realizada sobre a amostra de cinza volante é apresentado na Figura 3.11. Na faixa de temperatura entre 340°C e 460°C, há a decomposição de hidróxido de cálcio, entre 530 °C e 700°C ocorre a decomposição de carbonato de cálcio, e acima de 820°C ocorre a decomposição de minerais sulfato (Consoli *et al.*, 2018; Coudert *et al.*, 2019).

Figura 3.11: Análise termogravimétrica da amostra de cinza volante.



3.3.5 Ensaios de caracterização ambiental

Nas Tabelas 3.9 e 3.10, são apresentados os resultados obtidos nas análises dos extratos lixiviados e solubilizados das amostras de EAEP e cinza volante. São também apresentados os limites máximos de concentração dos elementos para a classificação dos resíduos industriais.

Tabela 3.9: Concentrações dos elementos nos extratos lixiviados.

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

Tabela 3.10: Concentrações dos elementos nos extratos solubilizados

Elemento	Limite máximo (mg/L)	EAEP (mg/L)	Cinza volante (mg/L)
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
K	-	8,47	13,33
Ca	-	138,36	212,82

As análises dos extratos lixiviados das amostras de EAEP moída e cinza volante demonstraram que as concentrações dos elementos ficaram abaixo dos limites máximos permitidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004d), o que indica que esses materiais não são classificados como resíduos perigosos ao meio ambiente. Dessa forma, ambas as amostras podem ser empregadas em misturas com solo, com vistas à utilização em camadas estruturais de pavimentação. No entanto, no extrato solubilizado da amostra de EAEP moída, observou-se que os teores de ferro e alumínio ultrapassaram os limites estabelecidos para que um resíduo seja considerado inerte. Os valores máximos aceitáveis para esses elementos (0,3 mg/L para ferro e 0,2 mg/L para alumínio) são adotados pela Portaria GM/MS nº 888 (2021) como parâmetros para garantir a potabilidade da água. Isto indica que a amostra de EAEP moída não deve estar em contato direto com as reservas de água.

Para a cinza volante, o extrato solubilizado apresentou teor de cromo acima do limite de 0,05 mg/L, valor também previsto na mesma portaria ministerial como referência para água potável.

Com base nesses resultados, tanto a EAEP moída quanto a cinza volante foram enquadradas como resíduos da Classe II A – não perigosos e não inertes. Conclui-se, portanto, que esses resíduos industriais apresentam baixo potencial de impacto ambiental, sendo tecnicamente viáveis para uso como agentes estabilizantes em camadas estruturais de pavimentos.

3.3.6 Ensaios de compactação

As Tabelas 3.11 e 3.12 apresentam os parâmetros de ótimo [teor de umidade ótimo ($W_{ótimo}$) e peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dmáx}$)] obtidos através das curvas de compactação das misturas analisadas e compactadas na energia do Proctor Intermediário.

Tabela 3.11: Parâmetros de ótimo (energia do Proctor Intermediário) das misturas analisadas para as duas amostras de solo

MISTURA	SOLO BR		SOLO VS	
	$W_{ótimo}(\%)$	$\gamma_{dmáx} (kN/m^3)$	$W_{ótimo} (\%)$	$\gamma_{dmáx} (kN/m^3)$
Solo Puro	26,29	15,3	14,04	17,64
M1	19	17,21	12,00	18,93
M2	24	15,45	12,50	17,70
M3	22	15,86	13,30	17,93
M4	22,5	15,69	13,00	17,39

Tabela 3.12: Parâmetros de ótimo (energia do Proctor Intermediário) das misturas analisadas para as duas amostras de solo (continuação)

MISTURA	SOLO BR		SOLO VS	
	W _{ótimo} (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	W _{ótimo} (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)
M5	24	15,45	12,50	17,70
M6	23	16,13	12,50	18,30
M7	21	16,44	13,00	18,30
M8	23,7	15,81	12,50	18,18
M9	23	16,13	12,50	18,30
M10	23,4	15,83	12,80	17,98
M11	21,3	16,53	12,20	18,40
M12	23,4	15,83	12,80	17,98
M13	23,4	15,83	12,80	17,98
M14	21,3	16,53	12,20	18,40
M15	22	15,99	13,30	17,93

Verificou-se uma redução do teor de umidade ótimo em todas as misturas, para ambas as amostras de solo, quando comparadas às amostras em seu estado natural. As maiores reduções foram registradas na mistura M1, tanto para o solo BR quanto para o solo VS. Essa diminuição do teor de umidade ótimo foi mais acentuada com o aumento do teor de resíduos, especialmente com o acréscimo de EAEP. Essa tendência também foi identificada em estudos anteriores, como os de Aldeeky e Al Hattamleh (2017), Gunarti e Raharja (2020), Sebbar *et al.* (2020) e Rodrigues (2022).

Para ambas as amostras de solo, observou-se um aumento nos valores de peso específico aparente seco máximo à medida que se elevou o teor de resíduos nas misturas, especialmente com a inclusão de EAEP. Esse aumento está relacionado ao fato de a EAEP possuir massa específica real superior à dos solos analisados. A mistura M1 apresentou os maiores valores de peso específico aparente seco máximo entre todas as combinações testadas, indicando uma estrutura mais compacta, o que pode favorecer o desempenho mecânico dos solos estabilizados.

3.3.7 Propriedades mecânicas analisadas

Utilizando os parâmetros de ótimo dos ensaios de compactação (W_{ótimo} e $\gamma_{dm\acute{a}x}$), foram confeccionados os corpos de prova para os ensaios mecânicos de RCS, MR e ISC. Os resultados obtidos a partir desses ensaios são apresentados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13: RCS, ISC e MR das misturas analisadas.

MISTURA	SOLO BR			SOLO VS		
	RCS (kPa)	ISC (%)	MR (MPa)	RCS (kPa)	ISC (%)	MR (MPa)
Solo Puro	26,29	15,30	158,00	14,04	17,64	85,44
M1	1706,40	90,96	285,44	1682,85	120,12	255,71
M2	1092,47	143,12	137,94	699,68	41,12	64,69
M3	940,86	121,6	290,00	913,97	81,35	72,36
M4	1166,20	157,00	357,00	917,97	107,96	129,89
M5	1933,00	71,94	401,07	766,94	104,88	189,35
M6	1292,92	117,84	228,94	1171,56	98,08	121,13
M7	1790,70	174,20	392,81	1620,30	122,25	208,71
M8	1575,04	89,70	332,88	915,69	119,76	145,82
M9	957,17	76,62	291,81	871,24	137,16	278,06
M10	1006,28	91,83	265,89	974,57	128,64	173,00
M11	1597,87	103,32	141,33	1274,99	132,00	202,29
M12	1006,28	91,83	265,89	974,57	128,64	153,89
M13	1006,28	91,83	265,85	974,57	128,64	153,89
M14	1951,17	85,28	365,39	1545,80	114,96	188,67
M15	1910,47	147,48	426,88	844,49	101,52	153,00

3.3.8 Análise de Variância (ANOVA)

Para determinar a significância estatística de cada fator controlável sobre as variáveis resposta (RCS, MR e ISC), realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) a um nível de significância de 5% ($p = 0,05$), cujos resultados estão apresentados na Tabela 3.14. Nas Figuras 3.12, 3.13 e 3.14, apresentam-se os gráficos de Pareto dos efeitos padronizados para as respostas RCS, MR e ISC, respectivamente. A linha tracejada representa a linha de referência que indica a significância estatística dos termos, apresentando-se o valor t associado à hipótese nula para $\alpha = 0,05$.

Tabela 3.14: Análise de Variância da otimização das respostas RCS, MR e ISC.

Termo	Valor de <i>p</i>					
	SOLO VS			SOLO BR		
	RCS	MR	ISC	RCS	MR	ISC
Modelo	0,000*	0,020*	0,101	0,011*	0,004*	0,029*
Linear	0,000*	0,004*	0,038*	0,052	0,018*	0,015*
Cinza Volante (A)	0,051	0,023*	0,219	0,55	0,008*	0,003*
Escória de Aciaria (B)	0,000*	0,007*	0,047*	0,031*	0,598	0,859
Concentração de NaOH (C)	0,008*	0,004*	0,025*	0,048*	0,028*	0,171
Quadrático	0,001*	0,462	0,162	0,009*	0,028*	0,086
A ² (Cinza Volante ao quadrado)	0,013*	0,498	0,778	0,297	0,008*	0,023*
B ² (Escória de Aciaria ao quadrado)	0,000*	0,318	0,333	0,002*	0,371	0,238
C ² (Concentração de NaOH ao quadrado)	0,005*	0,348	0,044*	0,077	0,253	0,857
Interação de dois Fatores	0,038*	0,186	0,489	0,010*	0,002*	0,067
A × B (Cinza Volante × Escória de Aciaria)	0,527	0,574	0,674	0,167	0,192	0,622
A × C (Cinza Volante × Concentração de NaOH)	0,06	0,2	0,571	0,008*	0,237	0,078
B × C (Escória de Aciaria × Concentração de NaOH)	0,017*	0,085	0,195	0,011*	0,000*	0,032*

* valor-*p* ≤ 0,05.

Figura 3.12: Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados – Variável de Resposta RCS: (a) VS; (b) BR

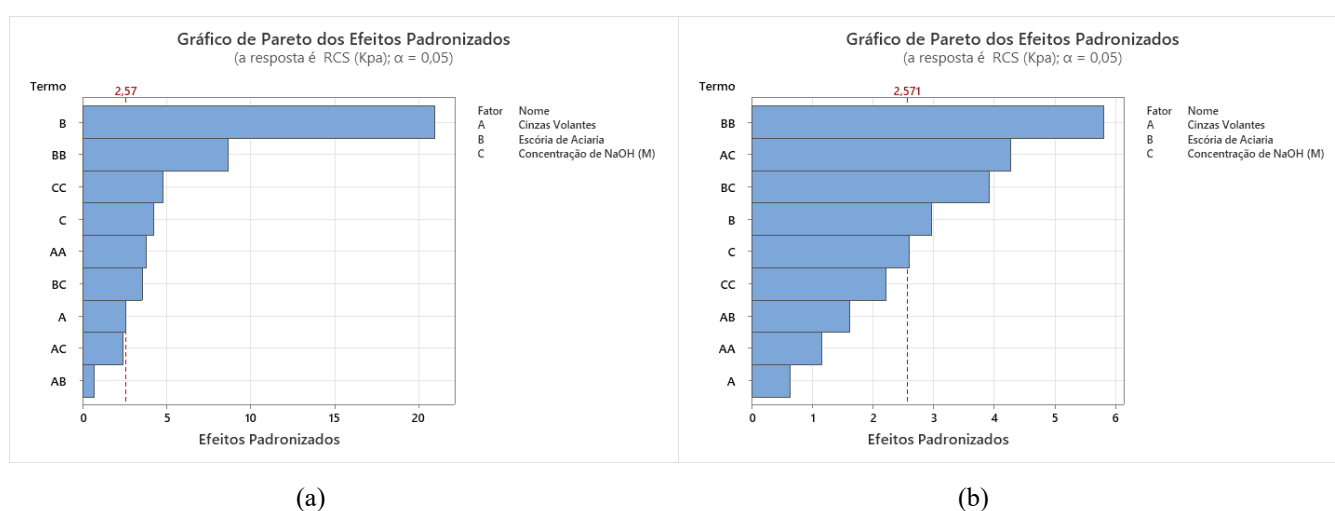
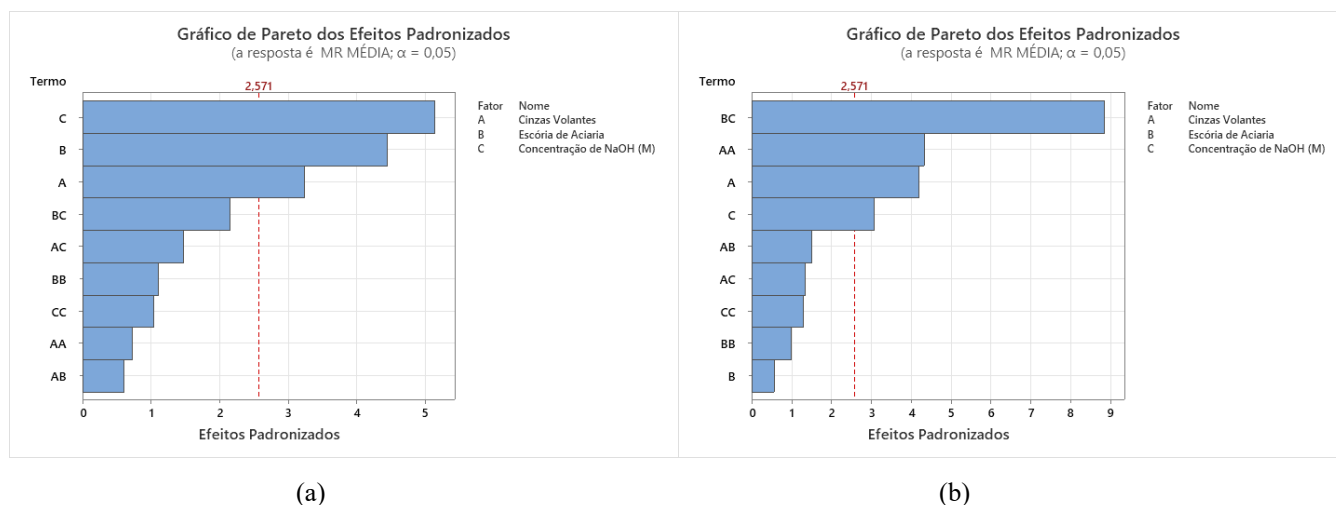
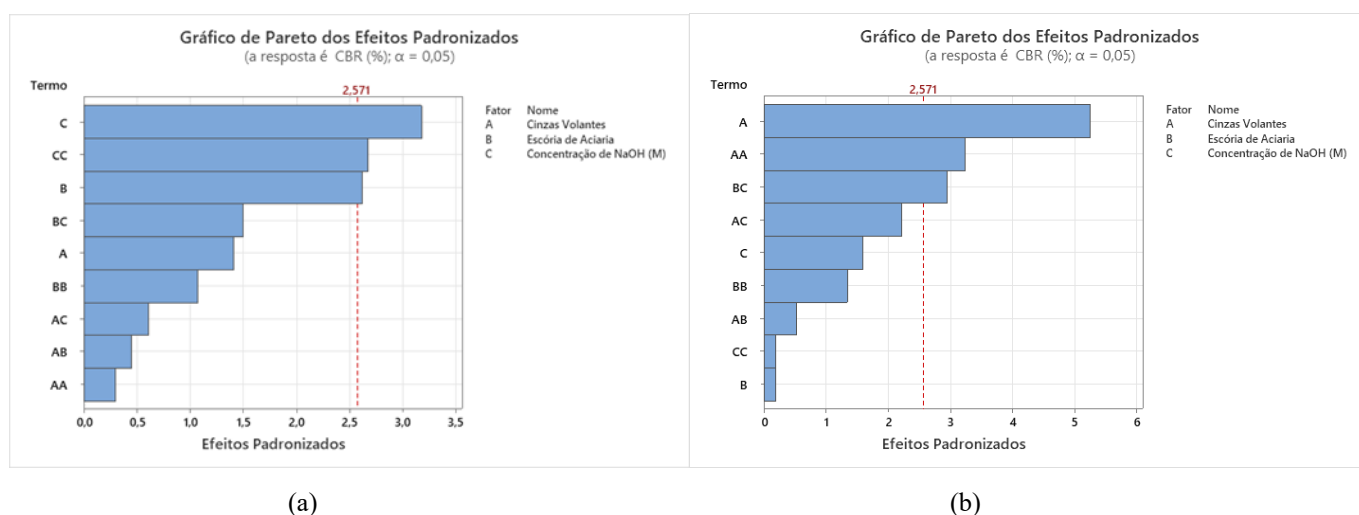


Figura 3.13: Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados – Variável de Resposta MR: (a) VS; (b) BR**Figura 3.14: Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados – Variável de Resposta ISC: (a) VS; (b) BR**

A partir dos dados apresentados na Tabela 3.14 e na Figura 3.12, verifica-se que, para o solo VS, os efeitos principais dos fatores Escória de Aciaria (B) e Concentração de NaOH (C) apresentaram significância estatística sobre a RCS. Nesse ponto, destaca-se o fator Escória de Aciaria (B) que apresentou valores de p altamente significativos, sendo o valor- $p = 0,000$, o que demonstra o efeito expressivo desse fator sobre a resposta mecânica das misturas analisadas.

A análise dos termos quadráticos indicou efeito significativo para o termo B^2 (escória de aciaria ao quadrado) em ambos os solos (valor- $p = 0,000$, no SOLO VS, e valor- $p = 0,002$, no SOLO BR), evidenciando uma resposta não linear à variação do teor de escória.

A análise das interações revelou que, no SOLO BR, os efeitos combinados entre os fatores foram estatisticamente significativos (valor- $p = 0,010$), especialmente para as interações $B \times C$ (valor- $p = 0,011$) e $A \times C$ (valor- $p = 0,008$), sugerindo interação entre os fatores escória e concentração de NaOH, bem como entre cinza volante e concentração de NaOH, sobre a resposta RCS.

Com base nos dados da Tabela 3.14 e da Figura 3.13, observa-se que, semelhantemente ao que foi observado na resposta mecânica RCS, os efeitos principais dos fatores Escória de Aciaria (B) e Concentração de NaOH (C) apresentaram significância estatística sobre a resposta MR. No que se refere à análise das interações entre os fatores Teor de Escória de Aciaria e Concentração de NaOH, revelou-se uma significância estatística para o SOLO BR. Isso evidencia que, para o solo BR, os efeitos combinados entre a escória e o ativador exercem papel determinante na resposta mecânica. Já no solo VS, as interações não se mostraram estatisticamente significativas, indicando comportamento independente entre os fatores.

Os resultados apresentados na Tabela 3.14 e na Figura 3.14 mostram que os efeitos principais dos fatores Escória de Aciaria (B) e Concentração de NaOH (C) apresentaram significância estatística sobre o ISC para o Solo VS. Para o solo BR, o fator Cinza Volante (A) apresentou-se estatisticamente significativo. A análise dos termos quadráticos indicou efeito significativo para o termo C^2 e A^2 para os solos VS e BR, respectivamente, evidenciando uma resposta não linear à variação dos fatores indicados. A análise das interações revelou que, no SOLO BR, os efeitos combinados entre os fatores $B \times C$ foram estatisticamente significativos ($p = 0,032$), sugerindo interação entre os fatores escória e concentração de NaOH sobre a resposta ISC.

3.3.9 Modelo de regressão

Os resultados dos ensaios de RCS, MR e ISC foram ajustados de forma não linear para a obtenção dos modelos de regressão, conforme apresentado na Tabela 3.15.

Tabela 3.15: Equações referentes às superfícies de resposta de RCS, MR e ISC.

	Solo	Equação de Regressão	R ²	R ² (aj)
RCS	VS	$727 - 18457 A - 970 B + 213,0 C + 76773 A^*A + 38326 B^*B - 13,14 C^*C - 6174 A^*B + 550 A^*C - 376 B^*C$	99,17	97,68
	BR	$5034 - 45693 A - 10401 B - 405 C + 75523 A^*A + 81918 B^*B + 19,62 C^*C + 46966 A^*B + 3108 A^*C - 1326 B^*C$	94,69	85,14
MR	VS	$-312 - 205 A + 1241 B + 74,4C + 8024 A^*A + 2656 B^*B - 1,55C^*C - 2959 A^*B - 182A^*C - 123,4 B^*C$	93,03	80,5
	BR	$-66 - 10020 A + 3499 B + 99,7 C + 50666 A^*A + 2505 B^*B - 2,06 C^*C + 7929 A^*B + 176 A^*C - 541,3 B^*C$	96,33	89,73
ISC	VS	$-242 + 353 A + 934 B + 59,5 C - 1971 A^*A - 1547 B^*B - 2,411 C^*C + 1327 A^*B - 45,0 A^*C - 51,9 B^*C$	85,56	59,56
	BR	$467 - 4370 A - 1505 B - 25,8 C + 20859 A^*A + 1881 B^*B - 0,166 C^*C + 1518 A^*B + 159,8 A^*C + 99,1 B^*C$	91,78	76,99

Cinza Volante - A; Escória de Aciaria -B; Concentração de NaOH – C

Para a resposta RCS, os valores de R² dos modelos propostos foram de 99,17% e 94,69% para os solos VS e BR, respectivamente. Os valores de R² ajustado foram de 97,67% e 85,14%, respectivamente, indicando um elevado grau de ajuste em relação às respostas obtidas experimentalmente. Para o MR, os valores de R² foram de 93,03% (VS) e 96,33% (BR), enquanto os valores de R² ajustado alcançaram 80,50% e 89,73%, respectivamente, também demonstrando boa capacidade preditiva dos modelos. Para o ISC, os valores de R² obtidos foram de 85,56% para o solo VS e 91,78% para o solo BR, evidenciando que os modelos representam adequadamente a variabilidade experimental observada.

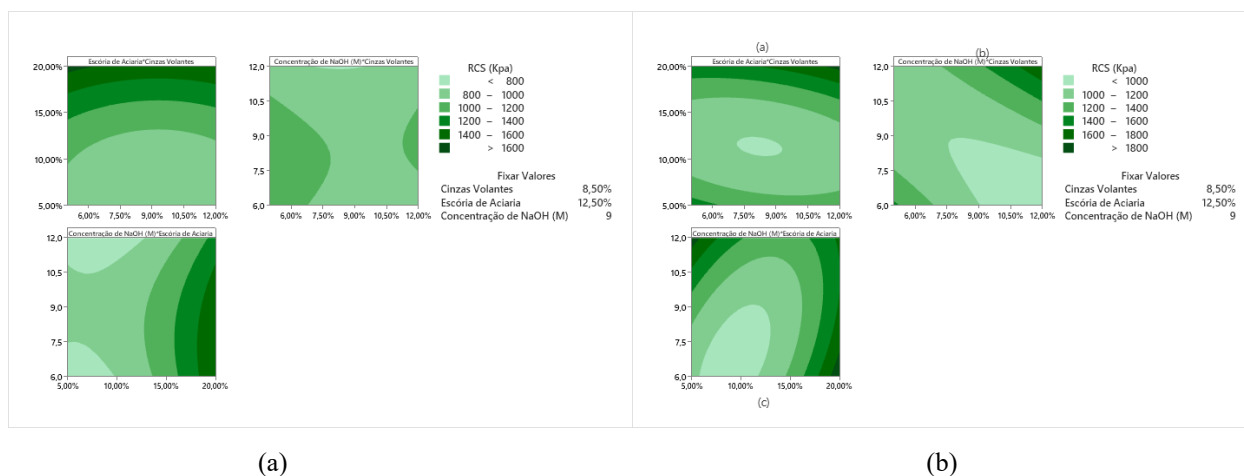
3.3.10 Superfícies de Resposta

Os resultados dos ensaios de RCS, MR e ISC foram inseridos no software Minitab 2018®, para a determinação das superfícies de resposta para cada amostra de solo.

3.3.10.1 RCS

As superfícies de respostas encontradas através dos modelos estatísticos para as misturas solo-resíduos para a variável de resposta RCS são apresentadas na Figura 3.15.

Figura 3.15: Superfícies de resposta para a RCS das misturas: (a) Solo VS; (b) Solo BR



As superfícies de contorno ilustraram as interações entre os principais parâmetros que influenciam a RCS de misturas solo-resíduo estabilizadas por ativação alcalina. No caso do solo VS, observou-se que a interação entre Escória de Aciaria e Cinza Volante (Figura 3.15 (a)) resultou em um aumento progressivo da resistência com o acréscimo do teor de escória. De forma semelhante, a interação entre Escória de Aciaria e Concentração de NaOH (Figura 3.15 (a)) demonstra um incremento na RCS à medida que se elevam os teores de EAEP.

Esse comportamento está em consonância com a expressiva significância estatística do fator escória de aciaria na resposta RCS, conforme evidenciado no gráfico de Pareto (Figura 3.12). Esses resultados corroboram os estudos de Hayder *et al.* (2025), que evidenciaram que o aumento no teor de CaO no precursor leva a um aumento notável na resistência. Essa melhoria pode ser explicada pela formação dos principais produtos de hidratação, como aluminossilicato de cálcio hidratado (CASH) e silicato de cálcio hidratado (CSH). Esses produtos são formados simultaneamente com géis de aluminossilicato de sódio hidratado (NASH) durante o processo de geopolimerização (Abdalqader Jin; Al-Tabbaa, 2016; Jeremiah *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2021).

Quando observadas as superfícies de contorno para o solo BR, a interação entre Cinza Volante e Concentração de NaOH (Figura 3.15 (b)) indica que os maiores valores de RCS ocorrem em uma faixa com alto teor de cinza combinada com concentrações elevadas de NaOH. Fora dessa faixa, a resistência diminui, indicando que o simples aumento de um dos fatores isoladamente não garante melhor desempenho mecânico. Esse comportamento corrobora a significância estatística da interação entre esses fatores, conforme evidenciado na análise de variância.

Esse resultado pode ser atribuído ao papel da solução alcalina na ativação do precursor. Concentrações mais elevadas de NaOH favorecem a dissolução das partículas de cinza volante, promovendo a liberação de sílica e alumina que reagem com os íons de sódio para formar géis do tipo NASH, responsáveis pelo ganho de resistência (Sukprasert *et al.*, 2019). Ainda, conforme apontado por Phetchuay *et al.* (2016), o aumento simultâneo do teor de cinza volante e da concentração de NaOH intensifica o processo de geopolimerização, resultando em incrementos significativos na resistência à compressão.

No que se refere à interação entre escória de aciaria e concentração de NaOH (Figura 3.15 (b)), observa-se uma tendência de maiores valores de resistência em misturas com alto teor de escória e reduzidas concentrações de NaOH. Em teores de escória reduzidos, o incremento da resistência é observado em concentrações mais elevadas de NaOH, corroborando com a significância estatística da interação entre os fatores. Esses resultados estão alinhados com a literatura, que destaca a influência da concentração do ativador alcalino sobre o desempenho mecânico de geopolímeros à base de escória de alto-forno, caracterizada por elevados teores de cálcio (Fernández-Jiménez; Palomo; Puertas, 1999; Wang; Scrivener; Pratt, 1994).

Em sistemas ricos em cálcio, como é o caso de elevadas concentrações de EAEP, concentrações de NaOH superiores a 10 M dificultam a dissolução do Ca(OH)_2 , devido ao excesso de íons hidroxila (OH^-), comprometendo a formação do gel CSH (Ferreira, 2023; Pacheco-Torgal; Castro-Gomes; Jalali, 2008). Por outro lado, quando a concentração do ativador é inferior a 5 M, a menor disponibilidade de OH^- favorece a dissolução do hidróxido de cálcio, liberando íons Ca^{2+} suficientes para a formação mais efetiva do gel CSH.

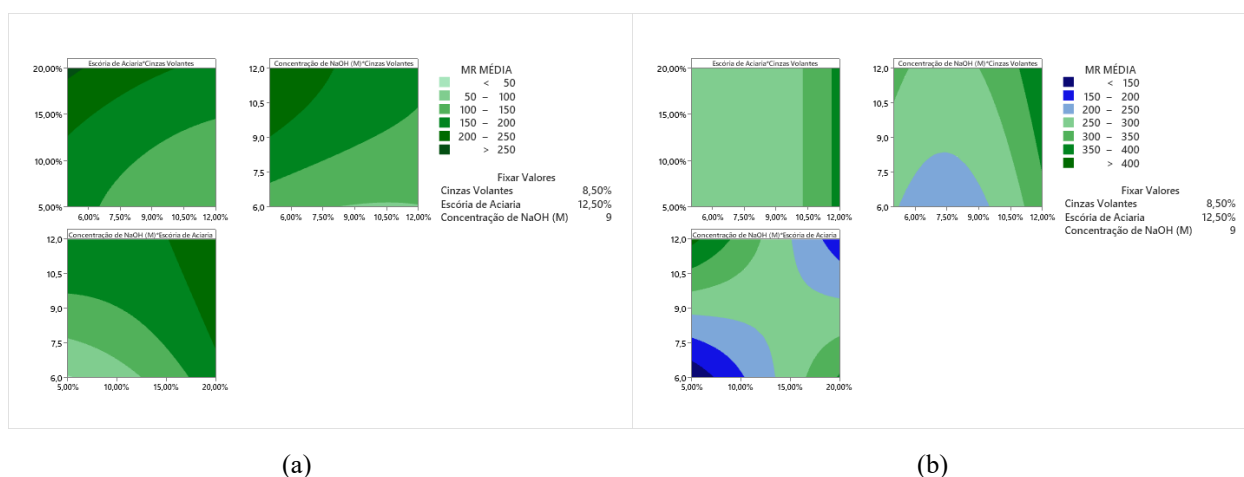
Com base nos resultados descritos, percebe-se que a eficácia da estabilização do solo ativado por álcalis é influenciada pelo tipo de solo e suas propriedades. Este resultado sugere que as características dos solos influenciam os mecanismos de ativação alcalina (Reddy *et al.*, 2024). Na presente pesquisa, apesar de os teores de sílica e alumina disponíveis serem similares em ambos os solos, a resposta diferenciada pode estar relacionada a propriedades intrínsecas dos materiais. Entre essas, destaca-se a diferenciação de superfícies específicas entre os solos. Solos com maior superfície específica oferecem mais pontos de contato para as reações de dissolução e polimerização, promovendo uma formação mais eficiente dos géis de reação (Reddy *et al.*, 2024). Adicionalmente, observa-se que o solo BR apresenta em sua composição cerca de 20% de Fe_2O_3 . De acordo com a literatura, o íon Fe^{3+} pode atuar como sítio de nucleação na formação dos géis geopoliméricos, em razão de sua similaridade de carga e raio iônico com o Al^{3+} , o que

pode contribuir para a formação de uma matriz mais estruturada e resistente (Rivera *et al.*, 2020).

3.3.10.2 Módulo de Resiliência (MR)

As superfícies de respostas encontradas através dos modelos estatísticos para as misturas solo-resíduos para a variável de resposta MR são apresentadas na Figura 3.16.

Figura 3.16: Superfícies de resposta para o MR das misturas: (a) Solo VS; (b) Solo BR



As superfícies de contorno ilustraram as interações entre os principais parâmetros que influenciam o MR das misturas solo-resíduos estabilizadas por ativação alcalina. Verifica-se que as respostas obtidas variam de forma significativa conforme o tipo de solo, evidenciando a influência das características intrínsecas de cada material na eficácia do processo de ativação.

Para o solo VS, assim como observado no ensaio de RCS, a interação entre Escória de Aciaria e Cinza Volante (Figura 3.16 (a)) resultou em um aumento progressivo da rigidez com o acréscimo do teor de escória e a redução de cinza. Por outro lado, o solo BR apresentou incremento do MR em faixas com altos teores de cinza volante (Figura 3.16 (b)). Esses comportamentos estão em consonância com a expressiva significância estatística do fator Cinza Volante na resposta MR, conforme evidenciado no gráfico de Pareto.

Essa diferença de resposta entre os solos reforça a ideia de que a formação dos principais produtos cimentantes, como os géis do tipo aluminossilicato de sódio hidratado (NASH) e géis do tipo aluminossilicato de cálcio hidratado (CASH), depende diretamente das características físico-químicas do solo e da proporção entre os materiais precursores. Diversos autores também apontam para a existência de um teor ótimo de escória em substituição às cinzas, o qual favorece

a formação de uma estrutura cimentante mais compacta (Chen *et al.*, 2021; Chi; Huang, 2013; Miraki *et al.*, 2022; Taj *et al.*, 2022).

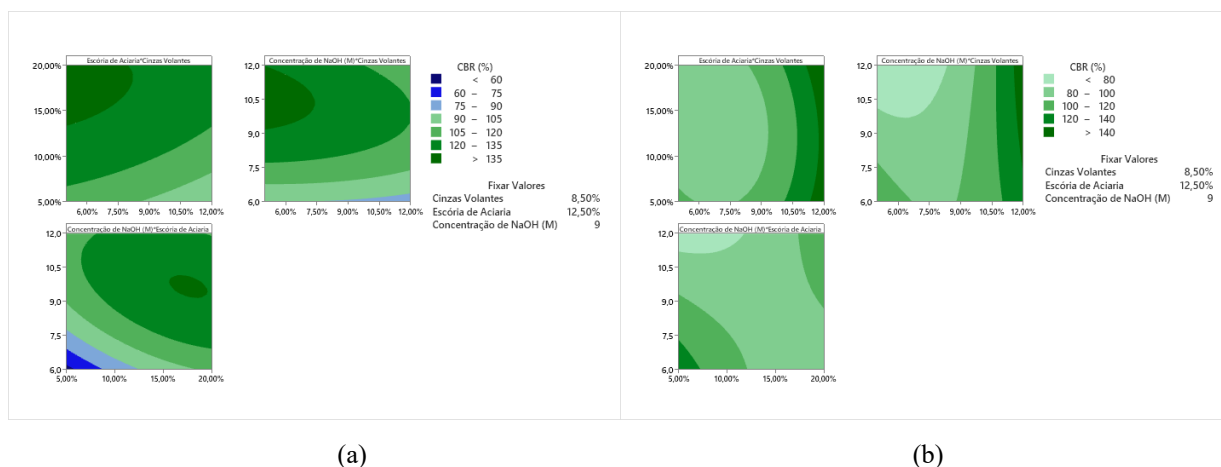
Diferentemente do observado nos ensaios de resistência à compressão simples, verificou-se, para o solo VS, uma influência significativa da concentração de NaOH sobre o módulo de resiliência. As superfícies de resposta evidenciaram uma tendência de aumento do MR com a elevação da concentração do ativador alcalino.

Considerando que o módulo de resiliência é fortemente influenciado pela estrutura interna do solo e que o comportamento resiliente reflete predominantemente a resposta elástica da estrutura do solo (Huang, 2004), infere-se que o incremento na concentração de NaOH promoveu o aumento da alcalinidade do meio (pH), favorecendo a dissolução dos óxidos de alumínio e silício presentes nos materiais precursores, o que intensifica a formação de produtos cimentantes (Abdullah; Shahin; Walske, 2020), gerando uma estrutura mais rígida e, consequentemente, maior MR. De acordo com Sukprasert *et al.* (2019), concentrações elevadas de NaOH são capazes de dissolver partículas sólidas, promovendo a lixiviação de sílica e alumina que reagem com o ativador, viabilizando o processo de geopolimerização.

No que se refere ao solo BR, a interação entre escória de aciaria e concentração de NaOH foi estatisticamente significativa, observando-se uma tendência de maiores valores de rigidez resiliente em misturas com alto teor de escória e reduzidas concentrações de NaOH. Em teores de escória reduzidos, o incremento da rigidez é observado em concentrações mais elevadas de NaOH. Esses resultados foram os mesmos observados para o ensaio RCS e indicam que, para estruturas com alto teor de EAEP, a elevação de concentração de NaOH leva a uma redução de MR devido à redução da solubilidade do cálcio em altas concentrações molares (Bernal *et al.*, 2013).

3.3.10.3 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

As superfícies de respostas encontradas através dos modelos estatísticos para as misturas solo-resíduos para a variável de resposta ISC são apresentadas na Figura 3.17.

Figura 3.17: Superfícies de resposta para a ISC das misturas: (a) Solo VS; (b) Solo BR

As superfícies de contorno ilustraram as interações entre os principais parâmetros que influenciam o ISC das misturas solo-resíduos estabilizadas por ativação alcalina. No caso do solo VS, assim como no ensaio de RCS, observou-se, a partir da interação entre Escória de Aciaria e Cinza Volante, que há um aumento da resistência ao puncionamento com o acréscimo do teor de escória. Essa melhoria pode ser explicada pela formação dos principais produtos de hidratação, como aluminossilicato de cálcio hidratado (CASH) e silicato de cálcio hidratado (CSH). Esses produtos são formados simultaneamente com géis de aluminossilicato de sódio hidratado (NASH) durante o processo de geopolimerização (Abdalqader Jin; Al-Tabbaa, 2016; Wu *et al.*, 2021; Jeremiah *et al.*, 2024).

3.3.11 Determinação da dosagem ótima através da função desejabilidade

Com o objetivo de determinar qual foi a melhor dosagem para cada amostra de solo analisada, utilizou-se o recurso da função desejabilidade, buscando maximizar todas as respostas mecânicas através do software Minitab 18®. A função desejabilidade apontou a dosagem ótima conforme apresentada na Tabela 3.16.

Tabela 3.16: Dosagem ótima obtida a partir da função desejabilidade

Solo	CV	EAEP	Concentração de NaOH (M)
VS	5%	20%	9
BR	12%	5%	12

A partir da Tabela 3.16, verifica-se que os valores ótimos de dosagem variaram conforme o tipo de solo (VS e BR), evidenciando as diferentes interações entre os precursores, o ativador alcalino e as características intrínsecas de cada solo. No caso do solo VS, cuja formulação apresentou melhor desempenho com maiores teores de escória de aciaria (EAEP), verificou-se uma tendência de redução na concentração de NaOH. Esse comportamento está de acordo com o que é relatado na literatura para sistemas ricos em cálcio, nos quais concentrações muito elevadas de NaOH (acima de 10 M) dificultam a dissolução do Ca(OH)_2 devido ao excesso de íons hidroxila (OH^-), comprometendo a formação do gel CSH (Pacheco-Torgal; Castro-Gomes; Jalali, 2008).

Por outro lado, nas formulações do solo BR, caracterizadas por maior teor de cinza volante (CV), verificou-se um aumento na concentração de NaOH. Nesses casos, concentrações molares mais elevadas favorecem a dissolução das partículas de CV, promovendo a liberação de sílica e alumina que reagem com os íons de sódio para formar géis do tipo NASH, responsáveis pelo ganho de resistência (Sukprasert *et al.*, 2019).

A Tabela 3.17 apresenta os valores alcançados para cada propriedade mecânica através do modelo matemático de sua respectiva superfície de resposta, considerando o teor ótimo alcançado pela função desejabilidade. A Tabela 3.18 apresenta os valores de desejabilidade individual e composta obtidos para as misturas ótimas. Os valores de desejabilidade individual foram calculados pela relação entre o valor obtido para cada propriedade analisada através do modelo matemático de sua respectiva superfície de resposta e o valor máximo obtido pelo planejamento experimental. Os valores de desejabilidade composta foram obtidos através de uma média geométrica dos valores das desejabilidades individuais.

Tabela 3.17: Propriedades mecânicas estimadas para as respectivas misturas ótimas

Propriedade Mecânica	SOLO VS	SOLO BR
RCS (kPa)	1676,02	2252,45
MR (MPa)	266,46	518,32
ISC (%)	137,03	152,52

Tabela 3.18: Desejabilidades individuais e compostas para as propriedades mecânicas das misturas ótimas

Propriedade Mecânica	SOLO VS	SOLO BR
RCS	0,99	1,00
MR	0,94	1,00
ISC	0,99	0,80
Desejabilidade Composta	0,98	0,93

Considerando que a função desejabilidade varia no intervalo de $0 \leq d_j \leq 1$, em que 0 representa uma resposta totalmente indesejável e 1 corresponde a uma resposta totalmente desejável ou ideal (Montgomery, 2017), os valores próximos a 1 encontrados indicam que as combinações dos parâmetros analisados tendem a se aproximar das condições ótimas, maximizando as propriedades mecânicas avaliadas.

Com base nos resultados obtidos por meio da função desejabilidade, observa-se que as misturas solo-resíduos estabilizadas por ativação alcalina atenderam às exigências normativas para aplicação em camadas de pavimento, conforme os critérios apresentados na Tabela 3.19.

Tabela 3.19: Valores mínimos das propriedades de engenharia RCS, ISC e MR para as diferentes camadas de pavimento

Camada estrutural	Propriedade	Valor mínimo	Referência normativa
Base	RCS (kPa)	690	T 220-66 (AASHTO, 2018)
	ISC (%)	80	DNIT (2006) – para $N \leq 5 \times 10^6$
	MR (MPa)	82,74 (Solo Argiloso) 165,47 (Solo Arenoso)	AASHTO (2020)
Sub-base	RCS (kPa)	690	T 220-66 (AASHTO, 2018)
	ISC (%)	20	DNIT (2006)
	MR (MPa)	82,74 (Solo Argiloso) 165,47 (Solo Arenoso)	AASHTO (2020)
Reforço do subleito	RCS (kPa)	345	T 220-66 (AASHTO, 2018)
	ISC (%)	2	DNIT (2006)
	MR (MPa)	68,95 (Solo Argiloso e arenoso)	AASHTO (2020)

3.4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos no presente programa experimental de pesquisa, conclui-se que:

- O estudo demonstrou a viabilidade técnica do protocolo proposto de otimização da dosagem de solos ativados alcalinamente fundamentado no planejamento experimental de misturas e na análise de múltiplas propriedades de engenharia para fins de projetos de pavimentação;

- Os modelos polinomiais ajustados por meio do planejamento experimental apresentaram elevados coeficientes de determinação (R^2), indicando que esses se ajustam a um alto percentual de respostas obtidas experimentalmente;
- A eficácia da estabilização do solo ativado por álcalis é influenciada pelo tipo de solo e suas propriedades;
- A aplicação de resíduos industriais na ativação alcalina para a estabilização de solos mostrou-se uma alternativa viável técnica e ambientalmente ao melhorar as propriedades mecânicas avaliadas e propor uma alternativa de aproveitamento desses resíduos em obras de pavimentação, as quais comumente demandam grandes quantitativos de materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELLATIEF, M.; ADEL, B.; ALANAZI, H.; TAWFIK, T. A. Multiscale optimization analysis of high strength alkali-activated concrete containing waste medical glass under exposure to carbonation and elevated temperatures. *Developments in the Built Environment*, v. 19, art. 100492, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100492>.

ABDULLAH, H. H.; SHAHIN, M. A.; WALSKE, M. L. Review of fly ash based geopolymers for soil stabilisation with special reference to clay. *Geosciences*, v. 10, n. 7, art. 249, 2020. <https://doi.org/10.3390/geosciences10070249>.

ABDULWAHED, H. S.; ALJANABI, K. R.; ABDULKAREEM, A. H. Optimization of equivalent modulus of RAP-geopolymer-soil mixtures using response surface methodology. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.06.005>.

ACOSTA, C. J. M. Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de vidro e cal de casca de ovo. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD). https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/URGS_6f54b9a08037c43e4257223601fe55b5.

ADHIKARI, S.; KHATTAK, M. J.; ADHIKARI, B. Mechanical characteristics of soil-RAP-geopolymer mixtures for roadway base and subbase layers. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 21, n. 4, p. 483–496, 2020. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1492131>.

ALBRIGHT, M. The role of the United States in Central Europe. *Proceedings of the Academy of Political Science*, v. 38, n. 1, p. 71–84, 1991. <https://doi.org/10.2307/1173814>.

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

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, DC, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D2487-17: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

AOUAN, B.; ALEHYEN, S.; FADIL, M.; ALOUANI, M.; KHABBAZI, A.; ATBIR, A. F.; TAIBI, M. H. L. Compressive strength optimization of metakaolin-based geopolymers by central composite design. *Chemical Data Collections*, v. 31, art. 100636, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2020.100636>.

APITHANYASAI, S.; NOOOAEK, P.; SUPAKATA, N. The utilization of concrete residue with electric arc furnace slag in the production of geopolymer bricks. *Engineering Journal*, v. 22, n. 1, p. 1–14, 2018. <https://doi.org/10.4186/ej.2018.22.1.1>.

ARAÚJO, M. T. *Comportamento de solo expansivo estabilizado por ligante álcali-ativado oriundo de resíduos: sustentabilidade, propriedades mecânicas e microestruturais*. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. LUME – Repositório Digital da UFRGS. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/254182>.

ARCANJO, D. M. O. Estudo da aplicação de aglomerantes álcali-ativados na estabilização de solos para pavimentações. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018. Repositório Institucional – UFBA. <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/32980>.

ARRIBAS, I.; SANTAMARIA, A.; RUIZ, E.; ORTEGA-LÓPEZ, V. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. *Construction and Building Materials*, v. 90, p. 68–79, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.003>.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004: resíduos sólidos — classificação. Rio de Janeiro, 2004d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12023: solo-cimento — ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: cimento Portland — determinação da finura pelo método da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 18: cimento Portland — análise química — determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 13: cimento Portland — análise química — determinação de óxido de cálcio livre pelo método do etilenoglicol. Rio de Janeiro, 2012d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 15: cimento Portland — análise química — determinação do resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 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. NBR 12653: materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12770: solo coesivo — determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372: cimento Portland e outros materiais em pó — determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: cimento Portland e outros materiais em pó — determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: solo — análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: solo — determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: solo — determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895: solo — índice de suporte Califórnia (CBR) — método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: solo — ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2025.

AYUB, F.; KHAN, S. A. An overview of geopolymers composites for stabilization of soft soils. *Construction and Building Materials*, v. 404, art. 133195, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133195>.

BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; WALKLEY, B.; SAN NICOLAS, R.; GEHMAN, J. D.; BRICE, D. G.; KILCULLEN, A. R.; DUXSON, P.; VAN DEVENTER, J. S. J. Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*, v. 53, p. 127–144, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.06.007>.

BRAND, A. S.; SINGHVI, P.; FANIJO, E. O.; TUTUMLUER, E. Stabilization of a clayey soil with ladle metallurgy furnace slag fines. *Materials*, v. 13, n. 19, art. 4251, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13194251>.

CAICEDO, A. M. L. *Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de cerâmica vermelha e cal de carbureto*. 2020. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. LUME – Repositório Digital da UFRGS. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/218618>.

CANDIOTI, L. V.; ZAN, M. M.; CÁMARA, M. S.; GOICOECHEA, H. C. Experimental design and multiple response optimization: using the desirability function in analytical methods development. *Talanta*, v. 124, p. 123–138, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.01.034>.

CASTRO, J. F. A. *Melhoramento de um solo arenoso por ativação alcalina*. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Porto, 2015. Repositório Aberto da Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/115749>.

CHEN, K.; WU, D.; ZHANG, Z.; PAN, C.; SHEN, X.; XIA, L.; ZUO, J. Modeling and optimization of fly ash–slag-based geopolymer using response surface method and its application in soft soil stabilization. *Construction and Building Materials*, v. 315, art. 125723, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125723>.

CHEN, Y.; XU, Y.; WANG, L.; LI, T. Study on the relationship between matric suction, unconfined compressive strength, and uniaxial tensile strength for compacted expansive soils. *Environmental Earth Sciences*, v. 83, n. 6, art. 165, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11470-z>.

CHI, M.; HUANG, R. Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 291–298, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.003>.

CHO, G.-C.; DODDS, J.; SANTAMARINA, J. C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 132, n. 5, p. 591–602, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:5\(591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591)).

COPPOLA, L.; BUOSO, A.; COFFETTI, D.; KARA, P. Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, v. 123, p. 115–119, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.142>.

COSTA, L. C. B. Desempenho de concretos de escória de aciaria frente a ataque de cloretos. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. Repositório Institucional da UFOP. http://www.propec.ufop.br/uploads/propec_2022/teses/arquivos/2019-dissertacao%20desempenhoconcretosescoria.pdf.

CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; PINTO, A. T. Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*, v. 164, n. 1, p. 73–82, 2011. <https://doi.org/10.1680/grim.900032>.

CRISTELO, N.; SOARES, E.; ROSA, I.; MIRANDA, T.; OLIVEIRA, D. V.; SILVA, R. A.; CHAVES, A. Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 925–933, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.063>.

DAYALAN, J. Comparative study on stabilization of soil with ground granulated blast furnace slag (GGBS) and fly ash. *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 3, p. 2198–2204, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). PRO 003/94: collection of disturbed soil samples. Rio de Janeiro, 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME 093/94: soil — determination of particle density. Rio de Janeiro, 1994b.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT CLA 259/2023: soil — classification of fine tropical soils for highway purposes using specimens compacted in miniature equipment — classification. Brasília, 2023a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT ME 258/2023: soil — compaction in miniature equipment — mini-MCV test and mass loss by immersion — test method. Brasília, 2023b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT ME 256/2023: soil — determination of mass loss by immersion of compacted soils in miniature equipment — test method. Brasília, 2023c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT ME 134/2018: pavement engineering — soil — determination of resilient modulus — test method. Rio de Janeiro, 2018a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT ME 181/2018: pavement engineering — chemically stabilized materials — determination of resilient modulus — test method. Rio de Janeiro, 2018b.

EIDGAHEE, D. R.; RAFIEAN, A. H.; HADDAD, A. A novel formulation for the compressive strength of IBP-based geopolymer stabilized clayey soils using ANN and GMDH-NN approaches. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, v. 44, n. 1, p. 219–229, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00263-1>.

ELNOUR, H.; DEMIRÖZ, A. Optimization of geotechnical characteristics of clayey soils using fly ash and granulated blast furnace slag-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, art. 137488, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137488>.

EUROSLAG. The European Association representing metallurgical slag producers and processors. 2019. <https://www.euroslag.com>.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, J. G.; PUERTAS, F. Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 8, p. 1313–1321, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00154-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00154-4).

FILHO, J. A. P.; FRASSON, S. A.; CONTI, D. M. Economia circular: estudo de casos múltiplos em usinas de reciclagem no manejo de resíduos da construção civil. *Revista Desenvolvimento em Questão*, v. 16, n. 45, p. 136–157, 2019. <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2019.49.136-157>.

GALINDO, J. R. F.; PITANGA, H. N.; PEDROTI, L. G.; SILVA, T. O.; NALON, G. H.; LIMA, G. E. S.; MENDES, B. C. Optimization of mixtures of soil, construction and demolition waste, and steel slag using the simplex extreme vertices method. *Transportation Geotechnics*, v. 47, art. 101361, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101361>.

GOPALAKRISHNAN, R.; CHINNARAJU, K. Durability of ambient cured alumina silicate concrete based on slag/fly ash blends against sulfate environment. *Construction and Building Materials*, v. 204, p. 70–83, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.153>.

GUNARTI, A. S. S.; RAHARJA, I. Mechanical properties improvement of clays using silica sand waste and dust sand foundry waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 856, 012002, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/856/1/012002>.

GUO, X.; SHI, H.; CHEN, L.; DICK, W. A. Alkali-activated complex binders from class C fly ash and Ca-containing admixtures. *Journal of Hazardous Materials*, v. 173, n. 1–3, p. 480–486, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.110>.

HAFEZ, H.; KASSIM, D.; KURDA, R.; SILVA, R. V.; BRITO, J. Assessing the sustainability potential of alkali-activated concrete from electric arc furnace slag using the ECO2 framework. *Construction and Building Materials*, v. 281, art. 122559, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122559>.

HAYDER, M. R.; ZIARI, H.; SHABAN, A. M. Strength and microstructural characteristics of sand soils stabilized with paper sludge ash-based geopolymer. *Scientific Reports*, v. 15, art. 8752, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92813-z>.

HIGGINS, D. Briefing: GGBS and sustainability. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials*, v. 160, n. 3, p. 99–101, 2007. <https://doi.org/10.1680/coma.2007.160.3.99>.

HUANG, Y. H. *Pavement analysis and design*. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 13320: Particle size analysis — Laser diffraction methods*. Geneva, 2020.

ISMAIL, I.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; SAN NICOLAS, R.; HAMDAN, S.; VAN DEVENTER, J. S. J. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, v. 45, p. 125–135, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006>.

JEREMIAH, J. J.; ABBEY, S. J.; BOOTH, C. A.; EYO, E. U. Viability of calcinated wastepaper sludge ash geopolymer in the treatment of road pavement subgrade materials. *Transportation Geotechnics*, v. 44, art. 101165, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101165>.

JIN, A. F.; AL-TABBAA, A. Development of greener alkali-activated cement: utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures. *Journal of Cleaner Production*, v. 113, p. 66–75, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.010>.

KHALIL, E.; ABOUZEID, M. A global assessment tool for cement plants improvement measures for the reduction of CO₂ emissions. *Results in Engineering*, v. 26, art. 104767, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104767>.

KITAZUME, M.; TERASHI, M. *The deep mixing method*. London: CRC Press, 2013. <https://doi.org/10.1201/b13873>.

KODAH, R. A.; RABAB'AH, S. R.; ALDEEIKEY, H. H.; LAGAROS, N. D.; ABDALLA, K. M. Geopolymer stabilization of expansive soils using zeolitic tuff: a sustainable alternative to cement-based stabilization. *Results in Engineering*, v. 26, art. 105386, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105386>.

LAFIFI, B.; ROUAIGUIA, A.; BOUMAZZA, N. Optimization of geotechnical parameters using Taguchi's design of experiment (DOE), RSM and desirability function. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 4, art. 218, 2019. <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0218-z>.

LEMOUGNA, P. N.; WANG, K.-T.; TANG, Q.; NZEUKOU, A.; BILLONG, N.; MELO, U. C.; CUI, X.-M. Review on the use of volcanic ashes for engineering applications. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 137, p. 177–190, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.031>.

LEONG, H. Y.; ONG, D. E. L.; SANJAYAN, J. G.; NAZARI, A. Strength development of soil–fly ash geopolymer: assessment of soil, fly ash, alkali activators, and water. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 8, art. 04018188, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002363](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002363).

LI, C.-C.; LIN, C.-M.; CHANG, Y.-E.; CHANG, W.-T. Stabilization and crystal characterization of electric arc furnace oxidizing slag modified with ladle furnace slag and alumina. *Metals*, v. 10, n. 4, art. 501, 2020. <https://doi.org/10.3390/met10040501>.

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

MAHEEPALA, M. M. A. L. N.; NASVI, M. C. M.; ROBERT, D. J.; GUNASEKARA, C.; KURUKULASURIYA, L. C. Mix design development for geopolymer treated expansive subgrades using artificial neural network. *Computers and Geotechnics*, v. 161, art. 105534, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105534>.

MANDAL, S.; SINGH, J. P. Stabilization of soil using ground granulated blast furnace slag and fly ash. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, v. 5, n. 12, p. 21121–21126, 2016. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2016.0512038>.

MARVILA, M. T.; AZEVEDO, A. R. G.; VIEIRA, C. M. F. Reaction mechanisms of alkali-activated materials. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 3, p. 1–26, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000300009>.

MARZULLI, V.; SANDEEP, C. S.; SENETAKIS, K.; CAFARO, F. Scale and water effects on the friction angles of two granular soils with different roughness. *Powder Technology*, v. 377, p. 813–826, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.09.060>.

MATSIMBE, J.; DINKA, M.; OLUKANNI, D.; MUSONDA, I. Performance evaluation and mix design of ambient cured fly ash phosphogypsum blended geopolymer paste and mortar. *Results in Engineering*, v. 24, art. 103280, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103280>.

MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G.; VIEIRA, C. M. F.; CARVALHO, J. M. F.; RIBEIRO, J. C. L.; SOUZA, C. M. M. Application of mixture design of experiments to the development of alkali-activated composites based on chamotte and waste glass. *Construction and Building Materials*, v. 379, art. 131139, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131139>.

MIRAKI, H.; SHARIATMADARI, N.; GHADIR, P.; JAHANDARI, S.; TAO, Z.; SIDDIQUE, R. Clayey soil stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 14, n. 2, p. 576–591, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.08.012>.

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 10. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.

MOZUMDER, R.; LASKAR, A. Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer-stabilized clayey soil using artificial neural network. *Computers and Geotechnics*, v. 69, p. 291–300, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.05.021>.

NAIDU, T. S.; SHERIDAN, C. M.; VAN DYK, L. D. Basic oxygen furnace slag: review of current and potential uses. *Minerals Engineering*, v. 149, art. 106234, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106234>.

NIRAULA, U.; DAHAL, B. K.; ACHARYA, S.; PHUYAL, P. High-plasticity silt stabilization: role of waste stone dust, cement, and curing time. *Results in Engineering*, v. 26, art. 104877, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104877>.

OORMILA, T. R.; PREETHI, T. V. Effect of stabilization using flyash and GGBS in soil characteristics. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, v. 11, n. 2, p. 284–289, 2014. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V11P254>.

OZER, I.; SOYER-UZUN, S. Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin-based geopolymers with different molar Si/Al ratios. *Ceramics International*, v. 41, n. 8, p. 10192–10198, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.125>.

OZTURK, M.; BANKIR, M. B.; BOLUKBASI, O. S.; SEVIM, U. K. Alkali activation of electric arc furnace slag: mechanical properties and micro analyzes. *Journal of Building Engineering*, v. 21, p. 97–105, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.10.005>.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: a review. Part 2: about materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 7, p. 1315–1322, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.019>.

PALOD, R.; DEO, S. V.; RAMTEKKAR, G. D. 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, n. 4, p. 1026–1035, 2017. <http://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=8&Issue=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*, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 21–32, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212019000200305>.

PHETCHUAY, C.; HORPIBULSUK, S.; ARULRAJAH, A.; SUKSIRIPATTANAPONG, C.; UDOMCHAI, A. Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue-based geopolymer. *Applied Clay Science*, v. 127–128, p. 134–142, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.005>.

PHUMMIPHAN, I.; HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; ARULRAJAH, A.; SHEN, S.-L.; CHINDAPRASIRT, P. High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material. *Journal of Hazardous Materials*, v. 341, p. 257–267, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.067>.

PINTO, A. T. Introdução ao estudo dos geopolímeros. Vila Real: Geo-Pol Geopolymer System, 2006. 88 p.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? *Materials and Structures*, v. 47, p. 11–25, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0211-5>.

QIU, J.; ZHAO, Y.; XING, J.; SUN, X. Fly ash/blast furnace slag-based geopolymer as a potential binder for mine backfilling: effect of binder type and activator concentration. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2019, art. 2028109, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/2028109>.

REDDY, S. R.; IYER, K. R. K.; DAVE, T. N. Alkali-activated soil stabilization as a sustainable pathway for the development of resilient geotechnical infrastructure. *Indian Geotechnical Journal*, v. 54, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40098-024-00893-x>.

RIOS, S.; CRISTELO, N.; VIANA DA FONSECA, A.; FERREIRA, C. Structural performance of alkali-activated soil–ash versus soil–cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 2, art. 04015077, 2016. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001398](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001398).

RIVERA, F.; OROBIO, A.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; CRISTELO, N. Clayey soil stabilization using alkali-activated cementitious materials. *Materiales de Construcción*, v. 70, n. 337, art. e211, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2020.07519>.

ROCHA, G. S. *Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. <https://locus.ufv.br/items/2d846953-9819-4789-b393-2deedf6f491c>.

RODRIGUES, K. H. P. *Utilização de resíduos industriais na estabilização de solos tropicais para aplicação em pavimentação*. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022. <https://locus.ufv.br/items/bf0a6b97-1275-4ef4-bd08-731f0c9e7f45>.

SANDEEP, C. S.; HE, H.; SENETAKIS, K. An experimental micromechanical study of sand grain contacts behavior from different geological environments. *Engineering Geology*, v. 246, p. 176–186, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.030>.

SEBBAR, N.; LAHMILI, A.; BAHI, L.; OUADIF, L. Treatment of clay soils with steel slag in road engineering. *E3S Web of Conferences*, v. 150, art. 02017, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015002017>.

SEVERO, C. G. S.; COSTA, D. L.; BEZERRA, I. M. T.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 8, n. 2, p. 55–67, 2013.

SHARIATMADARI, N. *et al.* Compressive strength of sandy soils stabilized with alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 11, art. 04021295, 2021. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003845](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003845).

SHEN, Q. *et al.* Study on mechanism of mechanical property enhancement of expansive soil by alkali-activated slag. *Materials*, v. 18, n. 4, art. 800, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18040800>.

SHI, X. *et al.* Response surface methodology for multi-objective optimization of fly ash–GGBS-based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, v. 315, art. 125644, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125644>.

SILVA, M. C. A. *Melhoramento de um solo argiloso com recurso à ativação alcalina de resíduos para aplicação em infraestruturas de transporte*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga, 2016. <https://repositorium.uminho.pt/bitstreams/flc194e9-3378-40f4-9418-ec88043aca10/download>.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Relatório anual 2023–2024. Brasília, 2025. <https://www.snic.org.br>.

SOARES, E. M. M. *Melhoria do solo residual granítico com recurso à ativação alcalina*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2013. https://repositorio.utad.pt/bitstream/10348/4619/1/msc_emmsouares.pdf.

SUKPRASERT, S. *et al.* Fly ash-based geopolymer stabilisation of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications. *Road Materials and Pavement Design*, v. 22, n. 6, p. 1–15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1621190>.

TAJ, T. H. *et al.* Alkali-activated fly ash and slag combination for soil cement mixing piles. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION AND DEVELOPMENT, 2022, Reston. Proceedings... Reston: ASCE, 2022. p. 133–142. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784484357.012>.

TERASHI, M.; KITAZUME, M. QA/QC for deep-mixed ground: current practice and future research needs. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement, v. 164, n. 3, p. 161–177, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1680/grim.2011.164.3.161>.

TRAVERN, K.; ČEŠNOVAR, M.; DUCMAN, V. Particle size manipulation as an influential parameter in the development of mechanical properties in electric arc furnace slag-based AAM. Ceramics International, v. 45, n. 17, p. 22632–22641, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.296>.

WANG, H. *et al.* Performance evaluation of geopolymer grout materials derived from high volume circulating fluidized bed fly ash and ground granulated blast furnace slag. Construction and Building Materials, v. 474, art. 141082, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141082>.

WANG, S. D.; SCRIVENER, K. L.; PRATT, P. L. Factors affecting the strength of alkali-activated slag. Cement and Concrete Research, v. 24, n. 6, p. 1033–1043, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90026-4).

WANG, Y. *et al.* Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash-based geopolymer. Journal of Cleaner Production, v. 244, art. 118852, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118852>.

WU, J. *et al.* Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways. Soils and Foundations, v. 59, n. 4, p. 955–965, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.03.009>.

WU, J.; MIN, Y.; LI, B.; ZHENG, X. Stiffness and strength development of the soft clay stabilized by the one-part geopolymer under one-dimensional compressive loading. Soils and Foundations, v. 61, n. 3, p. 974–988, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.06.001>

YI, Y.; ZHENG, X.; LIU, S.; AL-TABBAA, A. Comparison of reactive magnesia- and carbide slag-activated ground granulated blast furnace slag and Portland cement for stabilisation of a natural soil. *Applied Clay Science*, v. 111, p. 21–26, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.023>.

YILMAZ, F.; KUVAT, A.; KAMILOĞLU, H. A. Optimizing and investigating durability performance of sandy soils stabilized with alkali-activated waste tuff fly ash mixtures. *Sādhanā*, v. 48, art. 185, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02250-9>.

ZHANG, Y. *et al.* Effects of activator types on degradation mechanisms of metakaolin geopolymer mortars exposed to high temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, n. 12, art. 04020369, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003457](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003457).

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE SOLOS TROPICAIS ESTABILIZADOS POR ATIVAÇÃO ALCALINA PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS

RESUMO

Em obras de pavimentação rodoviária, é frequente que os solos locais não atendam aos requisitos mecânicos mínimos para aplicação em camadas estruturais, exigindo técnicas de melhoramento capazes de elevar a capacidade de suporte e reduzir deformabilidades. Nesse contexto, a estabilização por ativação alcalina desponta como alternativa promissora ao uso de cimento, sobretudo quando associada ao aproveitamento de resíduos industriais, como cinza volante (CV) e escória de aciaria elétrica primária (EAEP). Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento mecânico de misturas de dois solos tropicais residuais, um predominantemente arenoso (VS) e outro argiloso (BR), estabilizados com CV e EAEP, com e sem ativação alcalina por NaOH, visando a aplicação em pavimentação. Corpos de prova foram moldados na umidade ótima e compactados na energia Proctor Intermediária, sendo avaliados aos 0, 7 e 28 dias por meio dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão, Módulo de Resiliência (MR) e resistência ao cisalhamento direto (τ). Complementarmente, foram realizados ensaios de MEV/EDS, DRX e FTIR para interpretação dos mecanismos microestruturais e mineralógicos associados ao ganho de desempenho. Os resultados mostraram que a ativação alcalina promoveu incrementos expressivos de ISC, alcançando valores da ordem de 276%, além de reduzir significativamente a expansão, atingindo valores da ordem de 0,05%. Em relação ao MR, observou-se aumento substancial após a ativação, atingindo aproximadamente 1063 MPa (solo VS) e 583 MPa (solo BR), aos 28 dias, superando os valores mínimos recomendados para materiais de pavimentação. Os ganhos foram mais pronunciados no solo arenoso, com incremento relativo superior ao observado no solo argiloso, evidenciando a influência da granulometria e da estrutura inicial. Nos ensaios de cisalhamento direto, as misturas ativadas apresentaram picos de resistência bem definidos e aumento significativo de coesão e ângulo de atrito, com comportamento mais rígido e ruptura de caráter mais frágil, compatível com a presença de ligações cimentantes. As análises microestruturais e mineralógicas confirmaram maior densificação da matriz nas misturas ativadas, associada à formação de géis NASH e CASH, além de fases secundárias (incluindo estruturas zeolíticas), com evidências por FTIR do deslocamento da banda Si-O-T para menores números de onda, indicando maior grau de polimerização. Conclui-se que a estabilização por ativação alcalina

com CV e EAEP é tecnicamente viável para a melhoria do desempenho de solos tropicais, sendo sua eficácia condicionada pelo tipo de solo, potencializando o uso sustentável de resíduos industriais em camadas de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave: ativação alcalina; estabilização de solos; cinza volante; escória de aciaria elétrica; módulo de resiliência; índice de suporte Califórnia; resistência ao cisalhamento; pavimentação.

ABSTRACT

In highway pavement construction, local soils often fail to meet the minimum mechanical requirements for use in structural layers, requiring improvement techniques capable of increasing bearing capacity and reducing deformability. In this context, alkali activation has emerged as a promising alternative to cement stabilization, especially when associated with the use of industrial by-products such as fly ash (FA) and electric arc furnace slag (EAFS). This study aimed to analyze the mechanical behavior of mixtures composed of two residual tropical soils, one predominantly sandy (VS) and the other clayey (BR), stabilized with FA and EAFS, with and without alkali activation using NaOH, targeting pavement applications. Specimens were prepared at optimum moisture content and compacted at Intermediate Proctor energy, and evaluated at curing ages of 0, 7, and 28 days through California Bearing Ratio (CBR) and swelling tests, Resilient Modulus (RM), and direct shear strength (τ). Additionally, SEM/EDS, XRD, and FTIR analyses were performed to interpret the microstructural and mineralogical mechanisms associated with performance enhancement. The results showed that alkali activation promoted significant increases in CBR, reaching values on the order of 276%, in addition to a substantial reduction in swelling, attaining values around 0.05%. Regarding RM, a marked increase was observed after activation, reaching approximately 1063 MPa for soil VS and 583 MPa for soil BR at 28 days, exceeding the minimum values recommended for pavement materials. The gains were more pronounced in the sandy soil, with a higher relative increase than that observed in the clayey soil, highlighting the influence of particle size distribution and initial soil structure. In the direct shear tests, the activated mixtures exhibited well-defined peak strength and significant increases in cohesion and friction angle, with stiffer behavior and more brittle failure, consistent with the presence of cementitious bonding. Microstructural and mineralogical analyses confirmed greater matrix densification in the activated mixtures, associated with the formation of NASH and CASH gels, as well as secondary phases (including zeolitic structures). FTIR results evidenced a shift of the Si–O–T band toward lower wavenumbers, indicating a higher degree of polymerization. It is concluded that alkali activation using FA and EAFS is technically feasible for improving the performance of tropical soils, with its effectiveness being conditioned by soil type, while also enhancing the sustainable use of industrial residues in highway pavement layers.

Keywords: alkali activation; soil stabilization; fly ash; electric arc furnace slag; resilient modulus; California bearing ratio; shear strength; pavement engineering.

4.1 INTRODUÇÃO

Na construção de infraestruturas de transporte, é comum que o solo existente não atenda aos requisitos necessários para garantir um desempenho estrutural adequado (Silva, 2016). Diante disso, o dimensionamento de estruturas, como os pavimentos rodoviários, deve considerar as limitações do solo local. Quando essas limitações comprometem o desempenho esperado, torna-se necessária a substituição do material existente ou a melhoria de suas propriedades, de forma que o solo possa suportar adequadamente as solicitações previstas em projeto (Silva, 2016; Bastos, 2024).

O desenvolvimento acelerado da sociedade e a crescente demanda por investimentos em infraestrutura rodoviária, associados às restrições geotécnicas dos solos disponíveis, influenciam diretamente o projeto de pavimentação (Cabral, 2021). Nesse contexto, projetistas têm buscado soluções técnicas e economicamente viáveis capazes de atender às exigências estruturais impostas aos pavimentos. Uma dessas soluções é o uso de materiais estabilizados com aglutinantes hidráulicos nas camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, o que pode melhorar significativamente a resistência, rigidez e durabilidade das estruturas (Liebenberg; Visser, 2003; Paul et al., 2015; Bastos, 2024).

Nesse cenário, ganha destaque o estudo da estabilização de solos por ativação alcalina, que, em comparação com a técnica tradicional de estabilização com cimento, tem produzido materiais (solos álcali-ativados) com propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas superiores, como baixa condutividade térmica, alta resistência à compressão e baixa permeabilidade (Severo *et al.*, 2013; Ozer; Soyer-Uzun, 2015; Qiu *et al.*, 2019).

Diversos estudos demonstraram a eficácia da ativação alcalina como técnica de estabilização de solos (Mozumder; Laskar, 2015; Leong *et al.*, 2018; Eidgahee; Rafiean; Haddad, 2020; Shariatmadari *et al.*, 2021; Adhikari; Khattak; Adhikari, 2021; Abdulwahed; Aljanabi; Abdulkareem, 2022; Maheepala *et al.*, 2023; Kodah *et al.*, 2025). Com base em análises microestruturais, essas investigações confirmaram que ocorre a formação de um gel polimerizado de aluminossilicato nos vazios do solo, promovendo o desenvolvimento de uma microestrutura mais densa e, conseqüentemente, maiores resistência e rigidez mecânicas.

Numerosos estudos demonstraram que fatores, como o tipo e a concentração do ativador alcalino, a matéria-prima usada como fonte de aluminossilicatos, as características do solo estabilizado e as condições de cura, podem afetar significativamente o desenvolvimento da resistência e rigidez do solo estabilizado (Castro, 2015; Wang *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2021). Abdeldjoud *et al.* (2019) avaliaram o efeito do teor de argila na estabilização de solos por

ativação alcalina, concluindo que a aplicação da ativação alcalina como técnica de melhoramento e estabilização do solo se mostrou dependente da percentagem e da mineralogia da fração argilosa. Odeh e RKaby (2022) observaram que, à medida que o teor de argila aumenta, uma quantidade maior de ativador é necessária para aumentar a resistência do solo estabilizado.

Wilkinson *et al.* (2010) mostraram que a presença de matéria orgânica nos solos interfere na nucleação e no crescimento das fases cimentícias, causando um ganho lento nas propriedades de resistência. Wu *et al.* (2024) constataram que a interação entre o estabilizador geopolimérico e a interface montmorilonita - ílita ocorre por meio de interações eletrostáticas e ligações de hidrogênio, as quais influenciam significativamente as propriedades mecânicas e a composição interna do solo. Portanto, fatores, como minerais do solo, teor de argila e capacidade de troca catiônica do solo, afetam significativamente o desenvolvimento da resposta mecânica do solo estabilizado (Odeh; RKaby, 2022; Wu *et al.*, 2024).

Pesquisas anteriores têm se concentrado predominantemente na estabilização de um único tipo de solo (Laskar, 2015; Leong *et al.*, 2018; Eidgahee; Rafiean; Haddad, 2020; Mozumder; Shariatmadari *et al.*, 2021; Adhikari; Khattak; Adhikari, 2021; Abdulwahed; Aljanabi; Abdulkareem, 2022; Maheepala *et al.*, 2023; Kodah *et al.*, 2025), com pouca investigação sobre a eficácia e os mecanismos subjacentes à estabilização em diversos tipos de solo. Isso levou a discrepâncias significativas na aplicação de certas conclusões de pesquisa a diferentes tipos de solo, limitando, assim, sua aplicabilidade geral. Além disso, a ausência de estudos comparativos entre vários tipos de solo dificulta a realização de análises abrangentes, impedindo, portanto, a obtenção de conclusões mais robustas.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento mecânico de misturas de dois solos tropicais geotecnicamente distintos (um arenoso e um argiloso) estabilizados por ativação alcalina, empregadas na pavimentação, por meio de ensaios de Módulo de Resiliência (MR), Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Resistência ao Cisalhamento (τ). As análises foram realizadas em dois solos estabilizados com ativação alcalina por meio de solução de NaOH, utilizando cinza volante (CV) e escória de aciaria elétrica primária (EAEP) como precursores, considerando-se três tempos de cura (0, 7 e 28 dias). Como objetivos secundários, pretendeu-se investigar o desenvolvimento dos produtos geopoliméricos e sua interveniência na microestrutura/morfologia dos solos estabilizados pela ativação alcalina, além de diferenciar os produtos cimentícios resultantes da ativação alcalina

(mistura solo-CV-EAEP-NaOH) daqueles resultantes exclusivamente da hidratação da mistura solo-CV-EAEP.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Materiais

O programa experimental de pesquisa contemplou o emprego de amostras de dois solos tropicais residuais (objetos da ativação alcalina), cinza volante (precursor), escória de aciaria elétrica primária (precursor) e hidróxido de sódio (ativador). Todos os materiais foram devidamente acondicionados em tonéis plásticos (bombonas) adequadamente vedados, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. Previamente aos ensaios, com exceção para o componente ativador, os materiais foram reduzidos segundo a norma PRO 199 (DNER, 1996) e preparados para os diferentes ensaios segundo a norma NBR 6457 (ABNT, 2016a).

4.2.1.1 Solos

No programa experimental desta pesquisa, foram utilizados dois solos granulometricamente distintos: o primeiro, predominantemente argiloso, denominado Solo BR, é um solo residual maduro de grande extensão territorial no relevo do município de Viçosa-MG, cuja amostra foi coletada no horizonte B de um talude de corte localizado à margem da Rodovia BR 120, nas proximidades do trevo de acesso ao campus Viçosa da Universidade Federal de Viçosa (UFV); o segundo, predominantemente arenoso, denominado Solo VS, é um solo residual jovem, cuja amostra foi coletada em um talude de corte localizado na Vila Secundino, no campus Viçosa da UFV. As amostras de solos foram coletadas em estado deformado, nas respectivas jazidas de empréstimo, conforme o procedimento PRO 003 (DNER, 1994).

4.2.1.2 Escória de aciaria elétrica primária

A amostra de escória de aciaria elétrica primária (EAEP) foi coletada em seu estado bruto no pátio de uma unidade siderúrgica situada no estado de Minas Gerais, Brasil, em conformidade com a NBR 10007 (ABNT, 2004). A coleta desse resíduo siderúrgico em seu estado bruto se deu sobre material estocado por, no mínimo, 6 meses e já submetido ao processo de beneficiamento para a retirada da fração metálica. Para que fosse utilizada como precursora da ativação alcalina dos solos, a amostra de escória de aciaria elétrica primária bruta foi submetida ao processo de moagem em aparelho de abrasão *Los Angeles*, seguido de

peneiramento para a retirada de partículas maiores que 0,6mm (peneira #30), procedimento que visou diminuir a granulometria e aumentar a superfície específica do resíduo com vistas ao aumento da eficácia de sua ação precursora.

4.2.1.3 Cinza volante

A amostra de cinza volante empregada na pesquisa foi fornecida por uma empresa que atua no beneficiamento e comercialização de cinzas pozolânicas, material proveniente da queima do carvão mineral, situada no estado de Santa Catarina, Brasil. Conforme informações do fabricante, o material é classificado como cinza volante Classe C e atende aos requisitos de materiais pozolânicos prescritos na norma técnica NBR 12653 (ABNT, 2014).

4.2.1.4 Hidróxido de Sódio

Foi utilizado Hidróxido de Sódio (NaOH) comercial em flocos, com teor de pureza de 98%, para a produção da solução alcalina ativadora.

4.2.2 Métodos

4.2.2.1 Ensaios de desempenho

Para ambos os solos, foram moldados corpos de prova na umidade ótima de compactação da energia Proctor Intermediária, visando à determinação das seguintes propriedades de engenharia (aqui designadas propriedades de desempenho):

- i Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão, determinados conforme a norma técnica NBR 9895 (ABNT, 2016b);
- ii Módulo de Resiliência (MR), determinada segundo a norma 134/2018 - ME (DNIT, 2018);
- iii Resistência ao Cisalhamento Direto (τ), determinada segundo a norma D3080-11 (ASTM, 2014).

Para a quantificação destas propriedades, foram considerados os tempos de cura de 0, 7 e 28 dias. Os valores finais de ISC e Expansão corresponderam à média de três repetições, com coeficiente de variação máximo admissível de 10%. O valor final de MR correspondeu à média aritmética dos valores individuais de MR obtidos para cada um dos 18 estados de tensões previstos na norma de ensaio. Para o ensaio de cisalhamento direto, a envoltória de resistência

ao cisalhamento foi definida mediante ajuste linear dos três pontos experimentais τ_{pico} versus σ , para as tensões normais (σ) de 50, 100 e 200 kPa.

Essas propriedades determinadas para os solos puros compactados foram comparadas com as determinadas para as respectivas misturas ótimas solo-CV-EAEP-NaOH, conforme definidas no capítulo 03 dessa tese.

4.2.2.2 Especificidades do ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto segundo a norma D3080-11 (ASTM, 2014)

Tendo em vista que os materiais constituintes das camadas de pavimentação operam em profundidades rasas, submetidos a baixas tensões sobrejacentes, e que o carregamento dinâmico do tráfego induz tensões normais e de cisalhamento transitórias e periódicas, bem como a rotação das tensões principais (Blackmore *et al.*, 2020; Chu *et al.*, 2023), estabeleceu-se, para o ensaio de cisalhamento direto, um conjunto de tensões normais verticais representativas das condições de serviço típicas de pavimentos rodoviários.

Chu *et al.* (2023) sugeriram a adoção de tensões normais típicas de 25, 35, 65, 115 e 215 kPa para subleitos, enquanto, na maioria das estruturas de pavimento, espera-se que esses valores sejam inferiores a 35 kPa (Miller *et al.*, 2000). O aparelho de cisalhamento direto, no entanto, é geralmente considerado inadequado para ensaios sob baixas tensões normais, pois os efeitos de atrito das engrenagens do equipamento tornam-se significativos nessas tensões e levam a erros nas cargas de cisalhamento inferidas no plano de cisalhamento (Lehane; Liu, 2013). Com base nessas referências e visando abranger uma ampla faixa de estados de tensão, as tensões normais adotadas neste estudo foram de 50, 100 e 200 kPa, representativas de níveis baixos, intermediários e elevados de solicitação vertical.

4.2.2.3 Diferenciação entre os efeitos de hidratação e de ativação alcalina

Visando diferenciar os efeitos decorrentes do processo de hidratação dos compostos cimentícios presentes nas misturas não álcali-ativadas (misturas solo-CV-EAEP) dos efeitos decorrentes da ativação alcalina (misturas solo-CV-EAEP-NaOH), foram moldados corpos de prova das misturas ótimas de solo-CV-EAEP, portanto sem solução ativadora (solução de NaOH), compactados na umidade ótima da energia do Proctor Intermediário e submetidos aos ensaios de ISC, MR e τ , após 0, 7 e 28 dias de cura.

4.2.2.4 Ensaios de caracterização química, mineralógica e microestrutural

Para subsidiar as análises comparativas, amostras representativas dos corpos de prova das misturas solo-CV-EAEP e solo-CV-EAEP-NaOH foram submetidas aos ensaios de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por energia dispersiva (EDS) e difração de raios-X (DRX).

A avaliação das ligações químicas nas matrizes geopoliméricas foi realizada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), através do equipamento Varian 660-IR, equipado com acessório GladiATR – refletância total atenuada, ATR. O intervalo espectral analisado foi de 400 a 4000 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 64 varreduras por espectro. As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS) foram realizadas utilizando um equipamento JEOL – JSM-6010LA, com tensão de aceleração de 15 kV e distância de trabalho de 10 mm. As análises de DRX foram realizadas com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), faixa de varredura em 2θ de 3° a 70° , passo angular de $0,05^\circ$ (2θ) e tempo de contagem de 1,0 s por passo.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.3.1 Ensaios de ISC

Além dos solos puros (condição de referência), o ensaio de Índice de Suporte Califórnia foi conduzido tanto nas misturas ótimas não álcali-ativadas (solo-CV-EAEP) quanto nas misturas ótimas com ativação alcalina (solo-CV-EAEP-NaOH), sendo os resultados obtidos para o ISC e para a Expansão apresentados nas Figura 4.1 e 4.2.

Figura 4.1: Índice de Suporte Califórnia das amostras analisadas.

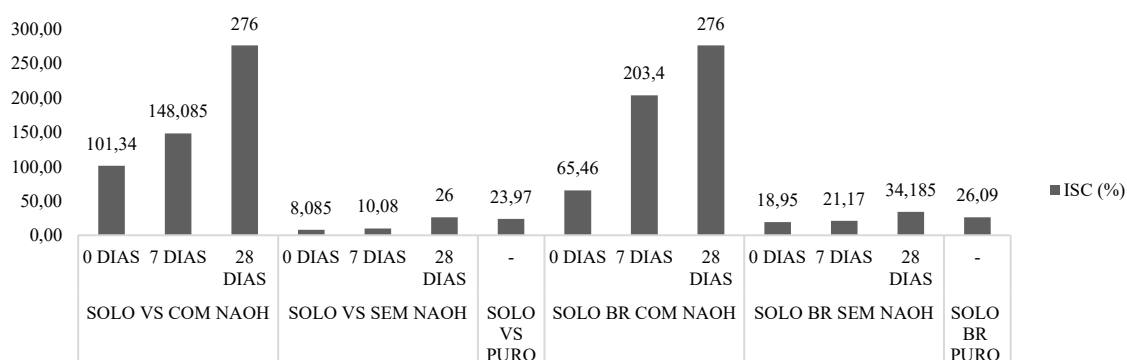
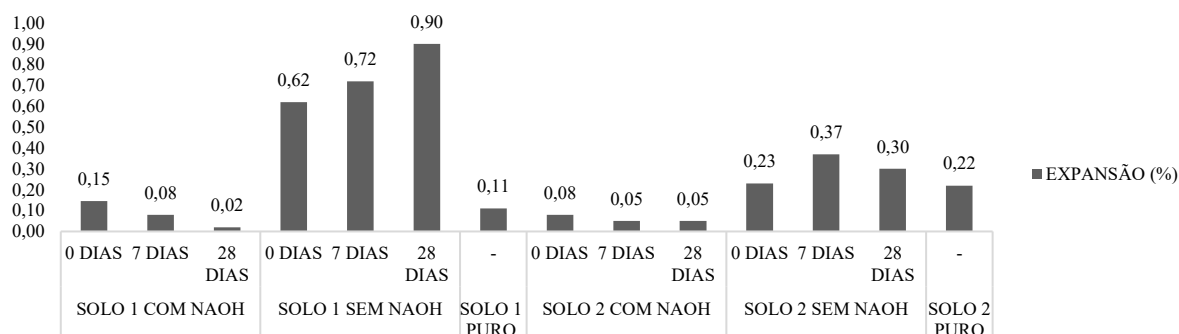


Figura 4.2: Expansão ISC das amostras analisadas.



Observa-se que os valores de ISC do solo aumentam de forma significativa após a ativação alcalina. Para as amostras não ativadas, os valores de ISC aos 28 dias de cura foram de 34,185% e 26% para os solos BR e VS, respectivamente. Em contraste, com a ativação alcalina, o ISC atingiu, para ambas as misturas ótimas, valores da ordem de 276%, superando o valor mínimo de 80% recomendado pelo DNIT (2006) para aplicação em camadas de base de pavimentos asfálticos.

Quanto a análise da Expansão, percebe-se uma tendência de sua redução com a utilização da ativação alcalina. Para as amostras não ativadas, os valores de Expansão aos 28 dias de cura foram de 0,90% e 0,30% para os solos BR e VS, respectivamente. Em contraste, com a ativação alcalina, a Expansão atingiu valores da ordem de 0,02% e 0,05%, respectivamente para as misturas ótimas dos solos BR e VS, inferiores ao valor máximo de 0,5% recomendado pelo DNIT (2006) para aplicação em camadas de base de pavimentos asfálticos.

Em ambos os solos, os materiais álcali ativados tiveram, portanto, menor expansão. Isso se deve à precipitação de compostos cimentícios [géis de aluminossilicato de cálcio hidratado (CASH) e aluminossilicato de sódio hidratado (NASH)] formados após a hidratação e como resultado da álcali-ativação (Maheepala *et al.*, 2021). A expansão dos solos está associada principalmente à presença de minerais argilosos, organizados em estruturas lamelares empilhadas de forma ordenada (Yariv; Cross, 1979).

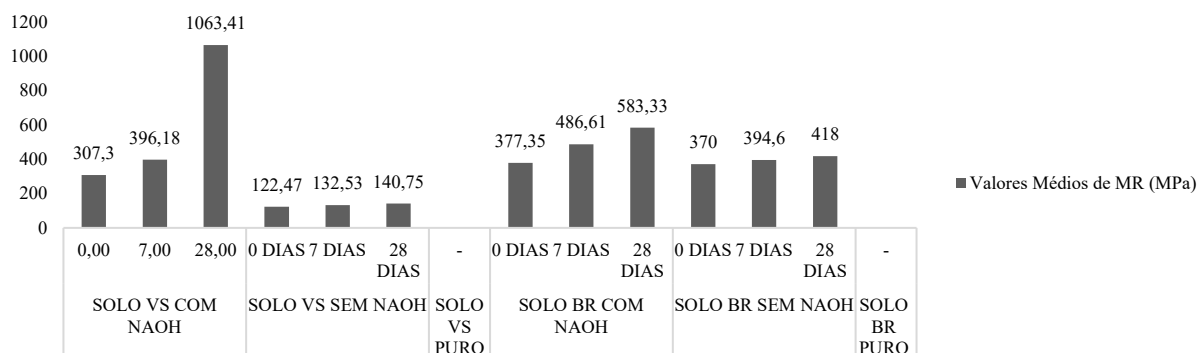
Estudos anteriores evidenciam transformações morfológicas significativas nos minerais de solos, com a transição de uma estrutura lamelar para uma morfologia mais irregular, em razão da corrosão das partículas argilosas e de sua participação nas reações de geopolimerização (Davidovits, 2015; Miao *et al.*, 2017; Onyelowe *et al.*, 2019). Nesse contexto, infere-se que a ruptura das camadas de argila originalmente empilhadas altera a composição mineralógica do solo e, consequentemente, reduz seu potencial de expansão (Maheepala *et al.*, 2021).

Observa-se, ainda, que, para as misturas sem NaOH, os valores de expansão no ensaio de ISC aumentaram ao longo do período de cura. Esse comportamento pode estar associado à formação de hidróxido de cálcio, uma vez que a expansão volumétrica do óxido de cálcio pode atingir cerca de 90% (Lam; Le; Jaritngam, 2018; Wang *et al.*, 2019; Brand *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020). Alguns autores também relatam a ocorrência de expansão volumétrica decorrente da formação de carbonato de cálcio, da ordem de, aproximadamente, 11,7% (Morandea; Thiéry; Dangla, 2014; Cui *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2020). Segundo Xu *et al.* (2020), durante o processo de carbonatação do hidróxido de cálcio, o potencial expansivo de solos argilosos pode ser parcialmente recuperado, o que é coerente com os resultados observados neste estudo, uma vez que as misturas contendo o Solo BR apresentaram aumento da expansibilidade ao longo do tempo de cura.

4.3.2 Ensaios de MR

Além dos solos puros (condição de referência), o ensaio de MR foi conduzido tanto nas misturas não álcali-ativadas (solo–CV–EAEP) quanto nas misturas com ativação alcalina (solo–CV–EAEP–NaOH), sendo os resultados obtidos apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.3: Módulo de Resiliência médio das amostras analisadas.



Observa-se que os valores de Módulo de Resiliência (MR) dos solos aumentaram de forma significativa após a ativação alcalina. Para as amostras não ativadas, os valores de MR aos 28 dias de cura foram de 140,75 MPa e 418,00 MPa para os solos VS e BR, respectivamente. Em contrapartida, após a ativação alcalina, o MR atingiu valores da ordem de 1063,41 MPa para o solo VS e 583,33 MPa para o solo BR, superando os valores mínimos recomendados pela

AASHTO (2020), de 82,74 MPa para solos argilosos e 165,47 MPa para solos arenosos, para aplicação em camadas de base de pavimentos asfálticos.

O expressivo aumento dos valores de MR pode ser atribuído à formação dos principais produtos de reação da ativação alcalina, como o CASH e o CSH (silicato de cálcio hidratado). Esses compostos são formados simultaneamente aos géis de NASH durante o processo de geopolimerização, contribuindo de maneira significativa para o ganho de rigidez e resistência do material (Abdalqader Jin; Al-Tabbaa, 2016; Wu *et al.*, 2021; Jeremiah *et al.*, 2024).

Os resultados também indicam que os incrementos de MR obtidos para o Solo VS foram superiores aos observados para o Solo BR. Aos 28 dias de cura, o Solo VS ativado apresentou um incremento de 655,53% em relação à condição não ativada, enquanto que, para o Solo BR, esse aumento foi de 39,55%.

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que a eficácia da estabilização alcalina é influenciada pelo tipo de solo e por suas propriedades intrínsecas, indicando que as características dos materiais condicionam os mecanismos de ativação alcalina (Reddy *et al.*, 2024). Na presente pesquisa, embora os teores disponíveis de sílica e alumina sejam semelhantes para ambos os solos, a resposta diferenciada observada pode estar associada, principalmente, às diferenças granulométricas. O Solo VS, de natureza arenosa e com maior índice de vazios, apresentou maior ganho de resistência, associado à formação de uma microestrutura mais densa e compacta, caracterizada pela presença de material granular fino oriundo da mistura de escória de aciaria elétrica primária e cinza volante ativadas.

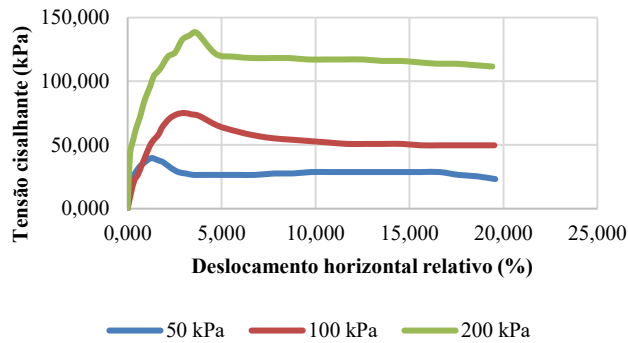
Esse comportamento está de acordo com os resultados reportados por Zhang *et al.* (2022), que demonstraram que o gel geopolimérico modifica a microestrutura de solos arenosos por meio de mecanismos de recobrimento, ligação e preenchimento. Nesse processo, o gel recobre a superfície das partículas do solo, envolve partículas soltas formando aglomerados, aumenta as forças de adesão entre os grãos e, parcialmente, preenche os poros, ampliando a área efetiva de contato entre as partículas e promovendo maior integridade estrutural da amostra (Zhang *et al.*, 2022).

4.3.3 Ensaios de Resistência ao Cisalhamento Direto

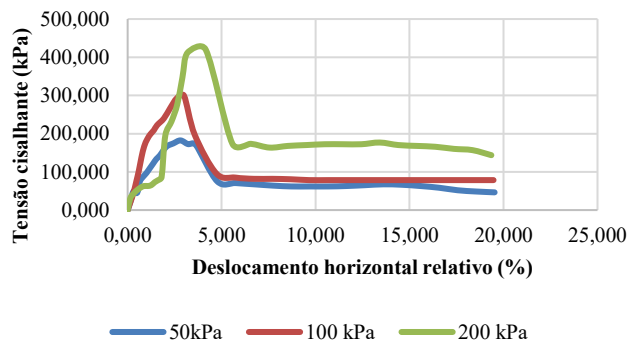
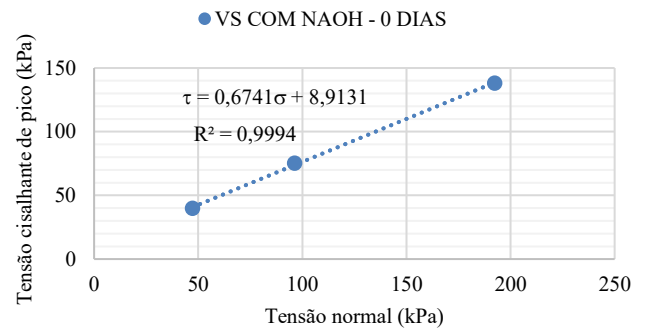
As Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam as curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal relativo das misturas ótimas não álcali-ativadas (solo–CV–EAEP) e das misturas ótimas com ativação alcalina (solo–CV–EAEP–NaOH), testadas aos 0, 7 e 28 dias. Também são apresentadas as respectivas equações das envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico,

das quais podem ser determinados os valores de coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ'), e os coeficientes de determinação (R^2) que atestam a qualidade estatística do modelo linear de ajuste dos dados experimentais.

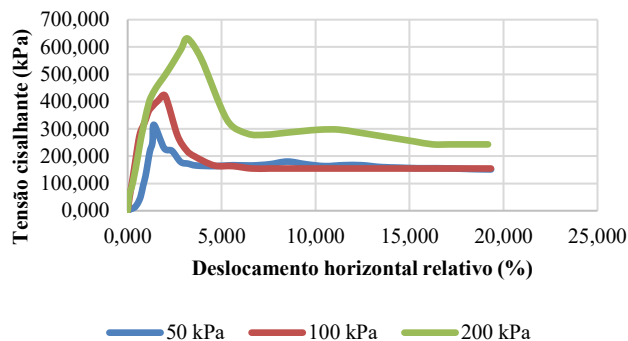
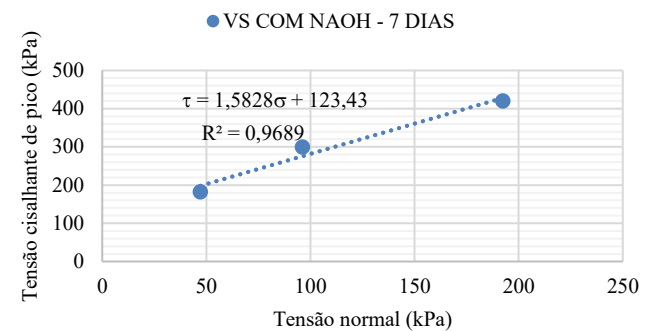
Figura 4.4: Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Relativo da Mistura Ótima Solo VS -CV – EAEP – NAOH: (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 28 dias



(a)



(b)



(c)

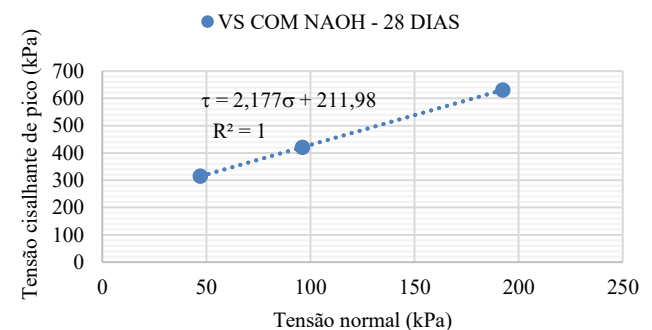
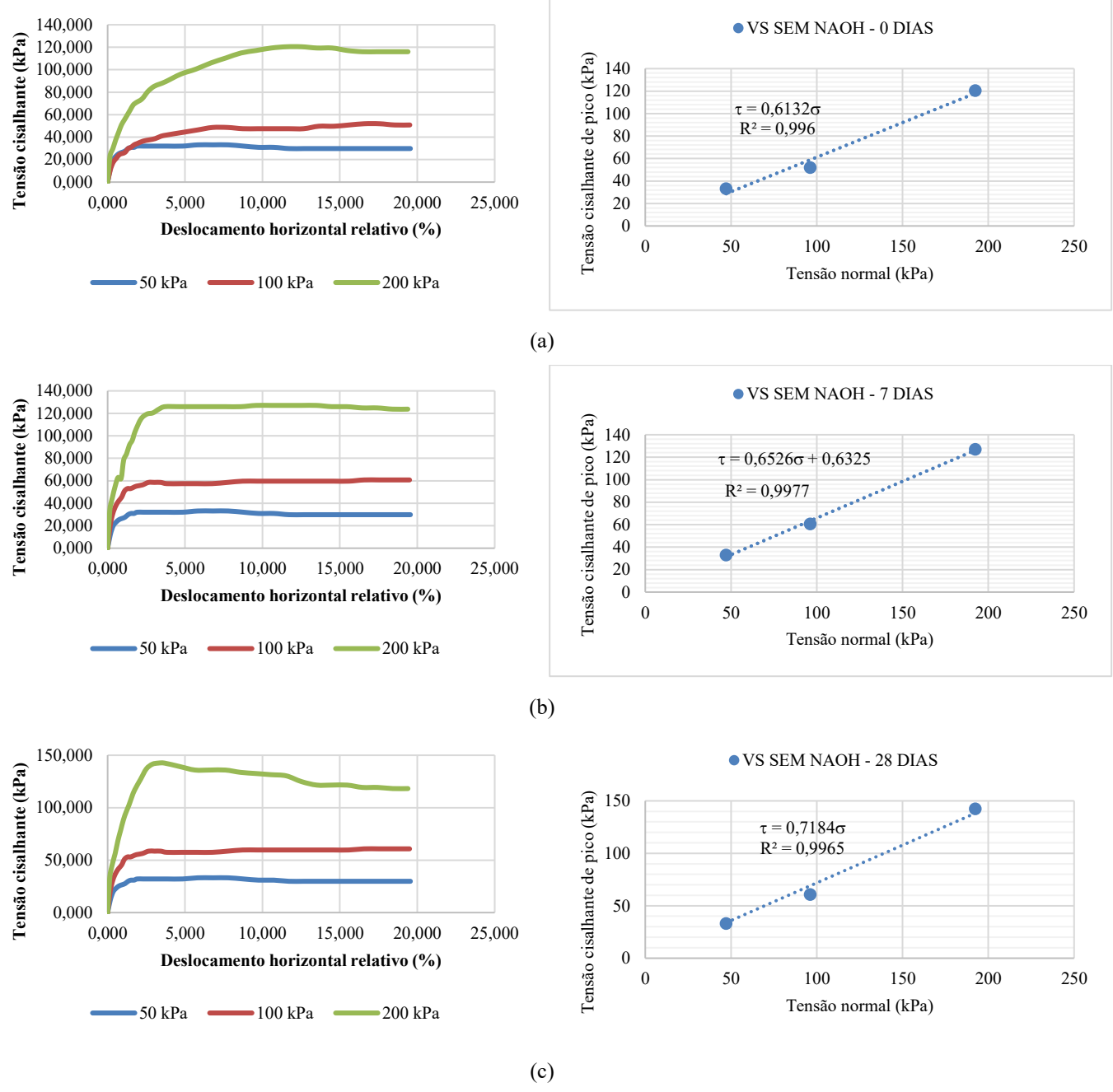
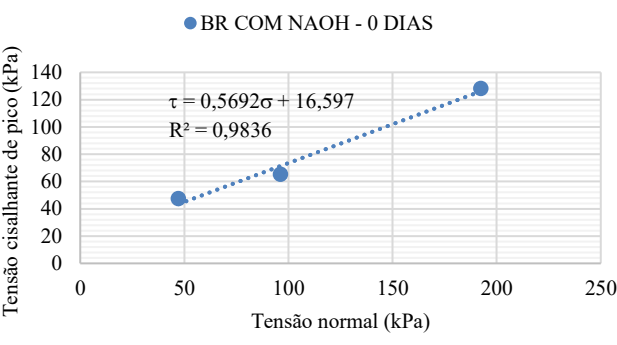
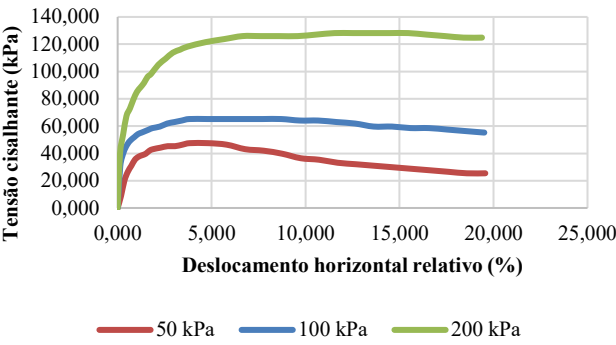


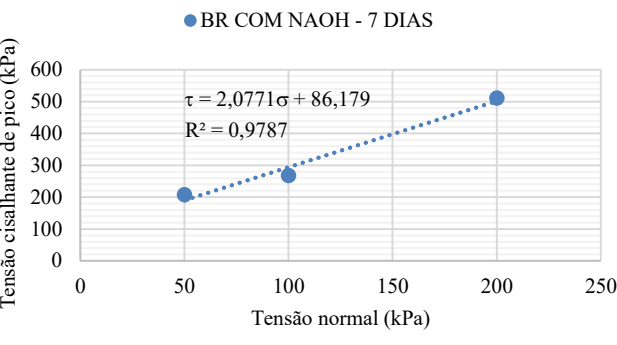
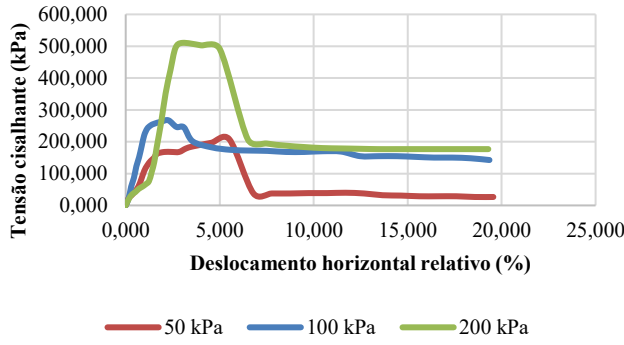
Figura 4.5: Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Relativo da Mistura Ótima Solo VS -CV
– EAEP: (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 28 dias



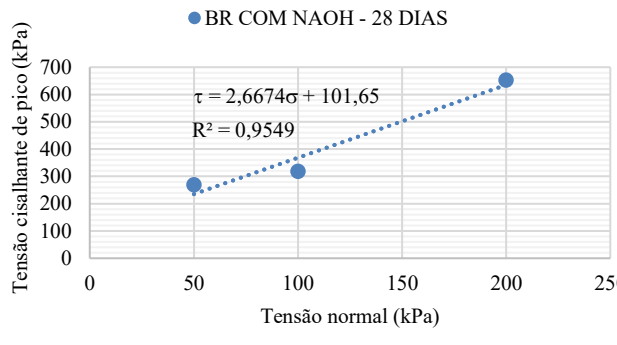
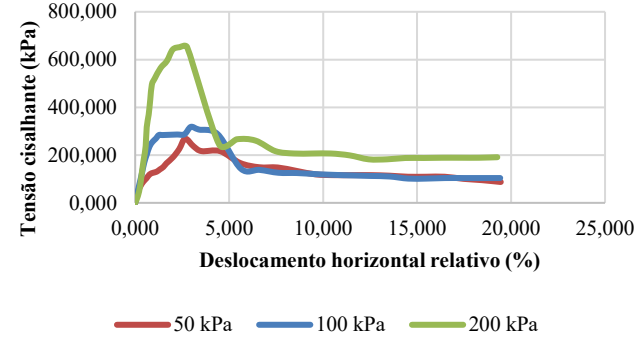
**Figura 4.6: Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Relativo da Mistura Ótima Solo BR -CV
– EAEP- NAOH: (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 28 dias**



(a)

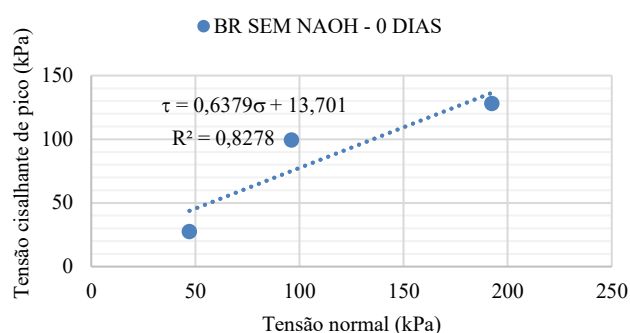
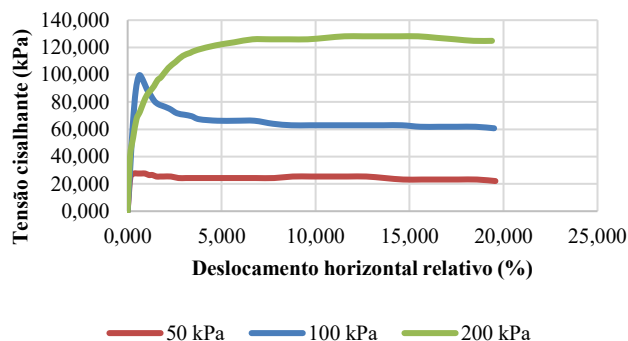


(b)

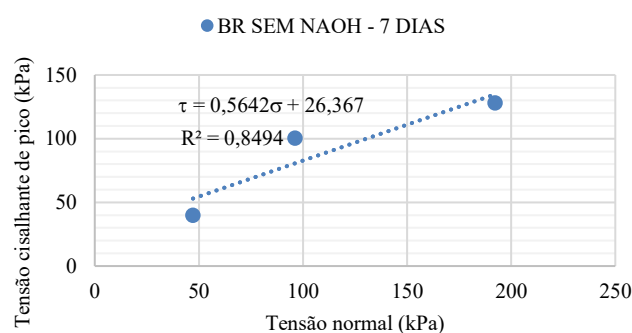
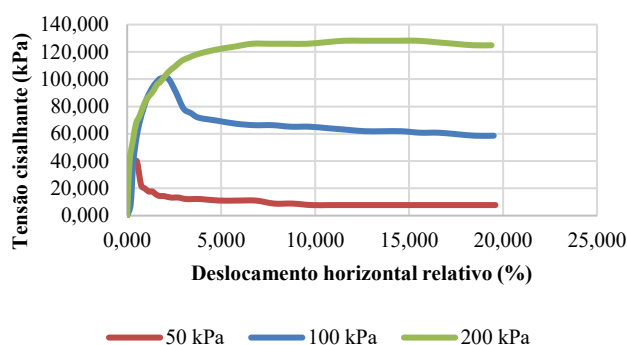


(c)

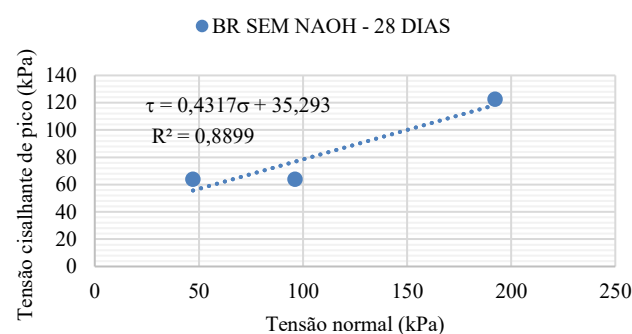
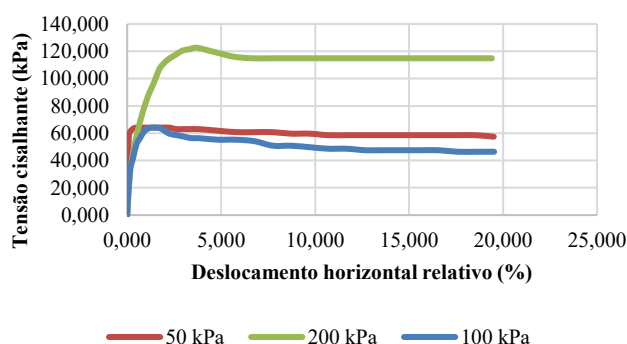
Figura 4.7: Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Relativo da Mistura Ótima Solo BR -CV – EAEP: (a) 0 dias; (b) 7 dias; (c) 28 dias



(a)



(b)



(c)

A comparação entre as misturas solo-CV-EAEP e aquelas estabilizadas por ativação alcalina (solo-CV-EAEP-NaOH) indica que a presença do ativador promoveu um aumento expressivo da tensão cisalhante de pico, sobretudo sob maiores níveis de tensão normal (200 kPa), conforme observado nas Figuras 4.4(c) e 4.6(c). Esse incremento de resistência indica

que as misturas ativadas apresentam maior travamento interpartículas e maior resistência à deformação inicial (Lu *et al.*, 2024; Alan; Bawa, 2025).

A melhoria observada está associada à formação de produtos cimentantes resultantes do processo de ativação alcalina (CASH, CSH), formados simultaneamente aos géis de NASH durante o processo de geopolimerização (Abdalqader Jin; Al-Tabbaa, 2016; Wu *et al.*, 2021; Jeremiah *et al.*, 2024). Esses produtos contribuem para a ligação entre partículas do solo e dos resíduos, aumentando a resistência ao cisalhamento mobilizada no ensaio.

A análise das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal relativo também revela uma mudança significativa no comportamento mecânico das misturas estabilizadas via ativação alcalina, para as quais são observados picos de tensão bem definidos, seguidos de tensões cisalhantes residuais, comportamento não identificado nas misturas não ativadas. Esse comportamento está em concordância com resultados reportados na literatura (Rios *et al.*, 2015; Rios *et al.*, 2018).

A redução brusca da tensão cisalhante após o pico, observada para ambos os solos ativados, sugere um mecanismo de ruptura de caráter frágil (Alan; Bawa, 2025). Esse comportamento encontrado nos ensaios condiz com o comportamento tensão-deformação de materiais geotécnicos cimentados encontrados na literatura, que, segundo Schnaid *et al.* (2001), em geral, apresentam um comportamento rígido e aparentemente linear no início do cisalhamento até um ponto bem definido de plastificação, a partir do qual o solo sofre deformações plásticas até a ruptura, caracterizada pela fragilidade e formação de plano de cisalhamento. De acordo com Clough *et al.* (1981), o caráter frágil da ruptura tende a se intensificar com o aumento do grau de cimentação do material.

Resultados compatíveis são relatados por Rios *et al.* (2016), que estudaram a ativação alcalina de cinzas volantes com hidróxido e silicato de sódio como alternativa ao cimento Portland na melhoria do desempenho mecânico de uma areia siltosa. Os ensaios triaxiais em amostras álcali-ativadas indicaram aumento expressivo da resistência e elevada rigidez, com ângulo de atrito de pico em torno de 65° e intercepto coesivo da ordem de 290 kPa. De maneira análoga, Consoli *et al.* (2020a, 2020b), a partir de ensaios triaxiais em amostras provenientes de camadas estabilizadas, observaram comportamento de pico pronunciado, ruptura frágil e comportamento volumétrico caracterizado por leve compressão inicial seguida de expansão.

As envoltórias de resistência obtidas a partir dos ensaios de cisalhamento direto, apresentadas nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, permitiram a determinação dos parâmetros de

resistência ao cisalhamento de pico, representados pela coesão (c') e pelo ângulo de atrito interno (ϕ'). Os valores desses parâmetros encontram-se sintetizados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

A análise dos resultados indica um incremento significativo tanto da coesão quanto do ângulo de atrito para todas as misturas submetidas à ativação alcalina. Esse aumento está associado às reações entre o NaOH e os óxidos de silício e alumínio presentes na cinza volante e na escória de aciaria elétrica primária, que resultam na formação de géis CASH e NASH. Esses produtos atuam como agentes cimentantes, promovendo a ligação entre as partículas do solo e dos resíduos, aumentando, principalmente, a coesão da mistura (Alan; Bawa, 2025). Esse fenômeno ocorre devido à aglomeração de partículas previamente soltas, o que resulta em uma matriz mais coesa e resistente (Xie *et al.*, 2024). Além disso, a agregação induzida pelo ligante altera a estrutura interna da mistura, aumentando o atrito mobilizado na massa como um todo, o que contribui para o incremento do ângulo de atrito efetivo (Ghadir *et al.*, 2021).

Tabela 4.1: Parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas ótimas do Solo VS

Solo VS –CV–EAEP			Solo VS –CV–EAEP-NAOH			
	0 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	0 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
c' (kPa)	0	1	0	9	123	212
ϕ' (°)	31,65	33,13	37,48	33,98	57,72	65,32

Tabela 4.2: Parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas ótimas do solo BR

Solo BR–CV–EAEP			Solo BR–CV–EAEP-NAOH			
	0 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	0 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
c´ (kPa)	14	26	35	17	86	102
φ´ (°)	32,53	29,43	23,35	29,65	64,29	69,45

4.3.4 Avaliação do desempenho em função do tempo de cura

Para avaliar o efeito do tempo de cura sobre as variáveis de resposta Índice de Suporte California (ISC), Módulo de Resiliência (MR) e Resistência ao Cisalhamento (τ), foram plotados gráficos de variação das propriedades (ISC, MR e τ) com o tempo de cura. As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam os efeitos de interação entre os fatores Ativação alcalina e Tempo de cura sobre as respostas ISC, MR e τ_{pico} , respectivamente.

Figura 4.8: Gráficos de interação dos fatores Ativação alcalina e Tempo de cura (dias) sobre a resposta ISC (%): (a) Mistura ótima do solo VS; (b) Mistura ótima do solo BR.

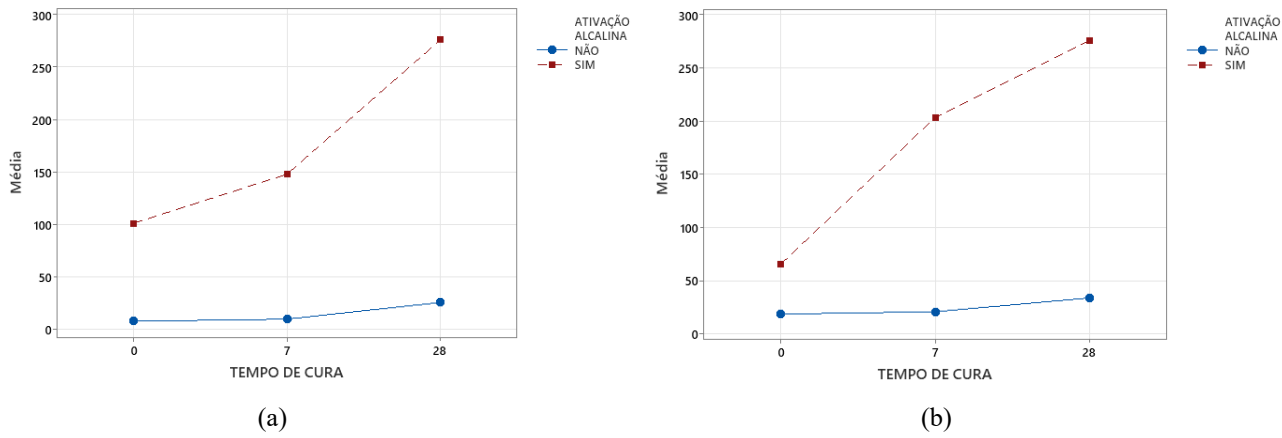


Figura 4.9: Gráficos de interação dos fatores Ativação alcalina e Tempo de cura (dias) sobre a resposta MR (MPa): (a) Mistura ótima do solo VS; (b) Mistura ótima do solo BR.

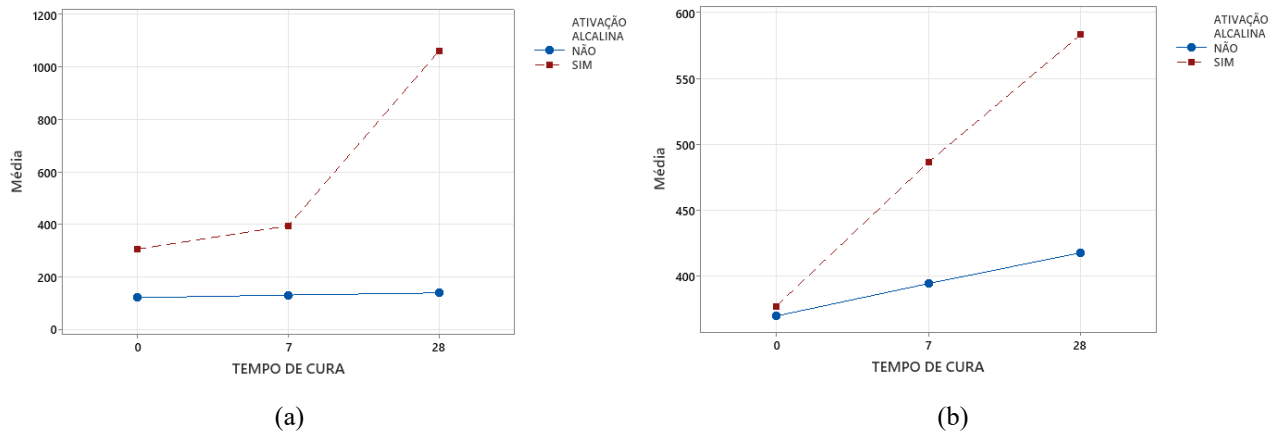
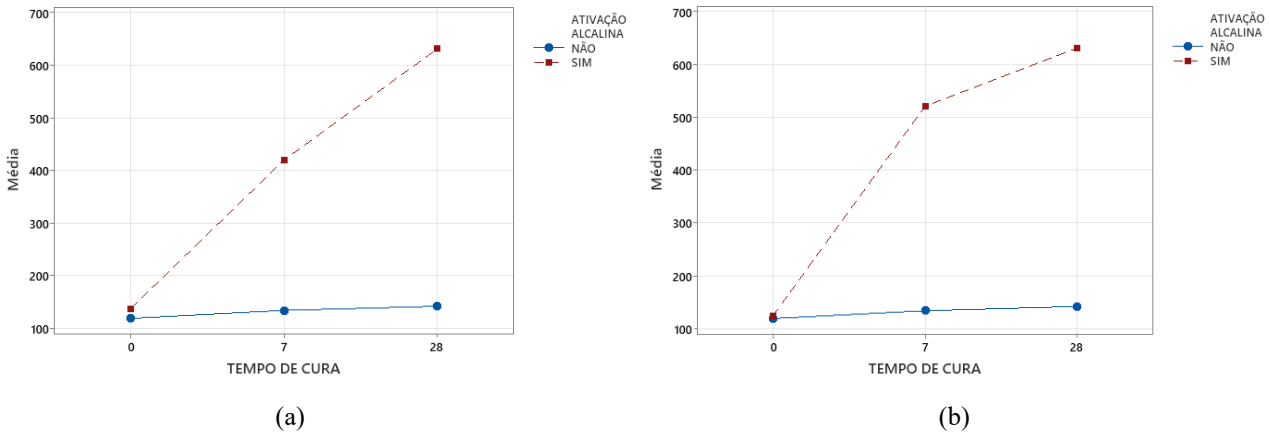


Figura 4.10: Gráficos de interação dos fatores Ativação alcalina e Tempo de cura (dias) sobre a resposta τ_{pico} (kPa) sob tensão normal de 200 kPa: (a) Mistura ótima do solo VS; (b) Mistura ótima do solo BR.



A análise dos gráficos de interação entre a Ativação alcalina e o Tempo de cura evidencia a existência de uma interação significativa entre esses fatores, uma vez que as curvas correspondentes às misturas ativadas e não ativadas apresentam inclinações distintas e não paralelas. Observa-se que as misturas ótimas submetidas à ativação alcalina apresentam incremento progressivo e expressivo de ISC, MR e τ_{pico} , particularmente aos 28 dias de cura, refletindo a evolução contínua das reações de dissolução, policondensação e formação de géis ligantes, como CSH, CASH e NASH, que promovem a densificação da microestrutura, o aumento da rigidez e a melhoria da capacidade de suporte (Cristelo *et al.*, 2011; Cristelo *et al.*, 2012a ; Cristelo *et al.*, 2012b).

Destaca-se que, nos primeiros estágios de cura (0–7 dias), espera-se a formação inicial dos produtos de reação, particularmente CSH e NASH, sobretudo em sistemas com maior teor de escória, proporcionando rápida densificação da matriz e redução da porosidade capilar (Fang; Zhang, 2020; Zhang *et al.*, 2021). No intervalo de 14 a 28 dias, há um aumento significativo da formação de géis, com progressivo preenchimento dos poros e maior compactação da estrutura, resultando em ganhos consistentes de desempenho mecânico e estrutural das misturas (Li *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2025).

4.3.5 Análises químicas, mineralógicas e microestruturais

4.3.5.1 MEV-EDS

As Figuras de 4.11 a 4.14 apresentam a comparação entre as microestruturas das misturas ótimas solo-CV-EAEP não ativadas e as tratadas por ativação alcalina.

Figura 4.11: Comparação microestrutural por MEV e análises EDS das misturas ótimas do Solo BR aos 7 dias de cura: (a) Solo BR–CV–EAEP (não ativada); (b) Solo BR–CV–EAEP–NaOH (ativada alcalinamente).

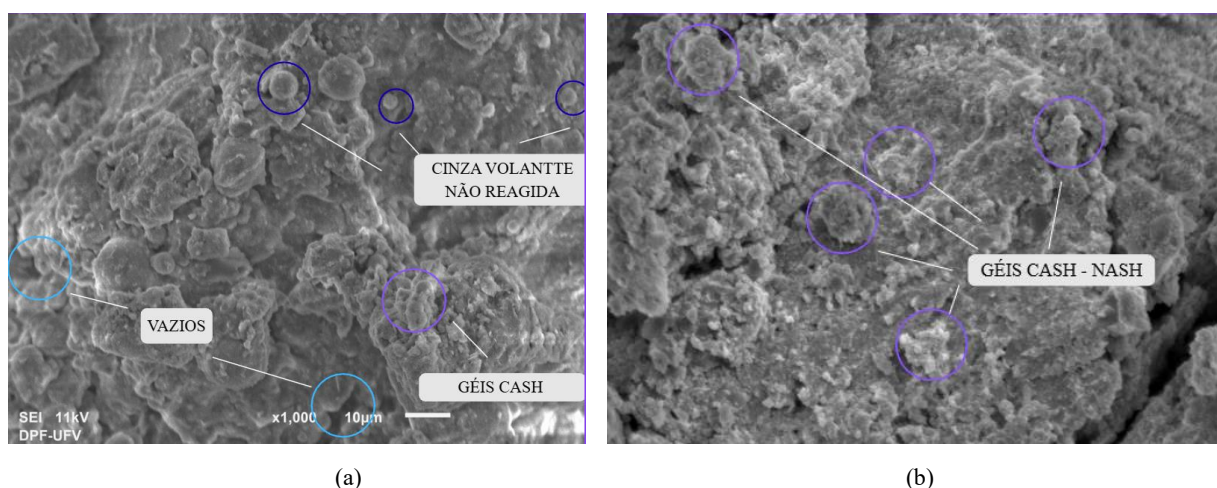


Figura 4.12: Comparação microestrutural por MEV e análises EDS das misturas ótimas do Solo BR aos 28 dias de cura: (a) Solo BR–CV–EAEP (não ativada); (b) Solo BR–CV–EAEP–NaOH (ativada alcalinamente).

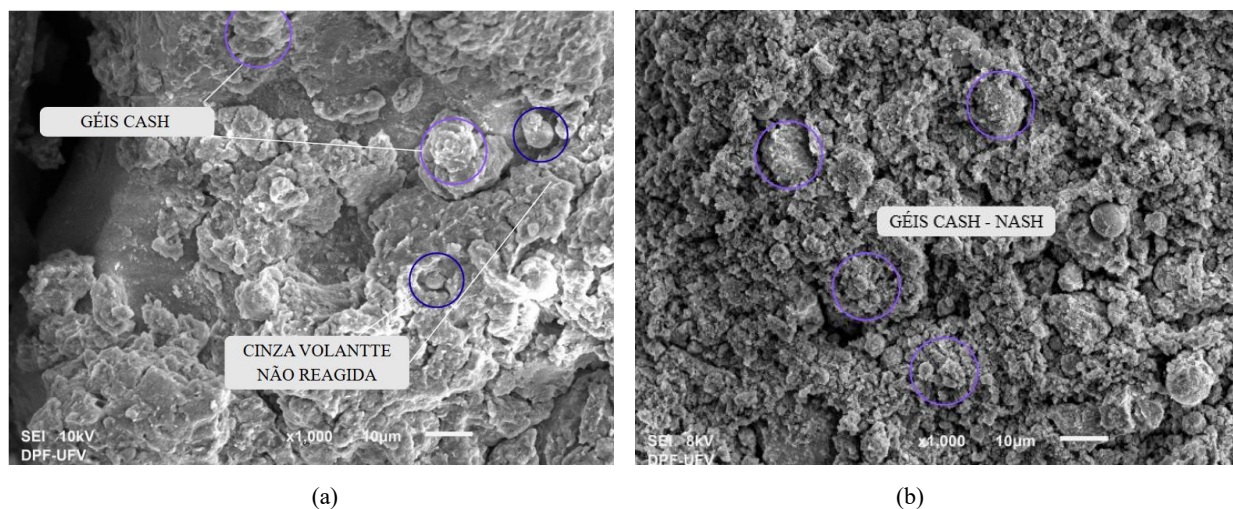


Figura 4.13: Comparação microestrutural por MEV e análises EDS das misturas ótimas do Solo VS aos 7 dias de cura: (a) Solo VS–CV–EAEP (não ativada); (b) Solo VS–CV–EAEP–NaOH (ativada alcalinamente).

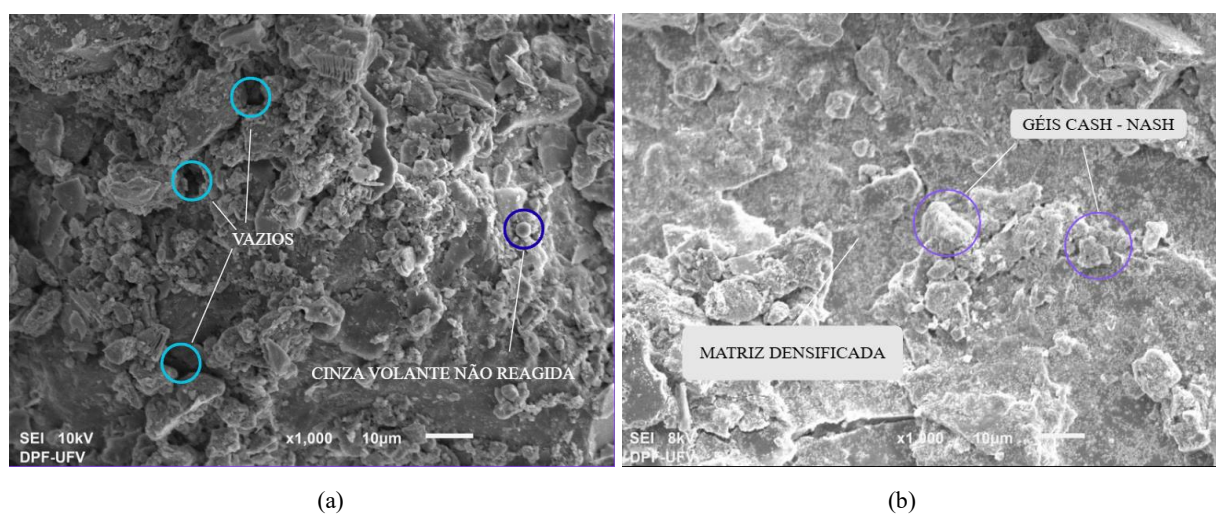
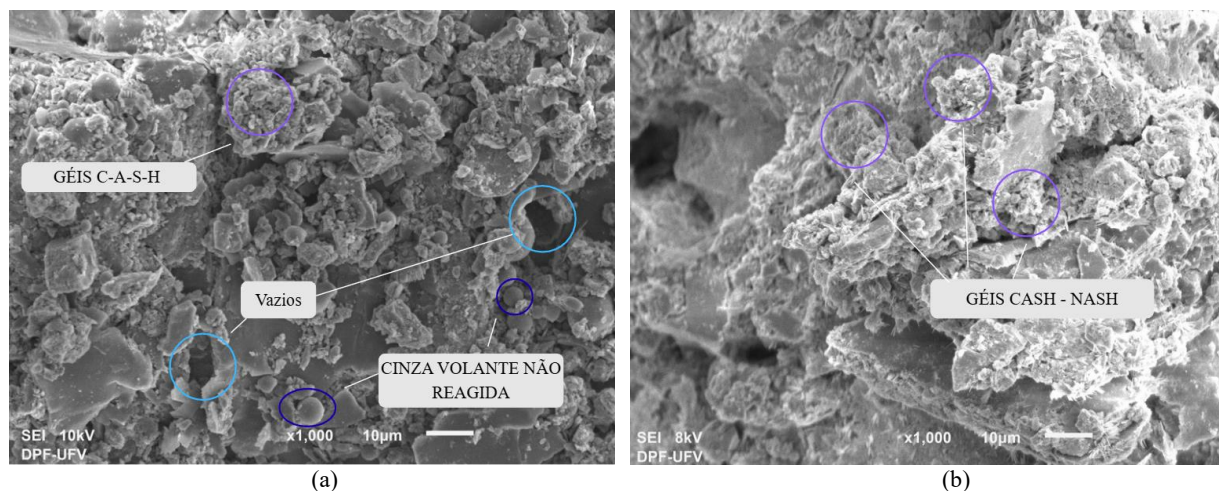


Figura 4.14: Comparação microestrutural por MEV e análises EDS das misturas ótimas do Solo VS aos 28 dias de cura: (a) Solo VS–CV–EAEP (não ativada); (b) Solo VS–CV–EAEP–NaOH (ativada alcalinamente).



As Figuras 4.11(a), 4.12(a), 4.13(a) e 4.14(a) indicam que ambas as misturas ótimas não estabilizadas são caracterizadas pela presença de partículas sólidas pouco interligadas e pela presença de vazios entre partículas. Embora seja possível observar a formação incipiente de géis cimentícios nas misturas não ativadas, esses produtos ocorrem em menor quantidade quando comparados às misturas álcali-ativadas.

Sabe-se que, em sistemas não ativados, a formação da matriz cimentícia ocorre predominantemente por meio de reações pozolânicas, nas quais a sílica e a alumina se combinam com cálcio e água, produzindo compostos cimentícios (Consoli *et al.*, 2022; Rodrigues, 2022). Esse processo apresenta cinética relativamente lenta, de modo que o desempenho mecânico dessas misturas depende fortemente do estágio de cura em que são avaliadas (Consoli *et al.*, 2022). Assim, níveis adequados de resistência e rigidez tendem a ser atingidos apenas após longos períodos de cura, frequentemente da ordem de meses (Consoli *et al.*, 2022; Rodrigues, 2022), o que justifica a menor quantidade de géis cimentícios observada nas misturas não ativadas.

Em contrapartida, a incorporação de um ativador alcalino, como a solução de NaOH empregada neste estudo, promove a aceleração das reações químicas, uma vez que os íons OH^- catalisam a ruptura das ligações Si-O-Si e Si-O-Al , elevando significativamente o pH do sistema e intensificando a dissolução das fases aluminosilicatadas (Fernández-Jiménez *et al.*, 2017). Como consequência, ocorre a rápida formação de produtos ligantes, favorecendo a densificação da matriz e o desenvolvimento antecipado das propriedades mecânicas, conforme

evidenciado nas Figuras 4.11(b), 4.12(b), 4.13(b) e 4.14(b), que indicam maior formação de géis cimentícios.

Para as misturas do solo BR, observou-se, nas amostras não ativadas (Figuras 4.11(a); 4.12(a)), uma microestrutura caracterizada pela presença de partículas esféricas de cinza volante não reagidas. Em contraste, nas misturas álcali-ativadas, identificaram-se partículas de cinza volante parcialmente dissolvidas, bem como fases cristalinas recobertas por uma camada de textura relativamente rugosa, evidenciando a formação e a coexistência de géis de NASH e de CSH, típicos de sistemas geopoliméricos à base de cinza volante e escória (Chen *et al.*, 2021).

No caso do solo VS, imagens evidenciam (para as amostras ativadas) uma microestrutura ainda mais densa, com ausência de partículas de cinza volante não reagidas. Esse comportamento está associado ao maior teor de escória presente nessa mistura, o que favorece a liberação de Ca^{2+} e a formação mais rápida de produtos cimentantes (Rios *et al.*, 2017). Destaca-se, ainda, que, no solo arenoso, os finos (EAEP e CV) atuam no preenchimento dos vazios intergranulares, potencializando o efeito físico de densificação da matriz. A sinergia entre esse mecanismo físico e as ligações químicas formadas durante a ativação alcalina explica as melhorias observadas nas propriedades mecânicas ao longo de todos os tempos de cura (Van *et al.*, 2025).

Observa-se, ainda, a evolução microestrutural do solo estabilizado aos 7 e 28 dias de cura, evidenciando que o aumento do tempo de cura resulta em uma redução significativa da porosidade e em uma matriz progressivamente mais compacta e homogênea. Esse processo explica os maiores ganhos de resistência mecânica observados para idades de cura mais avançadas, particularmente aos 28 dias, quando comparados aos resultados obtidos em idades iniciais.

4.3.5.2 DRX

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam os difratogramas de raios X das misturas de solo BR e VS testadas aos 0, 7 e 28 dias.

Figura 4.15: DRX das misturas ótimas do Solo BR testadas aos 0 dias, 7 dias e 28 dias

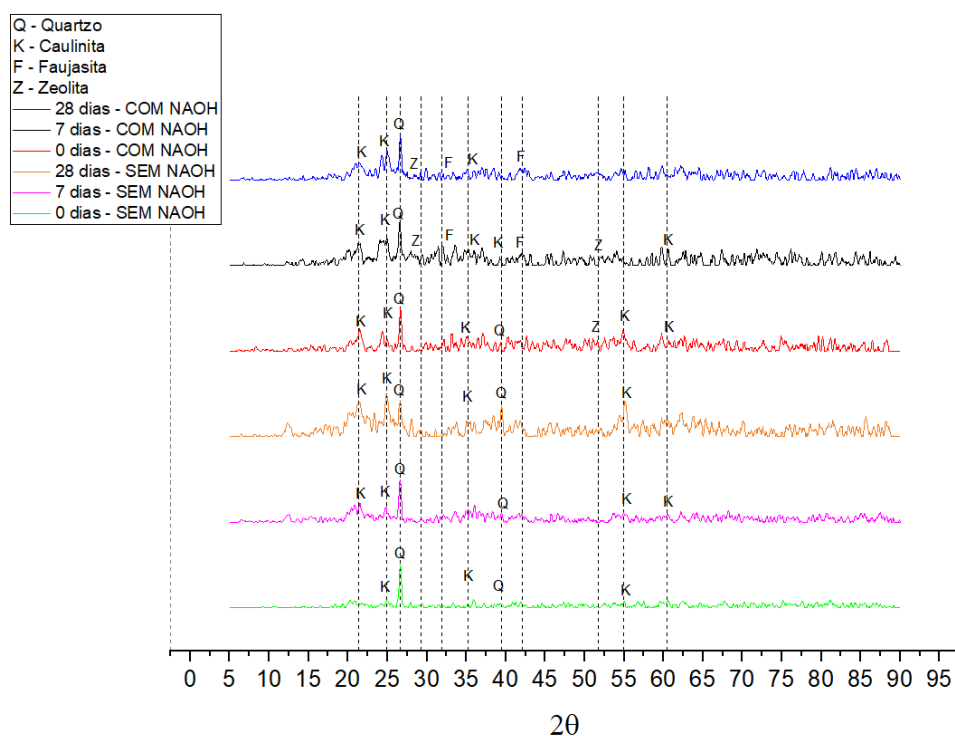
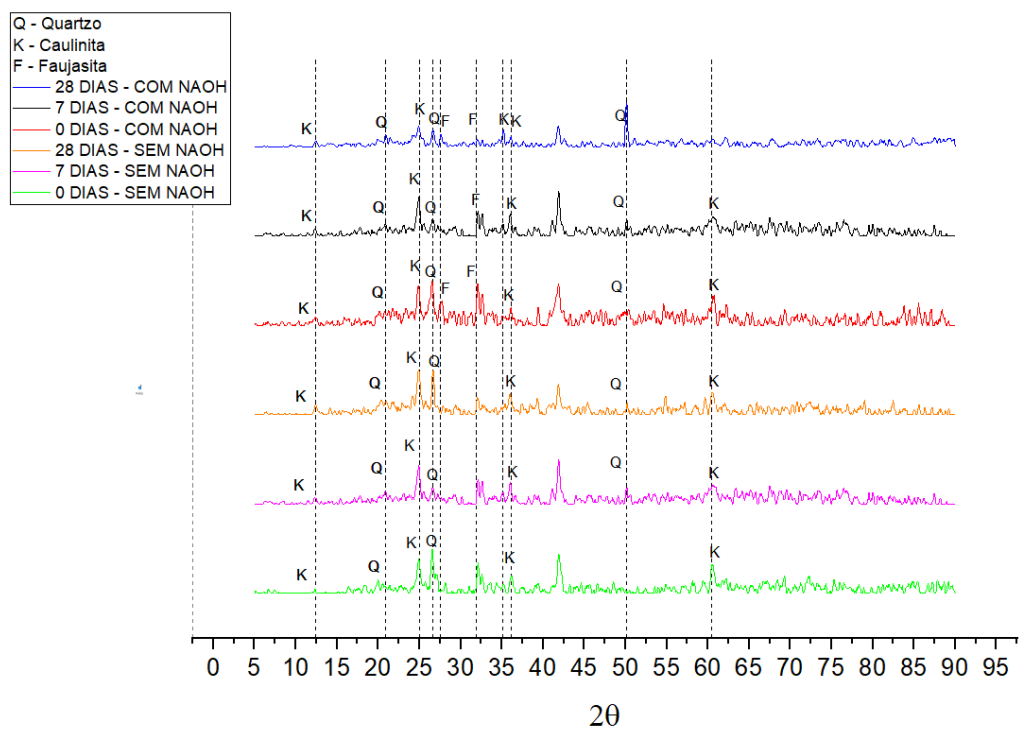


Figura 4.16: DRX das misturas ótimas do Solo VS testadas aos 0 dias, 7 dias e 28 dias



Os padrões de DRX das amostras evidenciam que, independentemente da condição de ativação e do tempo de cura, existem picos característicos de quartzo (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), indicando a permanência dessas fases minerais herdadas do solo natural. Nos difratogramas das amostras ativadas, especialmente aos 7 e 28 dias de cura, são identificados picos atribuídos a fases zeolíticas. A zeólita X ($\text{Na}_{88}(\text{H}_2\text{O})_{220}[\text{Si}_{104}\text{Al}_{88}\text{O}_{384}]$) foi identificada nos difratogramas das amostras, o que é esperado considerando a composição do gel NASH (Mendes, 2022). Além disso, observou-se a formação da zeólita Y ou faujasita ($\text{Na}_{16}\text{Ca}_{16}(\text{H}_2\text{O})_{42.7}[\text{Si}_{134.4}\text{Al}_{57.6}\text{O}_{384}]$). Ambas as estruturas são compostas por tetraedros de silício-oxigênio e alumínio-oxigênio, que formam uma unidade estrutural complexa do tipo cuboctaedro (Robayo-Salazar, 2018).

A redução dos picos de caulinita nas misturas ativadas evidencia que a ativação alcalina promove a dissolução parcial das fases argilosas, principalmente da caulinita, e a formação de fases secundárias zeolíticas, como zeólitas e faujasita, além do aumento do caráter amorfo associado à formação de géis ligantes do tipo NASH e CASH (Yu *et al.*, 2024).

4.3.5.3 FTIR

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam o espectro de FTIR das misturas de solos não ativados e daqueles tratados por ativação alcalina, para as idades de cura de 0, 7 e 28 dias.

Figura 4.17: FTIR das misturas de ótimas de Solo VS testadas aos 0 dias, 7 dias e 28 dias

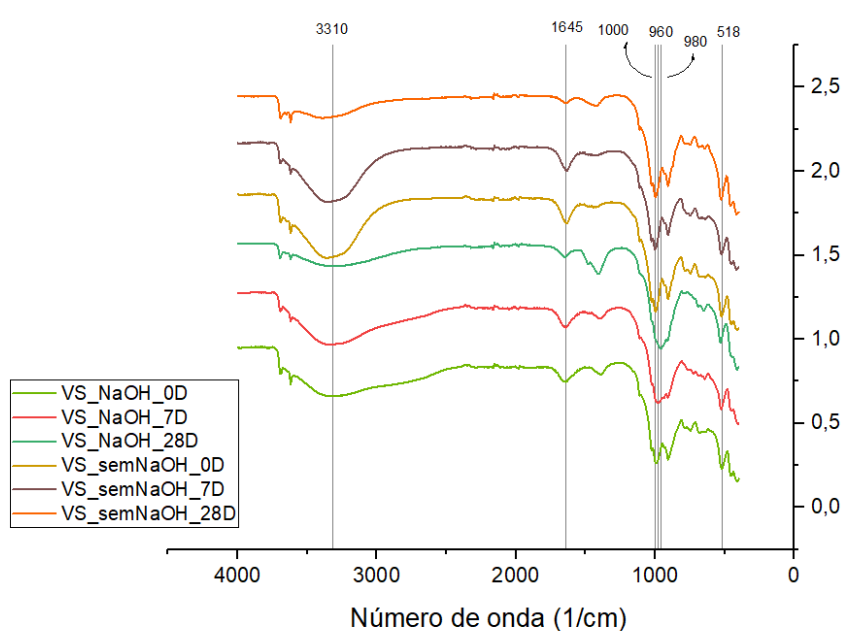
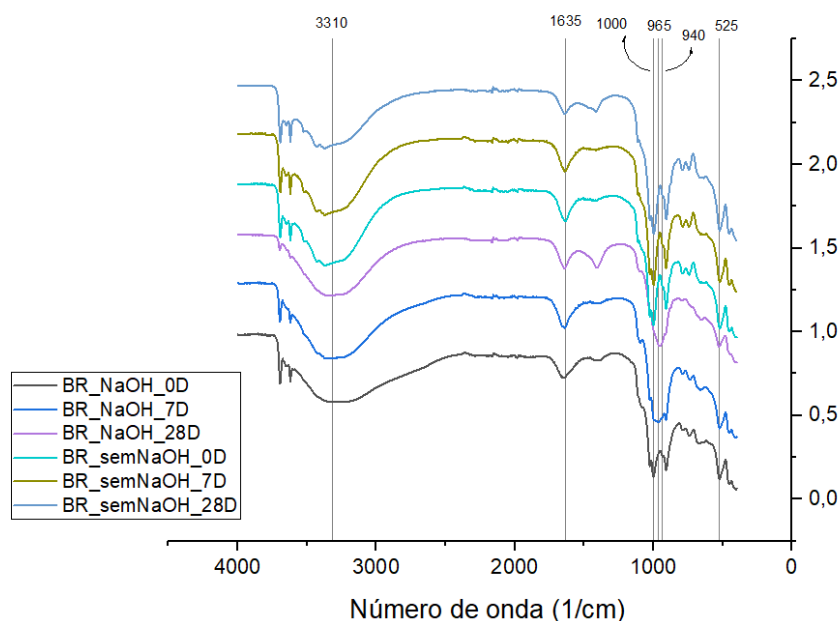


Figura 4.18: FTIR das misturas de ótimas de Solo BR testadas aos 0 dias, 7 dias e 28 dias



Para todas as misturas analisadas, observa-se a presença de uma banda principal em número de onda próximo a 1000 cm^{-1} , associada ao estiramento assimétrico da ligação Si–O–T, em que T representa um tetraedro de Si ou Al. O conjunto de bandas mais intensas nesse intervalo espectral constitui um dos principais parâmetros de interpretação na análise por FTIR, uma vez que está diretamente relacionado à formação de géis de aluminossilicato, como CASH e NASH, sendo amplamente utilizado como indicador da reatividade e do grau de polimerização do sistema (Cao *et al.*, 2020).

Com a adição da solução alcalina de NaOH, verifica-se o deslocamento da banda principal para menores números de onda, efeito associado à ativação alcalina e à formação do gel aluminossilicatado (Lee *et al.*, 2003). Esse deslocamento decorre da dissolução dos precursores por hidrólise alcalina, seguida pelas reações de policondensação que conduzem à formação da rede geopolimérica. À medida que o tempo de cura aumenta, a banda de vibração Si–O–T tende a se deslocar para valores ainda menores de número de onda (960 cm^{-1} para a mistura ótima de Solo VS com NaOH, aos 28 dias, e 940 cm^{-1} para a mistura ótima de Solo BR com NaOH, aos 28 dias), indicando maior incorporação de Al na estrutura do gel, uma vez que a ligação Al–O apresenta menor energia de ligação em comparação à ligação Si–O. Os picos observados em torno de 1600 cm^{-1} são atribuídos às vibrações de flexão da água adsorvida (H_2O), associadas

às vibrações O–H dos produtos de reação hidratados, sendo característicos de estruturas poliméricas com redes de aluminossilicato (Ailar *et al.*, 2011; Arioiz *et al.*, 2013; Pretty; Reddy, 2020). Por sua vez, a banda larga observada na região de, aproximadamente, 3310 cm^{-1} está relacionada ao modo de estiramento da ligação H–O–H, representando a presença de água incorporada à microestrutura porosa e possivelmente associada aos géis do tipo NASH (Burciaga-Díaz, 2020; Mendes, 2022).

4.4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos no presente programa experimental de pesquisa, conclui-se que:

- O estudo demonstrou que a eficácia da estabilização de solos por ativação alcalina é fortemente influenciada pelo tipo de solo e por suas propriedades físicas e mineralógicas. Em solos de natureza arenosa, observou-se que os finos provenientes da escória de aciaria elétrica primária (EAEP) e da cinza volante (CV) atuam no preenchimento dos vazios intergranulares, potencializando o efeito físico de densificação da matriz e contribuindo para o aumento da resistência e da rigidez do material estabilizado;
- As análises microestruturais evidenciaram que a ativação alcalina promoveu a formação de géis do tipo NASH e CASH, responsáveis pela consolidação da matriz cimentante. Os resultados de FTIR indicaram um maior grau de geopolimerização nas misturas ativadas em comparação às misturas não ativadas, o que se correlaciona diretamente com o incremento da resistência mecânica. A ocorrência das bandas principais na faixa próxima a 1000 cm^{-1} confirma o caráter aluminossilicático dos produtos de reação;
- O tempo de cura exerce influência no desempenho das misturas estabilizadas por ativação alcalina. As misturas ativadas mostraram ganhos progressivos de ISC, MR e τ_{pico} em função da evolução das reações de dissolução, policondensação e formação dos géis CSH, CASH e NASH, responsáveis pela densificação da microestrutura e aumento da rigidez;
- A aplicação de resíduos industriais na ativação alcalina para a estabilização de solos mostrou-se uma alternativa viável técnica e ambientalmente ao melhorar as propriedades mecânicas avaliadas e propor uma alternativa de aproveitamento desses resíduos em obras de pavimentação, as quais comumente demandam grandes quantitativos de materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALQADER, A. F.; JIN, F.; AL-TABBAA, A. Development of greener alkali-activated cement: utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures. *Journal of Cleaner Production*, v. 113, p. 66–75, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.010.

ABDELJOUAD, L. *et al.* Effect of clay content on soil stabilization with alkaline activation. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 5, n. 4, 2019. DOI: 10.1007/s40891-019-0157-y.

ABDULWAHED, H. S.; ALJANABI, K. R.; ABDULKAREEM, A. H. Optimization of equivalent modulus of RAP-geopolymer-soil mixtures using response surface methodology. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2022. DOI: 10.1016/j.jksues.2022.06.005.

ADHIKARI, B.; KHATTAK, M. J.; ADHIKARI, S. Mechanical and durability characteristics of fly ash-based soil-geopolymer mixtures for pavement base and subbase layers. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 22, n. 10, p. 1193–1212, 2019. DOI: 10.1080/10298436.2019.1668562.

AILAR, H.; PROVIS, J.; VAN DEVENTER, J. S. J. The effect of silica availability on the mechanism of geopolymerisation. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 210–216, 2011. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.02.001.

ALAM, P.; BAWA, S. Shear behaviour of recycled asphalt pavement and natural aggregate: large direct shear testing and machine learning based strength prediction. *Construction and Building Materials*, v. 497, art. 143931, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.143931.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). Mechanistic-empirical pavement design guide: a manual of practice. 3. ed. Washington, DC: AASHTO, 2020. ISBN 978-1-56051-748-1.

ARIOZ, E.; ARIÖZ, Ö.; KOÇKAR, Ö. M. The effect of curing conditions on the properties of geopolymer samples. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, v. 4, p. 423–426, 2013. DOI: 10.7763/IJCEA.2013.V4.339.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: materiais pozolânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895: solo – índice de suporte Califórnia (ISC) – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3080M-11: standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken: ASTM, 2011.

BASTOS, S. D. V. *Estudo do comportamento mecanístico-empírico de materiais alternativos e cimentícios em camadas de pavimentos*. 2024. 310 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

BLACKMORE, L. *et al.* Saturation and its effect on the resilient modulus of a pavement formation material. *Géotechnique*, v. 70, n. 4, p. 292–302, 2020.

BRAND, A. S. *et al.* Stabilization of a clayey soil with ladle metallurgy furnace slag fines. *Materials*, v. 13, n. 19, art. 4251, 2020. DOI: 10.3390/ma13194251.

BURCIAGA-DÍAZ, O. *et al.* Effect of waste glass incorporation on the properties of geopolymers formulated with low purity metakaolin. *Cement and Concrete Composites*, v. 107, art. 103492, 2020. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103492.

CABRAL, W. S. *Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da microregião de Mossoró/RN*. 2021. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

CAO, R. *et al.* Interpreting the early-age reaction process of alkali-activated slag using ultrasonic measurement, thermal analysis, XRD, FTIR and SEM. *Composite Structures – Part B*, v. 186, art. 107840, 2020. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107840.

CASTRO, J. F. A. *Melhoramento de um solo arenoso por ativação alcalina*. 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2015.

CHEN, K. *et al.* Modeling and optimization of fly ash–slag-based geopolymer using response surface method and its application in soft soil stabilization. *Construction and Building Materials*, v. 315, art. 125723, 2021.

CHU, Xuanxuan; THOM, Nick; DAWSON, Andrew; QIN, Lei; CHEN, Hongzhen. Drainage effects on shear behaviour and stiffness of subgrade soils and pavement drainage implications. *Construction and Building Materials*, v. 389, art. 131697, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131697.

CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, S. N. Cemented sands under static loading. *Journal of the Geotechnical Engineering*, v. 107, n. 6, p. 799–817, 1981.

CONSOLI, N. C.; *et al.* Spread footings bearing on circular and square cement-stabilized sand layers above weakly bonded residual soil. *Soil and Rocks*, v. 43, n. 3, p. 339–349, 2020b. DOI: 10.28927/SR.433339.

CONSOLI, N. C.; *et al.* Spread footings on green stabilised sand layers over weakly bonded residual soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 146, n. 11, art. 06020022, 2020a.

CONSOLI, Nilo Cesar; SILVANO, Lukas Wereszko; LOTERO, Andrés M.; SCHEUERMANN FILHO, Hugo Carlos; MONCALEANO, Cindy Johanna; CRISTELO, Nuno; *et al.* Key parameters establishing alkali activation effects on stabilized rammed earth. *Construction and Building Materials*, v. 345, art. 128299, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128299.

CRISTELO, Nuno; *et al.* Efeito do teor de cálcio na estabilização do solo com ativação alcalina. *Construction and Building Materials*, v. 29, p. 167–174, 2012a.

CRISTELO, Nuno; *et al.* Estabilização do solo utilizando ativação alcalina de cinzas volantes para construção de terra apiloadada autocompactante. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 727–735, 2012b.

CRISTELO, Nuno; GLENDINNING, Stephanie; TEIXEIRA PINTO, Amândio. Melhoria profunda de solos macios por ativação alcalina. Atas da Instituição dos Engenheiros Civis – Melhoramento do Solo, v. 164, n. 2, p. 73–82, 2011.

CUI, H.; TANG, W.; LIU, W.; DONG, Z.; *et al.* Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 522–527, 2015.

DAVIDOVITS, J. False values on CO₂ emission for geopolymer cement/concrete published in scientific papers. Technical paper, n. 24, p. 1–9, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). PRO 003/94: coleta de amostras deformadas de solo. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). PRO 199/96: redução de amostras de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro: DNER, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). ME 134/2018: pavimentação – solos – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

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

EIDGAHEE, D. R.; RAFIEAN, A. H.; HADDAD, A. A. A novel formulation for the compressive strength of IBP-based geopolymer stabilized clayey soils using ANN and GMDH-NN approaches. *Iranian Journal of Science and Technology – Transactions of Civil Engineering*, v. 44, n. 1, p. 219–229, 2020. DOI: 10.1007/s40996-019-00263-1.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 13286-7: unbound and hydraulically bound mixtures – part 7: cyclic load triaxial test for unbound mixtures. Brussels: CEN, 2004.

FANG, Guohao; ZHANG, Mingzhong. The evolution of interfacial transition zone in alkali-activated fly ash–slag concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 129, art. 105963, 2020. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105963.

GHADIR, Pooria; ZAMANIAN, Mostafa; MAHBUBI-MOTLAGH, Nazanin; SABERIAN, Mohammad; LI, Jie; RANJBAR, Navid. Shear strength and life cycle assessment of volcanic ash-based geopolymers and cement stabilized soil: a comparative study. *Transportation Geotechnics*, v. 31, art. 100639, 2021. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100639.

JEREMIAH, J. J.; ABBEY, S. J.; BOOTH, C. A.; EYO, E. U. Viability of calcinated wastepaper sludge ash geopolymer in the treatment of road pavement subgrade materials. *Transportation Geotechnics*, v. 44, art. 101165, 2024. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.101165.

JIMÉNEZ, A.; CRISTELO, N.; MIRANDA, T.; PALOMO, Á. Sustainable alkali activated materials: precursor and activator derived from industrial wastes. *Journal of Cleaner Production*, v. 162, p. 1200–1209, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.15.

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

LEE, W. K. W.; VAN DEVENTER, J. S. J. Use of infrared spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates. *Langmuir*, v. 19, p. 8726–8734, 2003. DOI: 10.1021/la026127e.

LEONG, H. Y.; *et al.* Strength development of soil–fly ash geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 8, 2018.

LIEBENBERG, J. J. E.; VISSER, A. T. Stabilization and structural design of marginal materials for use in low-volume roads. *Transportation research record*, v. 1819, n. 1, p. 166–172, 2003.

LI, C.-C.; LIN, C.-M.; CHANG, Y.-E.; CHANG, W.-T. Stabilization and crystal characterization of electric arc furnace oxidizing slag modified with ladle furnace slag and alumina. *Metals*, v. 10, n. 4, art. 501, 2020. DOI: 10.3390/met10040501.

LI, M.; XUE, C.; GAO, X.; ZHAO, Q. Alkali activation effect on geopolymer cementitious systems: microstructural evolution study and GA-BP neural network-based strength simulation.

Construction and Building Materials, v. 494, art. 143411, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.143411.

LU, R.; LUO, Q.; WANG, T.; CONNOLLY, D. P.; XIE, T. A combined experimental and DEM investigation of grain interlocking in sheared granular assemblies. *Particuology*, v. 90, p. 436–451, 2024. DOI: 10.1016/J.PARTIC.2024.01.015.

MAHEEPALA, M. M. A. L. N.; NASVI, M. C. M.; ROBERT, D. J.; GUNASEKARA, C.; KURUKULASURIYA, L. C. Mix design development for geopolymer treated expansive subgrades using artificial neural network. *Computers and Geotechnics*, v. 161, art. 105534, 2023. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105534.

MAHEEPALA, M. M. A. L. N.; NASVI, M. C. M.; ROBERT, D. J.; GUNASEKARA, C.; KURUKULASURIYA, L. C. A comprehensive review on geotechnical properties of alkali activated binder treated expansive soil. *Journal of Cleaner Production*, v. 363, art. 132488, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132488.

MENDES, B. C. *Development of geopolymetric mortars produced from industrial wastes in both precursor and activator phases*. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

MIAO, S.; SHEN, Z.; WANG, X.; LUO, F.; HUANG, X.; WEI, C. Stabilization of highly expansive black cotton soils by means of geopolymerization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, n. 10, art. 04017170, 2017.

MILLER, G.; TEH, S.; LI, D.; ZAMAN, M. Cyclic shear strength of soft railroad subgrade. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 126, n. 2, p. 139–147, 2000. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:2(139).

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. *Cement and Concrete Research*, v. 56, p. 153–170, 2014.

MOZUMDER, R.; LASKAR, A. Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer stabilized clayey soil. *Computers and Geotechnics*, v. 69, p. 291–300, 2015.

ODEH, N. A.; AL-RKABY, A. H. Strength, durability, and microstructures characterization of sustainable geopolymer improved soiley soil. *Case Studies in Construction Materials*, v. 16, art. e00988, 2022.

ONYELLOWEA, K.; IGBOAYAKA, C.; ORJI, F.; UGWUANYI, H.; VAN, D. B. Triaxial and density behaviour of quarry dust based geopolymer cement treated expansive soil with crushed waste glasses for pavement foundation purposes. *Strain*, v. 55, n. 2, art. e0010, 2019. DOI: 10.1007/s42947-019-0010-7.

OZER, I.; SOYER-UZUN, S. Relations between structural characteristics and compressive strength in metakaolin geopolymers. *Ceramics International*, v. 41, n. 8, p. 10192–10198, 2015.

PAUL, D. K.; THEIVAKULARATNAM, M.; GNANENDRAN, C. T. Damage study of a lightly stabilised granular material using flexural testing. *Indian Geotechnical Journal*, v. 45, n. 4, p. 441–448, 2015.

PREETHI, R. K.; VENKATARAMA REDDY, B. V. Experimental investigations on geopolymer stabilised compressed earth products. *Construction and Building Materials*, v. 257, art. 119563, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119563.

QIU, J.; *et al.* Fly ash/slag geopolymer as binder for mine backfilling. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2019, p. 1–12, 2019.

REDDY, S. R.; IYER, K. R. K.; DAVE, T. N. Alkali activated soil stabilization as a sustainable pathway for the development of resilient geotechnical infrastructure. *Indian Geotechnical Journal*, 2024. DOI: 10.1007/s40098-024-00893-x.

RIOS, S.; CRISTELO, N.; VIANA DA FONSECA, A.; FERREIRA, C. Stiffness behavior of soil stabilized with alkali-activated fly ash from small to large strains. *International Journal of Geomechanics*, p. 1–18, 2017.

RIOS, S.; CRISTELO, N.; VIANA DA FONSECA, A.; FERREIRA, C. Structural performance of alkali activated soil–ash versus soil–cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016.

RIOS, S.; CRISTELO, N.; VIANA DA FONSECA, A.; FERREIRA, C. Structural performance of alkali-activated soil–ash versus soil–cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 2, art. 04015077, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001398.

RIOS, S.; FERREIRA, C.; VIANA DA FONSECA, A. Melhoramento de um solo arenoso por ativação alcalina para mitigação da liquefação. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 16., 2018, Portugal. *Anais...* Portugal: [s.n.], 2018.

ROBAYO-SALAZAR, R.; MEJÍA-ARCILA, J.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; MARTÍNEZ, E. Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: a comparative analysis to OPC concrete. *Construction and Building Materials*, v. 176, p. 103–111, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.089.

RODRIGUES, K. H. P. *Utilização de resíduos industriais na estabilização de solos tropicais*. 2022. 231 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

SCHNAID, F.; PRIETTO, P. D. M.; CONSOLI, N. C. Characterization of cemented sand in triaxial compression. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 127, n. 10, p. 857–868, 2001.

SEVERO, C. G. S.; *et al.* Características dos materiais ativados alcalinamente. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 8, n. 2, p. 55–67, 2013.

SHARIATMADARI, N.; *et al.* Compressive strength of sandy soils stabilized with alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 11, 2021.

SILVA, M. C. A. *Melhoramento de um solo argiloso com recurso à ativação alcalina de resíduos para aplicação em infraestruturas de transporte*. 2016. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Minho, 2016.

VAN, H. X.; DANG, V. Q.; CHAU, V. N.; HO, L. S. Microstructure and physico-mechanical properties of geopolymers stabilized soils considering the influence of precursor contents and curing conditions. *Materials Today Communications*, v. 49, art. 113721, 2025. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.113721.

WANG, J.; XIA, Y.; SHI, D.; LIU, Y.; WANG, H.; ZHAO, Y.; LI, X.; GAO, X. Upcycling high-volume lithium slag in all-solid waste binder: dual roles of sulfate activation and aluminosilicate reaction. *Chemical Engineering Journal*, 2025. DOI: 10.1016/j.cej.2025.167844.

WANG, Y.; *et al.* Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash-based geopolymer. *Journal of Cleaner Production*, v. 244, art. 118852, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118852.

WILKINSON, A.; HAQUE, A.; KODIKARA, J. Stabilisation of clayey soils with industrial by-products: part A. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*, v. 163, n. 3, p. 149–163, 2010. DOI: 10.1680/grim.2010.163.3.149.

WU, D.; WANG, Y.; HU, L. Interfacial characteristics of geopolymer stabilizers with clay mineral. *Applied Clay Science*, v. 250, art. 107286, 2024.

WU, J.; MIN, Y.; LI, B.; ZHENG, X. Stiffness and strength development of the soft clay stabilized by the one-part geopolymer under one-dimensional compressive loading. *Soils and Foundations*, v. 61, n. 3, p. 974–988, 2021. DOI: 10.1016/j.sandf.2021.06.001.

XIE, J.; ZHANG, J.; CAO, Z.; BLOM, J.; VUYE, C.; GU, F. Feasibility of using building-related construction and demolition waste-derived geopolymer for subgrade soil stabilization. *Journal of Cleaner Production*, v. 450, art. 142001, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142001.

XU, L.; ZHA, F.; LIU, C.; KANG, B.; *et al.* Experimental investigation on carbonation behavior in lime-stabilized expansive soil. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2020, art. 7865469, 2020. DOI: 10.1155/2020/7865469.

YARIV, S.; CROSS, H. Colloid geochemistry of clay minerals. In: YARIV, S.; CROSS, H. *Geochemistry of colloid systems*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1979. p. 287–333.

YU, X.; *et al.* Synergistic effects of recycled demolition waste and geopolymers. Case Studies in *Construction Materials*, v. 20, art. e03261, 2024.

ZHANG, J.-J.; LI, B.; YU, C.; ZHANG, M.-Y. Mechanical properties of slag–fly ash based geopolymer stabilized sandy soil. *Rock and Soil Mechanics*, v. 43, n. 9, p. 2421–2430, 2022. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.6925.

ZHANG, M.; LONG, Y.; YANG, C.; WU, F.; YU, L.; LI, X.; YANG, K.; ZHU, X.; TIAN, Y.; ZHAO, M. Early hydration of blast furnace slag in the presence of sodium chromate. *Construction and Building Materials*, v. 297, art. 123775, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123775.

5 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO CÍCLICO DE SOLOS ESTABILIZADOS POR ATIVAÇÃO ALCALINA À LUZ DA TEORIA DO SHAKEDOWN

RESUMO

O comportamento mecânico de materiais empregados em camadas estruturais de pavimentos é fortemente condicionado pelas solicitações cíclicas impostas pelo tráfego, sendo a deformação permanente (DP) um dos principais mecanismos associados ao afundamento de trilha de roda e à degradação estrutural. Embora a estabilização de solos por ativação alcalina venha sendo amplamente investigada quanto às propriedades estáticas, ainda são escassos os estudos que avaliam seu desempenho sob carregamentos repetidos e à luz da Teoria do Shakedown. Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento de deformação permanente e a resposta plástica de misturas solo–cinza volante (CV)–escória de aciaria elétrica primária (EAEP), com e sem ativação alcalina, visando à aplicação em pavimentação rodoviária. Foram investigados dois solos, um predominantemente arenoso (solo VS) e outro predominantemente argiloso (solo BR), moldados na umidade ótima e compactados na energia Proctor Intermediária. Os ensaios de deformação permanente foram realizados em equipamento triaxial cíclico conforme a norma EN 13286-7. Os resultados indicaram que as misturas álcali-ativadas apresentaram, de modo geral, reduções significativas nos níveis de deformação permanente quando comparadas às misturas não ativadas, com concentração da maior parte do acúmulo de DP nos primeiros ciclos e tendência à estabilização ao longo do carregamento. Observou-se ainda que o desempenho foi fortemente dependente do tipo de solo, sendo mais pronunciado para o solo arenoso, em função da maior eficiência da densificação da matriz e da interação solo–gel. A aplicação da Teoria do Shakedown evidenciou que, embora os valores absolutos de DP sejam reduzidos nas misturas ativadas, determinadas combinações de tensões podem conduzir a regimes de resposta plástica menos favoráveis, indicando a necessidade de cautela na extrapolação de critérios normativos desenvolvidos para materiais não ligados. Conclui-se que a ativação alcalina configura uma alternativa tecnicamente viável para a melhoria do desempenho mecânico de solos tropicais aplicados em pavimentação, promovendo maior estabilidade frente a carregamentos cíclicos.

Palavras-chave: ativação alcalina; deformação permanente; teoria do Shakedown; solos estabilizados; pavimentação.

ABSTRACT

The mechanical behavior of materials used in pavement base and subbase layers is strongly conditioned by the cyclic loads imposed by traffic, with permanent deformation (PD) being one of the main mechanisms associated with rutting and structural degradation. Although soil stabilization by alkali activation has been widely investigated with respect to static properties, studies addressing its performance under repeated loading and from the perspective of Shakedown Theory are still scarce. In this context, this research aimed to evaluate the permanent deformation behavior and the plastic response of soil–fly ash (FA)–electric arc furnace slag (EAFS) mixtures, with and without alkali activation, for application in road pavements. Two soils were investigated, one predominantly sandy (VS soil) and the other predominantly clayey (BR soil), molded at optimum moisture content and compacted at Intermediate Proctor energy. Permanent deformation tests were carried out using a cyclic triaxial apparatus in accordance with EN 13286-7. The results indicated that alkali-activated mixtures generally exhibited significant reductions in permanent deformation levels compared to non-activated mixtures, with most of the PD accumulation occurring in the initial loading cycles and a tendency toward stabilization during continued loading. The performance was also found to be strongly dependent on soil type, with more pronounced improvements observed for the sandy soil due to greater efficiency in matrix densification and soil–gel interaction. The application of Shakedown Theory revealed that, although absolute PD values are reduced in activated mixtures, certain stress combinations may lead to less favorable plastic response regimes, indicating the need for caution when extrapolating normative criteria developed for unbound materials. It is concluded that alkali activation represents a technically viable alternative for improving the mechanical performance of tropical soils used in pavement applications, promoting greater stability under cyclic loading.

Keywords: alkali activation; permanent deformation; Shakedown theory; stabilized soils; pavements.

5.1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário desempenha papel essencial na sociedade, viabilizando não apenas o deslocamento de produtos, serviços e pessoas, mas também a integração entre os demais modais de transporte (Schreinert, 2021). No Brasil, esse protagonismo é ainda mais expressivo, uma vez que as rodovias respondem por, aproximadamente, 95% do transporte de passageiros e por mais de 65% das cargas movimentadas no país, configurando uma das maiores participações do modal rodoviário entre economias de extensão territorial semelhante (CNT, 2025).

A ação do tráfego e das intempéries impõe esforços solicitantes às camadas constituintes do pavimento, as quais devem suportar tais solicitações apresentando deformações compatíveis com sua natureza, de modo a evitar rupturas ou danos prematuros (Bastos, 2024). Entre os principais mecanismos de degradação estrutural dos pavimentos, destaca-se o acúmulo de deformações permanentes verticais (Dawson; Kolisoja, 2004; Kim *et al.*, 2009). Além de acelerar a deterioração da estrutura, essas deformações comprometem o conforto e a segurança dos usuários (Bastos, 2024; Hua; White, 2002).

Diante desse cenário, para que um solo possa ser utilizado em camadas de pavimentos, ele necessita atender a requisitos mínimos exigidos por norma, como baixos valores de expansão, boas resistência e rigidez mecânicas e capacidade de suporte adequada (Bastos, 2024). Nesse contexto, a estabilização é uma das técnicas utilizadas de forma a conferir uma melhoria dessas propriedades, de modo a enquadrar os solos dentro das especificações construtivas vigentes.

Nesse cenário, ganha destaque o estudo da estabilização de solos por ativação alcalina, que, em comparação com a técnica tradicional de estabilização com cimento, tem produzido materiais (solos álcali-ativados) com propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas equivalentes, como baixa condutividade térmica, alta resistência à compressão e baixa permeabilidade (Severo *et al.*, 2013; Ozer; Soyer-Uzun, 2015; Qiu *et al.*, 2019).

Os materiais empregados nas camadas estruturais dos pavimentos estão submetidos a carregamentos cíclicos, que condicionam diretamente seu comportamento mecânico. Por esse motivo, esses materiais são frequentemente avaliados em laboratório, visando a análise da evolução da deformação permanente ao longo dos ciclos de carga, em função do nível de tensão aplicado (Lima *et al.*, 2021).

A deformação permanente (DP) é um dos fenômenos mais relevantes na avaliação do comportamento estrutural dos pavimentos. O acúmulo desse tipo de deformação contribui diretamente para o afundamento de trilha de roda (ATR), um dos principais defeitos dos

pavimentos flexíveis, além do trincamento por fadiga (Cabral, 2021). A DP ocorre devido às repetidas aplicações de tensões pelo tráfego, resultando em recalques irreversíveis. Segundo Chen *et al.* (2004), o acúmulo de deformações permanentes ao longo das camadas leva ao desenvolvimento de sulcos na superfície do pavimento. Motta (1991), Huang (1993) e Medina (1997) identificam a DP como um dos principais mecanismos de ruptura que devem ser considerados no dimensionamento de pavimentos.

Para a caracterização mecânica das camadas dos pavimentos, a Deformação Permanente (DP) é um parâmetro internacionalmente adotado em métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos. Diversos autores têm estudado o comportamento cíclico de solos e misturas solo-cimento (Li; Selig, 1996; Lekarp *et al.*, 2000; Werkmeister, 2003; Guimarães, 2009; Oliveira, 2011; Cabral, 2021). Ainda, muitos pesquisadores têm investigado a aplicabilidade de materiais disponíveis localmente para uso como materiais de sub-base/base, incluindo subprodutos e resíduos, como cinzas volantes (Renjith *et al.*, 2021 ; Vieira *et al.*, 2020), pó de forno de cimento (Omrani; Modarres, 2018) e resíduos de construção e de demolição (Jayakody *et al.*, 2018; Rahman *et al.*, 2015).

No entanto, ainda são escassos os estudos sobre o comportamento da DP em materiais estabilizados via ativação alcalina empregados em camadas de base e sub-base, o que dificulta a previsão de desempenho por meio de rotinas mecanístico-empíricas. Destaca-se, ainda, a chamada Teoria do Shakedown, que tem sido amplamente utilizada para caracterizar o comportamento mecânico de materiais de pavimentação, permitindo avaliar o processo de acomodação das deformações plásticas em função do número de aplicações de carga (Guimarães, 2009; Qian *et al.*, 2016; Werkmeister *et al.*, 2001).

O processo de degradação sob cargas cíclicas é bem descrito pelo conceito de Shakedown, teoria que se baseia na premissa de que, abaixo de um determinado nível de carga, o comportamento do material é predominantemente elástico, resiliente e reversível, não havendo acúmulo significativo de deformações plásticas. Quando esse limite é ultrapassado, ocorre a acumulação progressiva e não controlada de deformações permanentes (Werkmeister *et al.*, 2001).

A teoria classifica o comportamento dos materiais em quatro regimes: Shakedown Elástico, Shakedown Plástico, Fluência Plástica e Colapso Incremental (Werkmeister *et al.*, 2001). Esses conceitos foram inicialmente introduzidos por Sharp (1983) e posteriormente desenvolvidos por Werkmeister *et al.* (2001), sendo incorporados à norma europeia EN 13286-7 (CEN, 2004).

Chen *et al.* (2019) destacam ainda que esses regimes podem ser identificados a partir da análise da taxa de acumulação da deformação permanente ao longo dos ciclos de carregamento.

Para a análise do comportamento plástico de estruturas submetidas a carregamentos cíclicos à luz da Teoria do Shakedown, diversos autores têm investigado o comportamento de solos e misturas solo-cimento (Anu *et al.*, 2024; Anupam *et al.*, 2016; Cabral, 2021; Chen *et al.*, 2019; Bastos, 2024; Lima *et al.*, 2025; Rios *et al.*, 2022; Schreinert, 2021). Entretanto, ainda não há na literatura técnica estudos que avaliaram esse comportamento em materiais estabilizados por ativação alcalina, especialmente no que se refere à aplicação da Teoria do Shakedown em camadas de base e sub-base de pavimentos.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico de misturas não álcali-ativadas (misturas solo-CV-EAEP) comparativamente com misturas álcali-ativadas (misturas solo-CV-EAEP-NaOH) aplicáveis à pavimentação por meio da caracterização do comportamento plástico dos materiais com base na Teoria do Shakedown.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1 Materiais

O programa experimental de pesquisa contemplou o emprego de amostras de dois solos tropicais residuais (objetos da ativação alcalina), cinza volante (precursor), escória de aciaria elétrica primária (precursor) e hidróxido de sódio (ativador). Todos os materiais foram devidamente acondicionados em tonéis plásticos (bombonas) adequadamente vedados, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. Previamente aos ensaios, com exceção para o componente ativador, os materiais foram reduzidos segundo a norma PRO 199 (DNER, 1996) e preparados para os diferentes ensaios segundo a norma NBR 6457 (ABNT, 2016).

5.2.1.1 Solos

No programa experimental desta pesquisa, foram utilizados dois solos granulometricamente distintos: o primeiro, predominantemente argiloso, denominado solo BR, é um solo residual maduro de grande extensão territorial no relevo do município de Viçosa-MG, cuja amostra foi coletada do horizonte B de um talude de corte localizado à margem da Rodovia BR 120, nas proximidades do trevo de acesso ao campus Viçosa da Universidade Federal de Viçosa (UFV); o segundo, predominantemente arenoso, denominado solo VS, é um solo residual jovem, cuja amostra foi coletada de um talude de corte localizado na Vila Secundino, no campus Viçosa da

UFV. As amostras de solos foram coletadas em estado deformado, nas respectivas jazidas de empréstimo, conforme o procedimento PRO 003 (DNER, 1994).

5.2.1.2 Escória de aciaria elétrica primária

A amostra de escória de aciaria elétrica primária (EAEP) foi coletada em seu estado bruto no pátio da unidade siderúrgica da Vallourec, situada no município de Jeceaba-MG, em conformidade com a NBR 10007 (ABNT, 2004). A coleta desse resíduo siderúrgico em seu estado bruto se deu sobre material estocado por, no mínimo, 6 meses e já submetido ao processo de beneficiamento para a retirada da fração metálica. Para que fosse utilizada como precursora da ativação alcalina dos solos, a amostra de escória de aciaria elétrica primária bruta foi submetida ao processo de moagem em aparelho de abrasão *Los Angeles*, seguido de peneiramento para a retirada de partículas maiores que 0,6mm (peneira #30), procedimento que visou diminuir a granulometria e aumentar a superfície específica do resíduo com vistas ao aumento da eficácia de sua ação precursora.

5.2.1.3 Cinza volante

A amostra de cinza volante empregada na pesquisa 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-SC. Conforme informações do fabricante, o material é classificado como cinza volante Classe C e atende aos requisitos de materiais pozolânicos prescritos na norma técnica NBR 12653 (ABNT, 2014).

5.2.1.4 Hidróxido de Sódio

Foi utilizado Hidróxido de Sódio (NaOH) comercial em flocos, com teor de pureza de 98%, para a produção da solução alcalina ativadora.

5.2.2 Métodos

Para ambos os solos, foram moldados corpos de prova na umidade ótima de compactação da energia Proctor Intermediária, visando à determinação da Deformação Permanente (DP), determinada segundo a norma EN 13286-7 (CEN, 2004). A deformação permanente foi determinada para as respectivas misturas ótimas solo-CV-EAEP-NaOH (álcali-ativadas) e solo-CV-EAEP (não ativadas), conforme definido no Capítulo 3 desta tese.

5.2.2.1 Especificidades do ensaio de Deformação Permanente segundo a norma EN 13286-7 (CEN, 2004)

A Tabela 5.1 apresenta os ensaios realizados nas amostras dos solos conforme o procedimento europeu EN 13286-7 (CEN, 2004). Em todos os ensaios, as amostras foram submetidas a quatro pares de tensões ($\sigma_3 \times \sigma_d$), ou seja, a quatro estágios, simulando condições de pequenos, médios e grandes níveis de carregamentos aos quais o material poderá ser submetido no pavimento, com solicitações de 10.000 pulsos de carga para cada par, totalizando uma sequência de 40.000 ciclos por ensaio realizado.

Tabela 5.1: Especificidades do ensaio de Deformação Permanente segundo a EN 13286-7 (CEN, 2004)

Ensaio	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	N (ciclos)
1	40	40	10.000
	40	80	
	40	120	
	40	160	
	80	80	
2	80	120	
	80	240	
	80	320	
	120	120	
3	120	240	
	120	360	
	120	480	

5.2.2.2 Análise de Deformação Permanente segundo a Teoria do Shakedown

Com o objetivo de promover uma avaliação representativa do desempenho mecânico das misturas quanto ao comportamento de deformação plástica, os materiais foram classificados segundo a Teoria do Shakedown. Para essa análise, adotaram-se as duas abordagens descritas abaixo:

- Aplicação das inequações propostas por Werkmeister *et al.* (2001), atualmente incorporadas à norma europeia EN 13286-7 (CEN, 2004), conforme abaixo:

- Faixa A:

$$\Delta \varepsilon_{ap,5000} - \Delta \varepsilon_{ap,3000} < 4,5 \times 10^{-5}$$

- Faixa B:

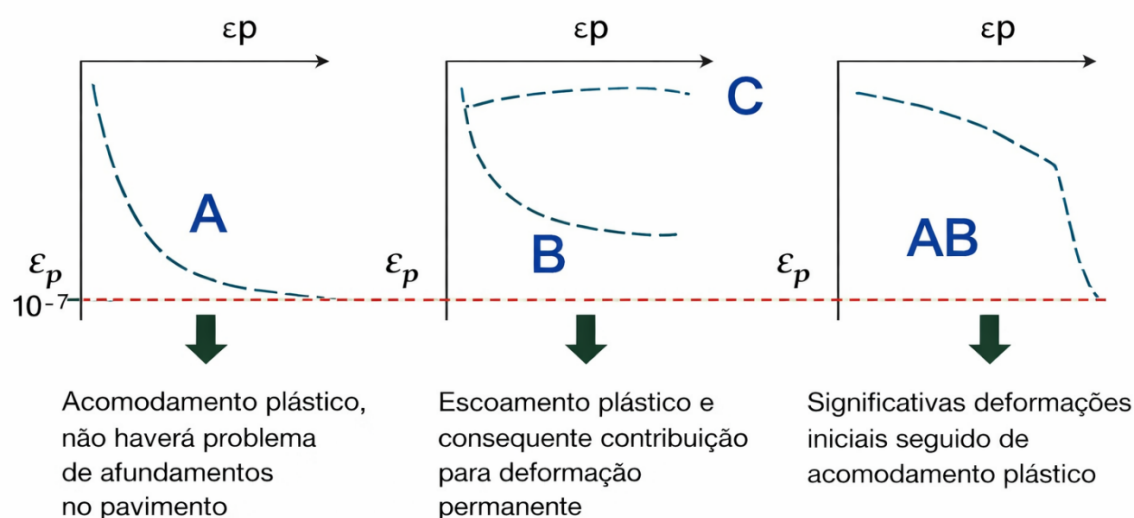
$$4,5 \times 10^{-5} < \Delta \varepsilon_{ap,5000} - \Delta \varepsilon_{ap,3000} < 4,0 \times 10^{-4}$$

- Faixa C:

$$\Delta \varepsilon_{ap,5000} - \Delta \varepsilon_{ap,3000} > 4,0 \times 10^{-4}$$

- b) Classificação gráfica conforme a norma brasileira DNIT 179-ME (DNIT, 2018), que estabelece a definição dos regimes de Shakedown por meio de análise visual dos gráficos da taxa de crescimento da deformação permanente em função da deformação acumulada, conforme ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1: Classificação gráfica conforme a norma brasileira DNIT 179-ME



Fonte: Adaptado de DNIT 179-ME (DNIT, 2018)

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.3.1 Solo VS

5.3.1.1 Ensaio de DP

As Tabelas 5.2 e 5.3 apresenta os valores da DP total após a primeira carga (ε_1), bem como os dados de até 6.000 (ε_{6000}) e 10.000 ciclos (ε_{10000}) acumulados no ensaio. Além disso,

essa tabela mostra o acúmulo de deformação irreversível até 60% das cargas aplicadas (ϵ_1 - ϵ_{6000}) e no período de carregamento entre 6.000 e 10.000 ciclos (ϵ_{6000} - ϵ_{10000}). Observa-se que o acúmulo total de DP se concentrou em todos os ensaios realizados nas primeiras 6.000 aplicações de carga, com o acúmulo de DP, comparativamente a 100% da carga aplicada, acima de 80%, mostrando que, após esse período, as misturas tendem a se estabilizar.

Tabela 5.2: Síntese dos dados experimentais obtidos nos ensaios de DP: misturas com solo VS

	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	ϵ_1 (mm)	ϵ_{6000} (mm)	ϵ_{10000} (mm)	ϵ_1 - ϵ_{6000} (%)	ϵ_{6000} - ϵ_{10000} (%)
VS COM NAOH - 0 DIAS	40	40	0,11	0,19	0,20	96,24	3,76
	40	80	0,22	0,47	0,49	97,64	2,36
	40	120	0,51	0,53	0,54	98,60	1,40
	40	160	0,57	0,69	0,69	98,88	1,12
	80	80	0,10	0,21	0,22	95,80	4,20
	80	120	0,29	0,38	0,38	97,66	2,34
	80	240	0,54	0,68	0,69	98,44	1,56
	80	320	0,74	0,81	0,81	100,00	0,00
	120	120	0,45	0,49	0,49	98,94	1,06
	120	240	0,61	0,68	0,69	98,81	1,19
	120	360	0,73	0,74	0,74	100,00	0,00
	120	480	0,88	1,02	1,02	100,00	0,00
VS COM NAOH -7 DIAS	40	40	-0,02	-0,04	0,00	-	-
	40	80	0,23	0,45	0,47	94,61	5,39
	40	120	0,52	0,64	0,66	97,00	3,00
	40	160	0,73	0,74	0,74	99,54	0,46
	80	80	0,40	0,51	0,51	98,95	1,05
	80	120	0,57	0,66	0,68	97,55	2,45
	80	240	0,76	0,92	0,93	98,65	1,35
	80	320	1,02	1,21	1,22	99,03	0,97
	120	120	0,30	0,42	0,44	95,69	4,31
	120	240	0,52	0,64	0,66	97,33	2,67
	120	360	0,72	0,83	0,85	97,76	2,24
	120	480	0,92	1,01	1,03	97,76	2,24
VS COM NAOH -28 DIAS	40	40	0,00	0,10	0,12	87,84	12,16
	40	80	0,09	0,15	0,16	92,67	7,33
	40	120	0,17	0,32	0,34	95,35	4,65
	40	160	0,34	0,39	0,40	98,45	1,55
	80	80	0,15	0,21	0,21	96,83	3,17
	80	120	0,26	0,32	0,33	97,15	2,85
	80	240	0,41	0,52	0,53	97,45	2,55
	80	320	0,59	0,65	0,67	96,92	3,08
	120	120	0,13	0,16	0,17	98,07	1,93
	120	240	0,22	0,24	0,24	98,26	1,74
	120	360	0,29	0,40	0,41	96,14	3,86
	120	480	0,46	0,55	0,55	99,89	0,11

Tabela 5.3: Síntese dos dados experimentais obtidos nos ensaios de DP: misturas com solo VS (continuação)

VS SEM NAOH - 0 DIAS	40	40	0,02	1,39	1,45	96,38	3,62
	40	80	1,59	1,74	1,89	92,31	7,69
	40	120	1,99	2,03	2,05	98,92	1,08
	40	160	2,39	3,31	3,62	91,18	8,82
	80	80	0,23	0,34	0,36	95,64	4,36
	80	240	2,48	3,70	3,75	98,59	1,41
	80	320	4,61	7,65	7,65	100,00	0,00
	120	120	1,90	2,02	2,04	99,01	0,99
	120	240	3,17	4,08	4,14	98,51	1,49
	120	360	5,55	6,66	6,78	98,23	1,77
VS SEM NAOH - 7 DIAS	120	480	8,44	11,12	11,20	99,30	0,70
	40	40	0,07	0,24	0,26	93,21	6,79
	40	80	0,63	0,67	0,68	98,00	2,00
	40	120	1,22	1,76	1,80	97,83	2,17
	40	160	2,05	2,31	2,36	97,91	2,09
	80	80	0,99	1,25	1,27	98,38	1,62
	80	120	1,59	1,84	1,87	98,06	1,94
	80	240	2,82	3,46	3,52	98,14	1,86
	80	320	3,74	4,16	4,24	98,02	1,98
	120	120	0,68	0,95	0,98	97,02	2,98
	120	240	1,66	2,10	2,16	97,01	2,99
	120	360	2,73	3,33	3,43	97,15	2,85
VS SEM NAOH - 28 DIAS	120	480	3,95	4,94	5,08	97,28	2,72
	40	40	0,06	0,21	0,22	95,12	4,88
	40	80	0,32	0,37	0,37	99,46	0,54
	40	120	0,42	0,82	0,95	86,65	13,35
	40	160	1,09	1,93	2,09	92,60	7,40
	80	80	0,95	1,24	1,26	97,93	2,07
	80	120	1,42	1,57	1,59	98,30	1,70
	80	240	2,46	3,00	3,06	98,15	1,85
	80	320	3,34	3,76	3,83	98,12	1,88
	120	120	1,62	1,90	1,92	98,77	1,23
	120	240	2,66	3,04	3,08	98,63	1,37
	120	360	3,59	4,04	4,10	98,63	1,37
	120	480	4,49	4,83	4,83	100,00	0,00

Os resultados indicam que o acúmulo de deformação irreversível correspondente a 60% dos pulsos aplicados ($\varepsilon_1 - \varepsilon_{6000}$) evidencia a tendência de estabilização do afundamento da amostra de solo sob carregamento cíclico.

As Figuras 5.2 e 5.3 demonstram graficamente as curvas representativas do acúmulo da deformação axial permanente (ε_p) no transcorrer dos ensaios em função do número de ciclos de carga (N) aplicado e do par de tensões ($\sigma_3 \times \sigma_d$) atuante.

Figura 5.2: Resultados de DP da amostra VS-CV-EAEP-NaOH com (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura

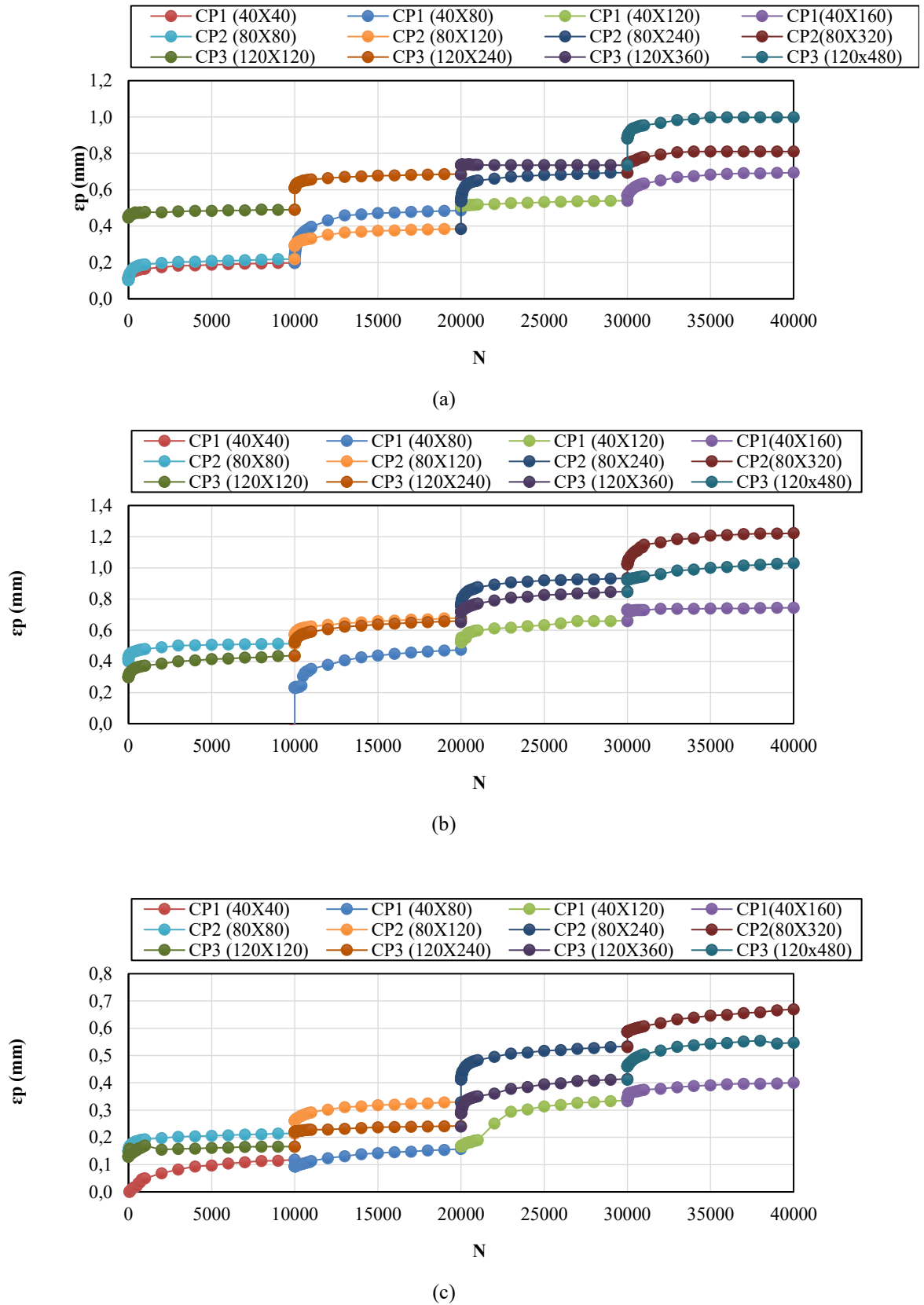
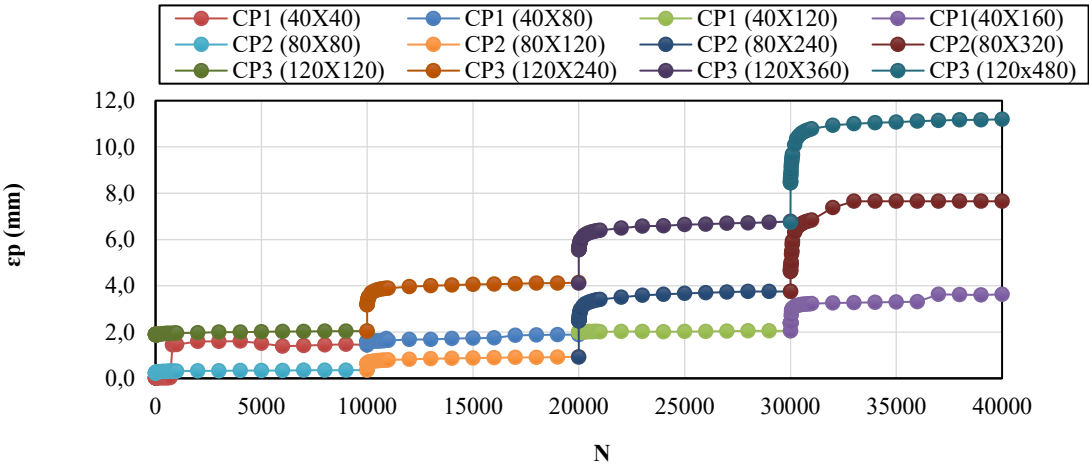
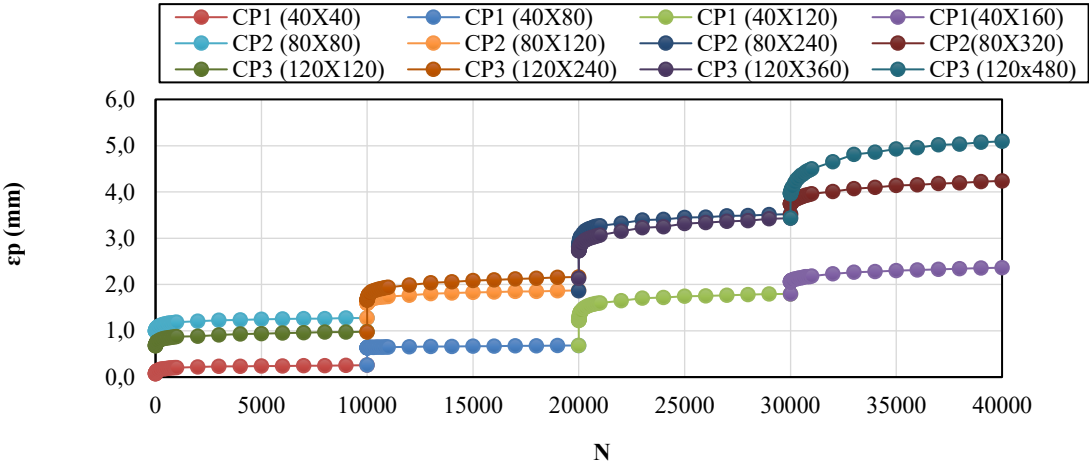


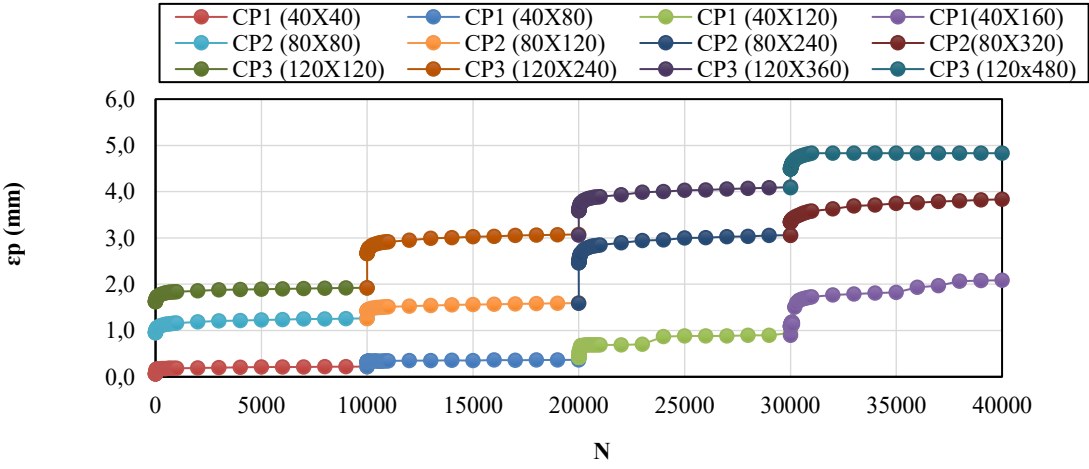
Figura 5.3: Resultados de DP da amostra VS-CV-EAEP com (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura



(a)



(b)



(c)

Observou-se que a ativação alcalina reduziu as deformações permanentes das misturas comparativamente as misturas não ativadas para todas as tensões aplicadas. No ensaio de deformação permanente (DP) da mistura VS ativada com NaOH, aos 7 e 28 dias de cura, foram registradas deformações axiais negativas no primeiro ciclo de carregamento. Segundo Bastos (2024), tais valores podem estar associados a alguma defasagem entre a aplicação de carga e o retorno das deformações elásticas obtidas. Panico e Fonseca (2016) verificaram em seus estudos que a deformação permanente volumétrica nas misturas solo-cimento investigadas, para baixas tensões de confinamento, tornava-se negativa, mostrando um comportamento dilatante. Segundo os autores, isso está de acordo com os princípios da Mecânica do Estado Crítico dos Solos, que preveem um comportamento frágil e dilatante para os corpos de prova sob baixa tensão confinante.

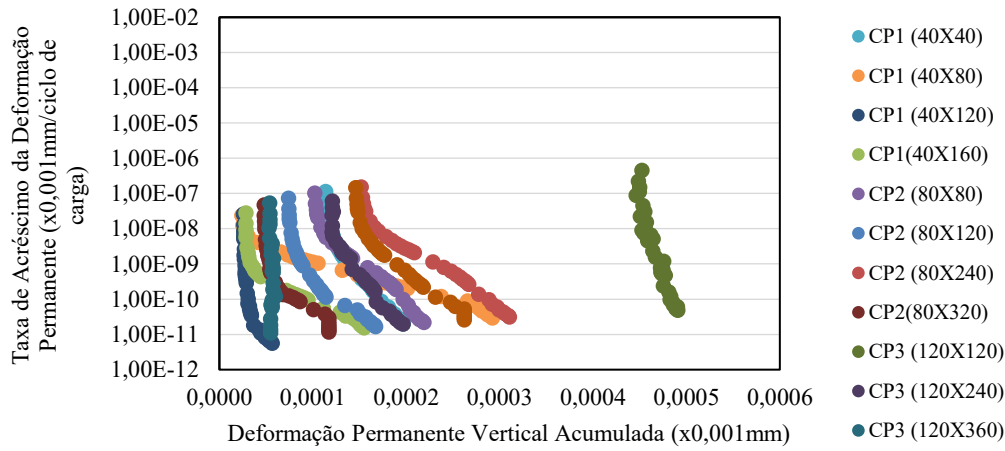
Os gráficos de evolução da deformação permanente evidenciam um comportamento em “escada”, característico da aplicação sequencial de diferentes estados de tensão no ensaio de deformação permanente em múltiplos estágios de tensão (DP-ME) (Cabral, 2021; Lima, 2020; Rahman *et al.*, 2022). Segundo Schreinert (2021), essa propriedade dos referidos gráficos ($\epsilon_p \times N$) reflete de forma mais realista a resposta plástica dos materiais em estruturas de pavimentos, as quais são submetidas a múltiplos níveis de tensões ao longo de sua vida útil.

A análise da evolução do acúmulo de deformação permanente ao longo dos diferentes estágios de carregamento evidencia um efeito pronunciado do histórico de tensões sobre a resposta do material em cada novo estágio, uma vez que as deformações previamente acumuladas condicionam o comportamento subsequente. Observou-se que determinados pares de tensões, como $\sigma_3 \times \sigma_d = 120 \text{ kPa} \times 360 \text{ kPa}$, que em ensaios de estágio único, nos quais a amostra é submetida a um único nível de tensão durante todo o ensaio, tendem a gerar elevado acúmulo de deformação permanente (Bastos, 2025; Lima *et al.*, 2025), apresentaram, no presente estudo, incrementos reduzidos em razão das deformações já acumuladas nos estágios anteriores (Schreinert, 2021).

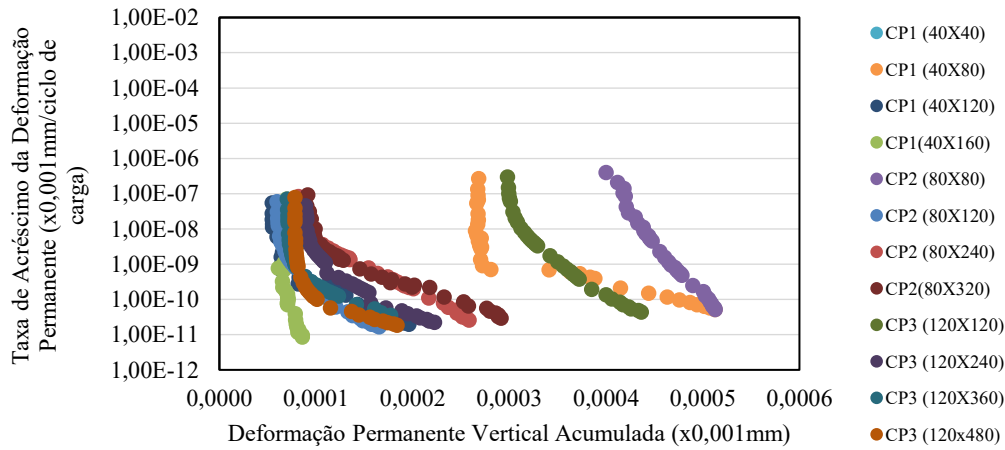
5.3.1.2 Análise da deformação permanente por meio da Teoria do Shakedown

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam os gráficos da taxa de acréscimo da deformação permanente.

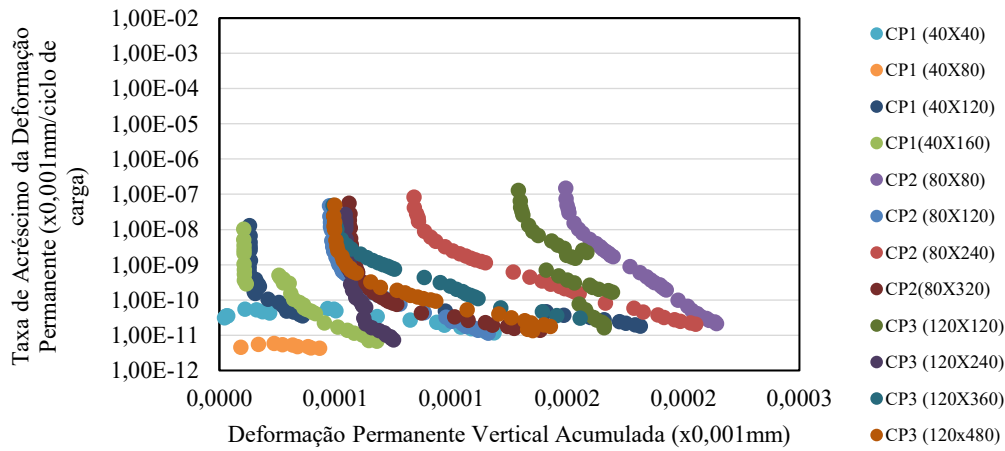
Figura 5.4: Variação da taxa de crescimento da DP pela deformação vertical acumulada para as misturas Solo VS-EAEP-CV-NaOH, para (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura



(a)

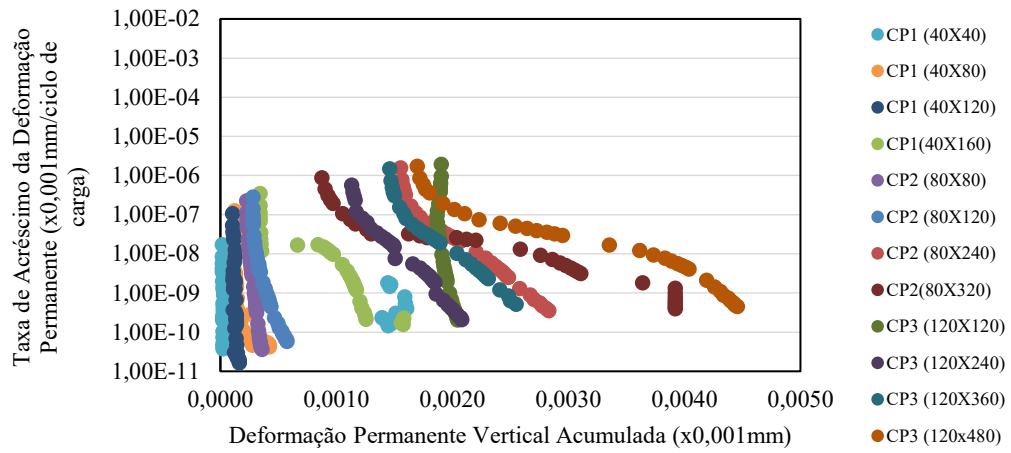


(b)

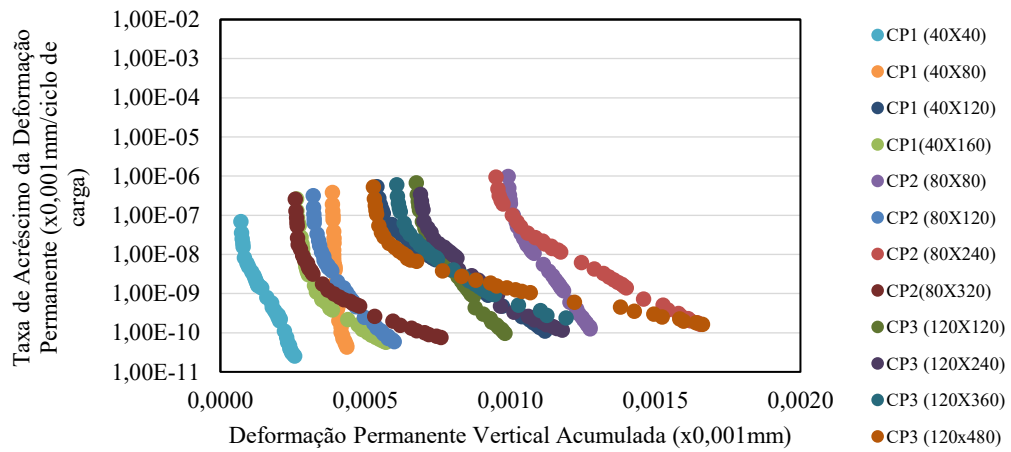


(c)

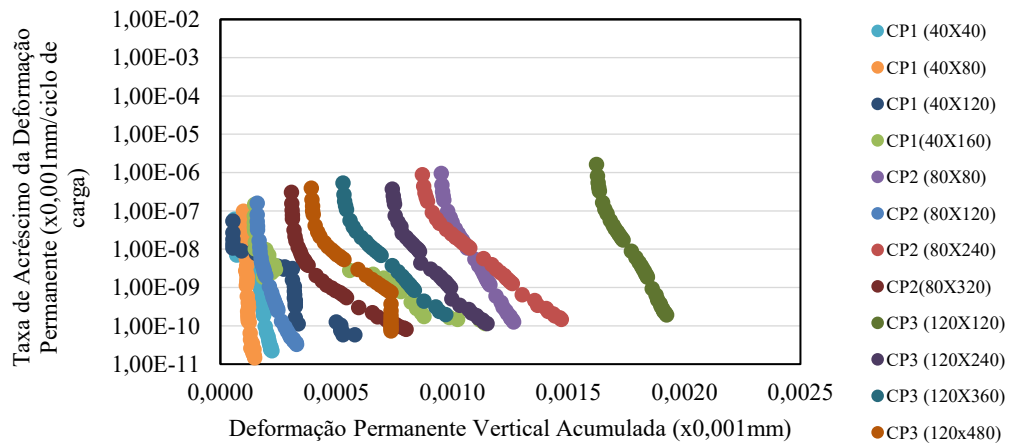
Figura 5.5: Variação da taxa de crescimento da DP pela deformação vertical acumulada para as misturas Solo VS-EAEP-CV, para (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura



(a)



(b)



(c)

As Tabelas 5.4 e 5.5 sintetizam o enquadramento das misturas nas regiões de comportamento segundo a Teoria do Shakedown, considerando as misturas avaliadas, a partir de duas abordagens distintas: Proposição A, que contempla as inequações propostas por Werkmeister *et al.* (2001), atualmente incorporadas à norma europeia EN 13286-7 (CEN, 2004); e Proposição B, cujo critério de Shakedown é estabelecido pelo DNIT 179 (2018), sendo a classificação realizada de forma visual, com base na identificação do comportamento que melhor representa cada mistura analisada.

Tabela 5.4: Síntese do enquadramento das misturas analisadas segundo a Teoria do Shakedown

	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	ε_{p3000} (mm)	ε_{p5000} (mm)	$\varepsilon_{p5000} - \varepsilon_{p3000}$ (mm)	Proposição A	Proposição B
VS COM NAOH - 0 DIAS	40	40	0,09	0,09	3,40E-05	A	B
	40	80	0,13	0,14	6,20E-05	B	B
	40	120	0,02	0,02	2,70E-05	A	B
	40	160	0,06	0,07	7,10E-05	B	B
	80	80	0,10	0,10	3,00E-05	A	A
	80	120	0,07	0,08	4,40E-05	A	B
	80	240	0,14	0,15	4,50E-05	B	B
	80	320	0,06	0,06	2,10E-05	A	B
	120	120	0,24	0,24	8,00E-06	A	A
	120	240	0,09	0,09	3,10E-05	A	A
	120	360	0,03	0,03	0,00E+00	A	A
	120	480	0,12	0,13	7,50E-05	B	B
VS COM NAOH -7 DIAS	40	40	-0,0333	-0,033	2,00E-06	A	A
	40	80	0,22	0,24	1,59E-04	B	B
	40	120	0,07	0,08	8,30E-05	B	B
	40	160	0,04	0,04	7,00E-06	A	A
	80	80	0,25	0,25	2,60E-05	A	A
	80	120	0,07	0,07	6,20E-05	B	B
	80	240	0,12	0,12	6,70E-05	B	B
	80	320	0,13	0,14	1,20E-04	B	B
	120	120	0,20	0,21	7,10E-05	B	B
	120	240	0,09	0,10	7,70E-05	B	B
	120	360	0,08	0,09	8,30E-05	B	B
	120	480	0,07	0,08	9,40E-05	B	B
VS COM NAOH -28 DIAS	40	40	0,04	0,05	7,40E-05	B	C
	40	80	0,01	0,01	5,20E-05	B	C
	40	120	0,07	0,08	9,50E-05	B	B
	40	160	0,03	0,03	3,50E-05	A	B
	80	80	0,10	0,10	2,10E-05	A	B
	80	120	0,05	0,05	3,60E-05	A	B
	80	240	0,09	0,09	5,20E-05	B	B
	80	320	0,05	0,06	6,60E-05	B	B
	120	120	0,08	0,08	1,70E-05	A	B
	120	240	0,03	0,04	2,70E-05	A	A
	120	360	0,07	0,08	8,10E-05	B	B
	120	480	0,46	0,55	8,48E-04	C	B

Tabela 5.5: Síntese do enquadramento das misturas analisadas segundo a Teoria do Shakedown
(Continuação)

	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	ϵp_{3000} (mm)	ϵp_{5000} (mm)	$\epsilon p_{5000} - \epsilon p_{3000}$ (mm)	Proposição A	Proposição B
VS SEM NAOH - 7 DIAS	40	40	0,11	0,12	4,20E-05	A	A
	40	80	0,21	0,21	2,90E-05	A	A
	40	120	0,51	0,53	1,95E-04	B	B
	40	160	0,24	0,25	1,66E-04	B	B
	80	80	0,61	0,62	9,60E-05	B	B
	80	120	0,26	0,28	1,33E-04	B	B
	80	240	0,76	0,79	2,66E-04	B	B
	80	320	0,30	0,33	3,22E-04	B	B
	120	120	0,45	0,47	1,46E-04	B	B
	120	240	0,53	0,56	2,48E-04	B	B
	120	360	0,55	0,60	4,43E-04	C	B
	120	480	0,69	0,75	5,74E-04	C	B
VS SEM NAOH - 0 DIAS	40	40	0,80	0,76	-4,19E-04	A	A
	40	80	0,11	0,14	2,70E-04	B	A
	40	120	0,07	0,07	3,10E-05	A	A
	40	160	0,61	0,62	1,48E-04	B	B
	80	80	0,16	0,17	4,30E-05	A	A
	80	120	0,25	0,26	1,71E-04	B	A
	80	240	1,34	1,38	4,18E-04	C	B
	80	320	1,96	1,96	0,00E+00	A	B
	120	120	1,00	1,01	1,13E-04	B	A
	120	240	0,98	1,01	2,68E-04	B	B
	120	360	1,24	1,27	3,33E-04	B	B
	120	480	2,13	2,17	3,90E-04	B	B
VS SEM NAOH - 28 DIAS	40	40	0,10	0,10	5,20E-05	B	A
	40	80	0,06	0,07	4,00E-06	A	A
	40	120	0,17	0,26	9,19E-04	C	B
	40	160	0,42	0,44	1,58E-04	B	B
	80	80	0,61	0,62	1,04E-04	B	B
	80	120	0,14	0,15	8,70E-05	B	A
	80	240	0,68	0,70	2,51E-04	B	B
	80	320	0,33	0,36	2,95E-04	B	B
	120	120	0,94	0,95	8,80E-05	B	B
	120	240	0,53	0,55	1,70E-04	B	B
	120	360	0,46	0,49	2,17E-04	B	B
	120	480	0,37	0,37	0,00E+00	A	B

Inicialmente, quanto às duas abordagens adotadas para a classificação do comportamento dos materiais, observou-se uma concordância parcial entre os métodos, uma vez que o enquadramento foi coincidente em 68% dos casos analisados. De modo geral, a classificação baseada nas inequações propostas por Werkmeister *et al.* (2001) mostrou-se mais conservadora, tendendo, nos casos de divergência, a enquadrar os materiais em faixas menos favoráveis à aplicação em pavimentação. Por sua vez, conforme apontado por Lima *et al.* (2025), o procedimento estabelecido pela DNIT 179 (2018) tende a produzir

classificações mais compatíveis com o comportamento efetivamente observado, possivelmente em razão de se tratar de uma análise de caráter mais específico para cada material e para cada estado de tensões aplicado.

Em relação aos enquadramentos segundo a Proposição B, verificou-se que, para as misturas não ativadas, a resposta plástica dos materiais foi classificada na região A, isto é, abaixo do limite de Shakedown plástico, em 30,56% dos casos. Em 69,44% das situações, o comportamento foi enquadrado na região B, caracterizada por valores superiores ao limite de Shakedown plástico, porém ainda inferiores ao limite de fluência plástica, o que demanda análise mais criteriosa quanto à viabilidade de aplicação em pavimentação.

Para as misturas ativadas, a resposta plástica foi classificada na região A em 22,22% dos casos, enquanto em 72,22% observou-se enquadramento na região B. Em 5,56% das situações, ocorreu o denominado colapso incremental, característico da região C, associado a níveis de tensão superiores ao limite de fluência plástica.

Ressalta-se que, em materiais de comportamento mais frágil, o carregamento cíclico pode induzir acúmulo progressivo de deformação plástica, mesmo quando os valores absolutos de deformação são reduzidos. A falha cíclica, nesses casos, tende a se iniciar por danos microscópicos localizados em regiões de concentração de tensões, os quais evoluem incrementalmente a cada ciclo até a ocorrência de ruptura (Sarem *et al.*, 2025). Assim, embora os materiais estabilizados por ativação alcalina tenham apresentado baixos valores de deformação permanente, a análise segundo a Teoria do Shakedown indicou, em alguns casos, critérios compatíveis com colapso incremental.

Essa interpretação é consistente com os resultados reportados por Bastos (2024) e Rios *et al.* (2022), os quais destacam que materiais estabilizados por ligantes, em função de sua elevada rigidez, tendem a apresentar deformações iniciais reduzidas, mas podem manifestar, em longo prazo, acúmulo progressivo de deformação permanente associado à degradação das ligações cimentícias sob carregamentos cíclicos.

5.3.2 Solo BR

5.3.2.1 Ensaio DP

As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os valores da DP total após a primeira carga (ϵ_1), bem como os dados de até 6.000 (ϵ_{6000}) e 10.000 ciclos (ϵ_{10000}) acumulados no ensaio. Além disso, essa tabela mostra o acúmulo de deformação irreversível até 60% das cargas aplicadas (ϵ_1 - ϵ_{6000}) e no período de carregamento entre 6.000 e 10.000 (ϵ_{6000} - ϵ_{10000}).

Tabela 5.6: Síntese dos dados experimentais obtidos nos ensaios de DP: misturas com solo BR

	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	ε_1 (mm)	ε_{6000} (mm)	ε_{10000} (mm)	$\varepsilon_{6000}-\varepsilon_{10000}$ (%)	$\varepsilon_{6000}-\varepsilon_{10000}$ (%)
BR COM NAOH - 0 DIAS	40	40	0,03	0,08	0,10	82,88	17,12
	40	80	0,29	0,60	0,62	96,68	3,32
	40	120	0,68	0,93	0,96	96,88	3,12
	40	160	1,01	1,22	1,23	99,12	0,88
	80	80	0,13	0,26	0,27	95,38	4,62
	80	120	0,32	0,41	0,42	96,50	3,50
	80	240	0,52	0,67	0,70	96,75	3,25
	80	320	0,75	0,86	0,89	96,83	3,17
	120	120	0,48	0,76	0,76	100,00	0,00
	120	240	0,88	1,09	1,12	97,44	2,56
	120	360	1,19	1,36	1,41	96,83	3,17
	120	480	1,50	1,67	1,73	96,55	3,45
BR COM NAOH - 7 DIAS	40	40	0,02	0,09	0,11	88,43	11,57
	40	80	0,06	0,22	0,22	100,00	0,00
	40	120	0,28	0,37	0,38	95,53	4,47
	40	160	0,44	0,49	0,51	96,53	3,47
	80	80	0,15	0,23	0,25	92,93	7,07
	80	120	0,39	0,45	0,46	97,18	2,82
	80	240	0,52	0,67	0,67	100,00	0,00
	80	320	0,82	0,94	0,96	97,61	2,39
	120	120	0,51	0,69	0,71	97,40	2,60
	120	240	0,82	1,05	1,06	98,70	1,30
	120	360	1,16	1,39	1,43	97,56	2,44
	120	480	1,51	1,63	1,68	96,94	3,06
BR COM NAOH - 28 DIAS	40	40	0,06	0,21	0,22	93,96	6,04
	40	80	0,04	0,47	0,49	97,54	2,46
	40	120	0,50	0,58	0,60	96,49	3,51
	40	160	0,65	0,74	0,77	96,31	3,69
	80	80	0,23	0,32	0,34	94,20	5,80
	80	120	0,58	0,67	0,69	97,10	2,90
	80	240	0,91	1,19	1,22	97,94	2,06
	80	320	1,35	1,48	1,52	97,99	2,01
	120	120	0,25	0,40	0,41	96,07	3,93
	120	240	0,58	0,78	0,80	97,84	2,16
	120	360	0,92	1,08	1,10	97,98	2,02
	120	480	1,18	1,31	1,34	98,14	1,86

Tabela 5.7: Síntese dos dados experimentais obtidos nos ensaios de DP: misturas com solo BR (continuação)

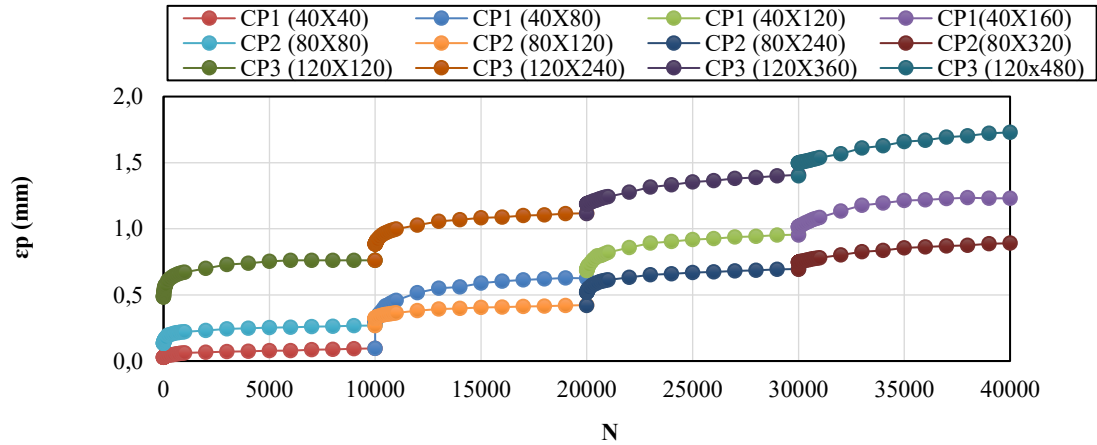
	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	ε_1 (mm)	ε_{6000} (mm)	ε_{10000} (mm)	$\varepsilon_{6000}-\varepsilon_{10000}$ (%)	$\varepsilon_{6000}-\varepsilon_{10000}$ (%)
BR SEM NAOH - 0 DIAS	40	40	0,07	0,19	0,19	96,60	3,40
	40	80	0,05	0,43	0,43	99,08	0,92
	40	120	0,47	0,62	0,63	98,59	1,41
	40	160	0,67	0,75	0,76	97,99	2,01
	80	80	0,13	0,21	0,23	94,42	5,58
	80	120	0,32	0,38	0,40	97,02	2,98
	80	240	0,55	0,69	0,70	98,43	1,57
	80	320	0,78	0,94	0,94	100,00	0,00
	120	120	0,27	0,37	0,38	96,27	3,73
	120	240	0,49	0,70	0,70	100,00	0,00
	120	360	0,82	1,87	1,87	100,00	0,00
	120	480	1,95	2,50	2,53	98,81	1,19
BR SEM NAOH - 7 DIAS	40	40	0,14	0,28	0,29	96,80	3,20
	40	80	0,52	0,80	0,81	98,41	1,59
	40	120	0,87	1,23	1,25	98,75	1,25
	40	160	1,29	1,56	1,59	98,30	1,70
	80	80	0,13	0,15	0,16	95,27	4,73
	80	120	0,22	0,25	0,26	96,39	3,61
	80	240	0,47	0,70	0,71	98,08	1,92
	80	320	0,78	0,95	-	-	-
	120	120	0,34	0,44	0,45	97,39	2,61
	120	240	0,67	0,92	0,94	98,29	1,71
	120	360	1,00	1,43	1,45	98,29	1,71
	120	480	1,52	1,96	1,98	98,75	1,25
BR SEM NAOH - 28 DIAS	40	40	0,40	0,43	0,44	98,81	1,19
	40	80	0,45	0,48	0,49	97,94	2,06
	40	120	0,60	0,63	0,65	96,60	3,40
	40	160	0,70	0,87	0,89	98,11	1,89
	80	80	0,41	0,51	0,52	96,87	3,13
	80	120	0,58	0,67	0,69	97,58	2,42
	80	240	0,92	1,09	1,11	98,29	1,71
	80	320	1,17	1,31	1,32	98,58	1,42
	120	120	0,45	0,51	0,53	95,45	4,55
	120	240	0,62	0,70	0,71	98,85	1,15
	120	360	0,79	0,87	0,89	98,13	1,87
	120	480	0,94	1,04	1,06	97,84	2,16

Os resultados indicam, de forma semelhante ao observado para as misturas com o solo VS, que o acúmulo de deformação irreversível correspondente a 60% dos pulsos aplicados ($\varepsilon_1 - \varepsilon_{6000}$) evidencia a estabilização do afundamento da amostra de solo sob carregamento cíclico. As Figuras 5.6 e 5.7 demonstram graficamente as curvas representativas do acúmulo da

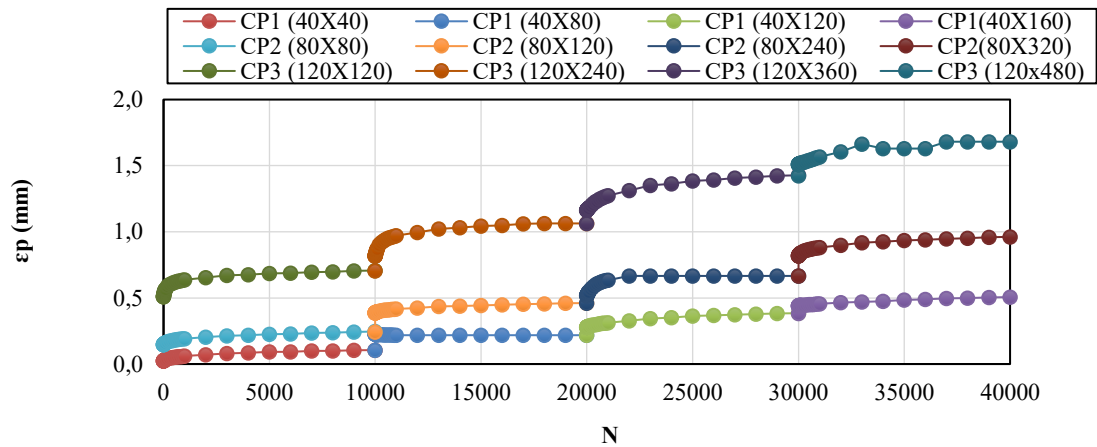
deformação axial permanente (ϵ_p) no transcorrer dos ensaios em função do número de ciclos de carga (N) aplicado e do par de tensões ($\sigma_3 \times \sigma_d$) atuante.

Figura 5.6: Resultados de DP da amostra BR-CV-EAEP-NaOH com (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e

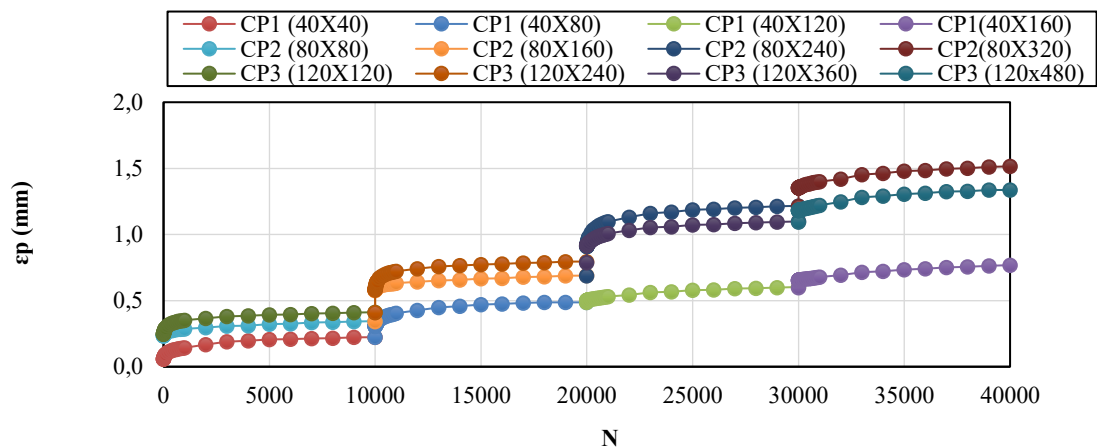
(c) 28 dias de cura



(a)

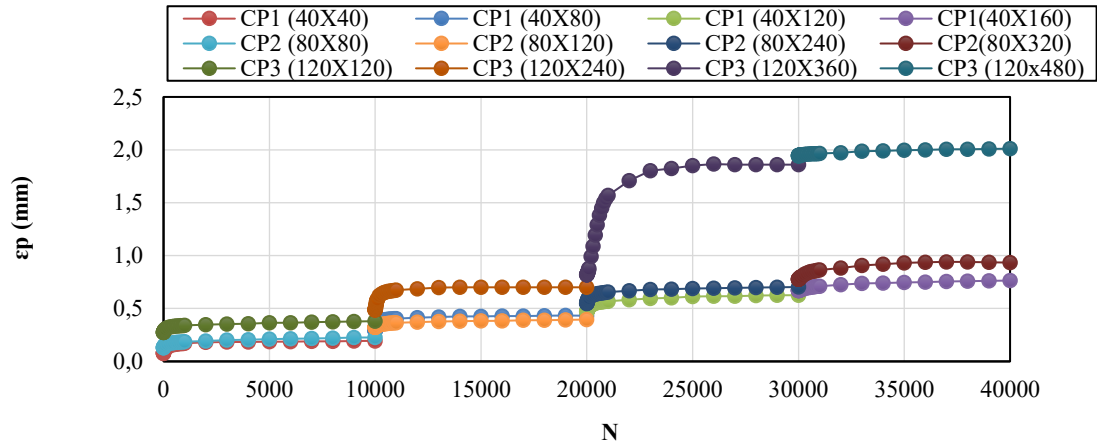


(b)

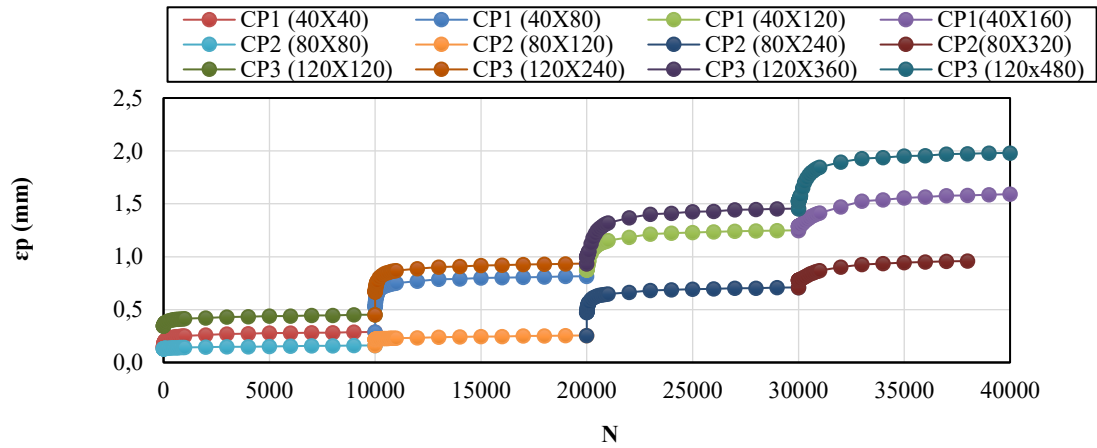


(c)

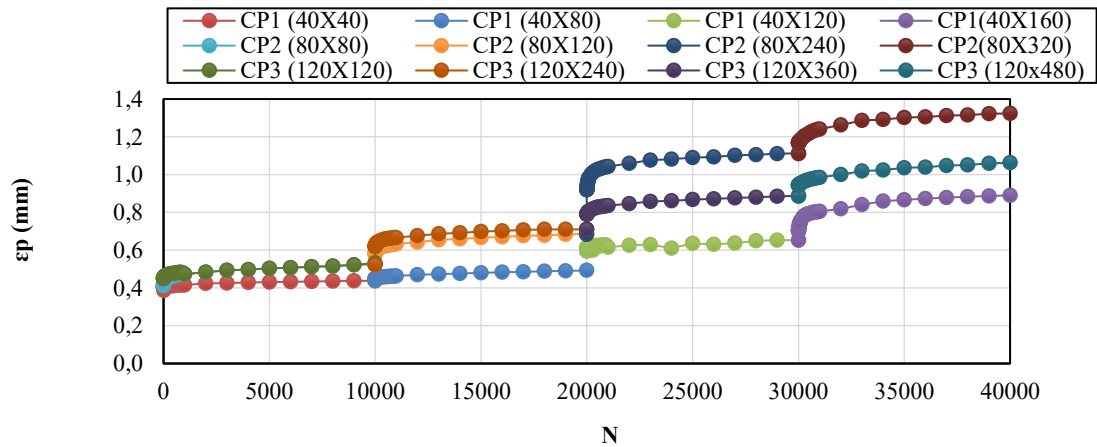
Figura 5.7: Resultados de DP da amostra BR-CV-EAEP com (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura



(a)



(b)



(c)

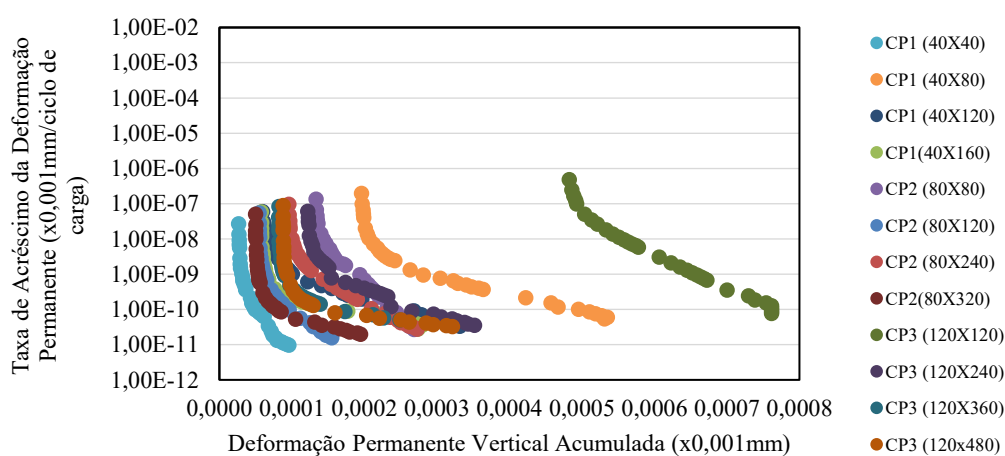
Observou-se que a ativação alcalina promoveu redução das deformações permanentes das misturas aos 0 e 7 dias de cura. Contudo, aos 28 dias de cura e para o par de tensões $\sigma_3 \times \sigma_d = 120 \text{ kPa} \times 480 \text{ kPa}$, essa tendência não se confirmou, sendo registrada deformação permanente acumulada de 1,06 mm, para a mistura não ativada, e de 1,34 mm, para a mistura ativada. Ressalta-se que a magnitude da redução de deformação permanente foi inferior à observada para as misturas com solo VS. Esse comportamento pode ser atribuído às características do solo VS, de natureza mais arenosa e com maior índice de vazios, que favorecem a maior redução da deformação permanente em função da formação de uma microestrutura mais densa e compacta, associada à presença de material granular fino proveniente da escória de aciaria elétrica primária e da cinza volante ativadas (Zhang *et al.*, 2022).

De forma semelhante ao observado para o solo VS, os gráficos de evolução da deformação permanente evidenciam o comportamento em “escada”, característico da aplicação sequencial de diferentes estados de tensões no ensaio DP-ME (Cabral, 2021; Lima, 2020; Rahman *et al.*, 2022). Conforme Schreinert (2021), essa representação ($\epsilon_p \times N$) reflete a resposta plástica dos materiais em condições mais representativas da realidade estrutural dos pavimentos, os quais são submetidos a múltiplos níveis de tensões ao longo de sua vida útil.

5.3.2.2 Análise da deformação permanente por meio da Teoria de Shakedown

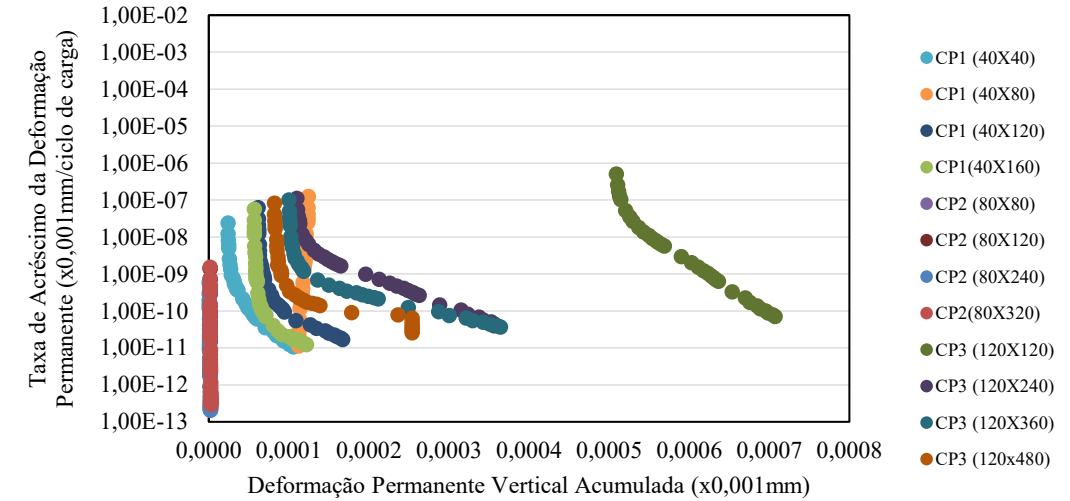
As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam os gráficos da taxa de acréscimo da deformação permanente.

Figura 5.8: Variação da taxa de crescimento da DP pela deformação vertical acumulada para as misturas Solo BR-EAEP-CV-NaOH, para (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura

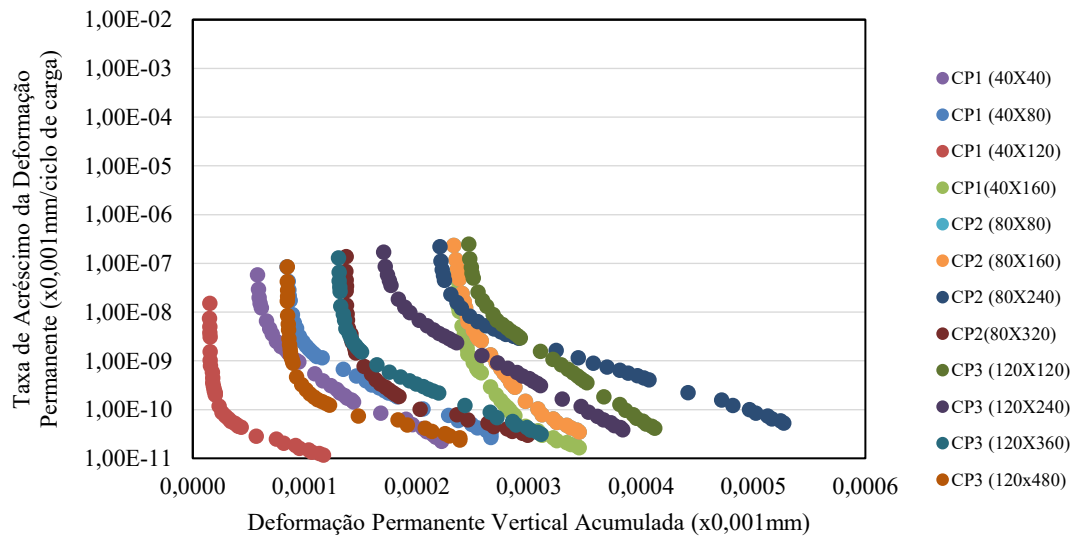


(a)

Figura 5.9: Variação da taxa de crescimento da DP pela deformação vertical acumulada para as misturas Solo BR-EAEP-CV-NaOH, para (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura (continuação)

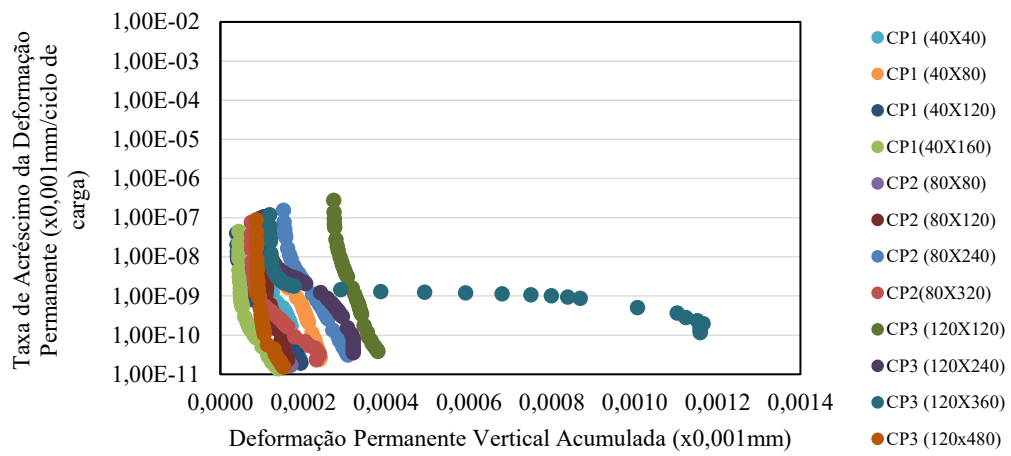


(b)

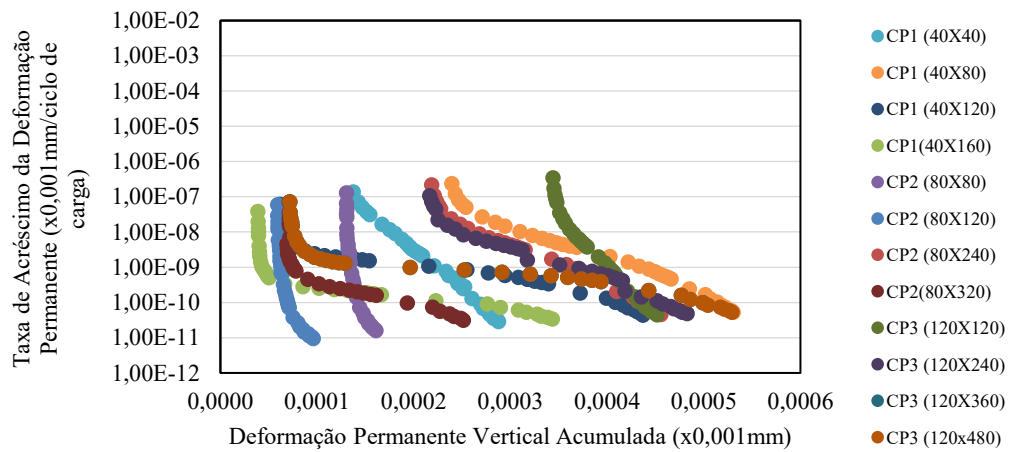


(c)

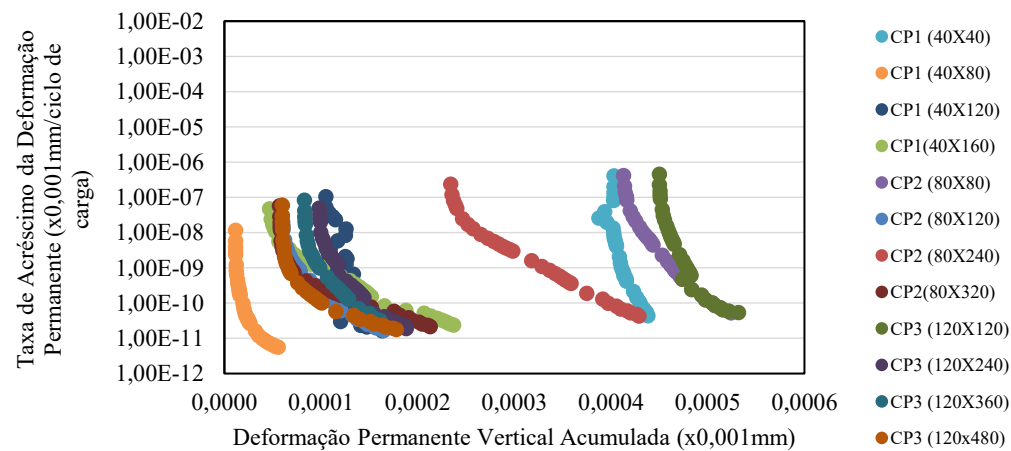
Figura 5.10: Variação da taxa de crescimento da DP pela deformação vertical acumulada para as misturas Solo BR-EAEP-CV, para (a) 0 dias de cura, (b) 7 dias de cura e (c) 28 dias de cura



(a)



(b)



(c)

As Tabela 5.8 e 5.9 sintetizam o enquadramento das misturas nas regiões de comportamento segundo a Teoria do Shakedown, considerando as misturas avaliadas, a partir de duas abordagens distintas: Proposição A, que contempla as inequações propostas por Werkmeister *et al.* (2001), atualmente incorporadas à norma europeia EN 13286-7 (CEN, 2004); e Proposição B, cujo critério de Shakedown é estabelecido pelo DNIT 179 (2018), sendo a classificação realizada de forma visual, com base na identificação do comportamento que melhor representa cada mistura analisada.

Tabela 5.8: Síntese do enquadramento das misturas analisadas segundo a Teoria do Shakedown

	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	ε_{p3000} (mm)	ε_{p5000} (mm)	$\varepsilon_{p5000} - \varepsilon_{p3000}$ (mm)	Proposição A	Proposição B
BR COM NAOH - 0 DIAS	40	40	0,04	0,04	3,00E-05	A	B
	40	80	0,23	0,25	1,90E-04	B	B
	40	120	0,13	0,15	1,30E-04	B	B
	40	160	0,11	0,13	1,85E-04	B	B
	80	80	0,12	0,13	4,40E-05	A	B
	80	120	0,06	0,07	6,10E-05	B	B
	80	240	0,11	0,12	8,60E-05	B	B
	80	320	0,07	0,08	1,35E-04	B	B
	120	120	0,36	0,38	1,20E-04	B	B
	120	240	0,15	0,16	1,28E-04	B	B
	120	360	0,11	0,12	1,86E-04	B	B
	120	480	0,10	0,13	2,35E-04	B	B
BR COM NAOH - 7 DIAS	40	40	0,04	0,05	5,30E-05	B	B
	40	80	0,06	0,06	-2,26E-06	A	A
	40	120	0,06	0,07	9,40E-05	B	B
	40	160	0,04	0,05	7,30E-05	B	B
	80	80	0,00	0,00	5,80E-07	A	A
	80	120	0,00	0,00	4,60E-07	A	A
	80	240	0,00	0,00	0,00E+00	A	A
	80	320	0,00	0,00	8,60E-07	A	A
	120	120	0,34	0,34	7,40E-05	B	B
	120	240	0,16	0,17	1,11E-04	B	B
	120	360	0,14	0,16	1,71E-04	B	B
	120	480	0,12	0,13	8,70E-05	B	B
BR COM NAOH - 28 DIAS	40	40	0,10	0,10	7,50E-05	B	B
	40	40	0,10	0,10	7,50E-05	B	B
	40	80	0,11	0,12	1,03E-04	B	B
	40	120	0,04	0,05	8,60E-05	B	B

Tabela 5.9: Síntese do enquadramento das misturas analisadas segundo a Teoria do Shakedown
(continuação)

	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	ϵ_{p3000} (mm)	ϵ_{p5000} (mm)	$\epsilon_{p5000} - \epsilon_{p3000}$ (mm)	Proposição A	Proposição B
BR COM NAOH - 28 DIAS	80	80	0,15	0,16	6,80E-05	B	B
	80	120	0,15	0,16	6,80E-05	B	B
	80	240	0,24	0,25	1,24E-04	B	B
	80	320	0,12	0,13	1,38E-04	B	B
	120	120	0,19	0,20	5,90E-05	B	B
	120	240	0,17	0,18	7,20E-05	B	B
	120	360	0,13	0,14	1,00E-04	B	B
	120	480	0,09	0,10	1,21E-04	B	B
BR SEM NAOH - 0 DIAS	40	40	0,09	0,09	1,70E-05	A	A
	40	80	0,11	0,12	3,20E-05	A	A
	40	120	0,08	0,09	9,30E-05	B	B
	40	160	0,06	0,06	4,40E-05	A	A
	80	80	0,10	0,11	4,30E-05	A	A
	80	120	0,08	0,08	2,30E-05	A	A
	80	240	0,14	0,15	5,30E-05	B	B
	80	320	0,10	0,11	1,25E-04	B	B
	120	120	0,18	0,18	4,60E-05	B	A
	120	240	0,16	0,16	1,80E-05	A	B
	120	360	0,55	0,58	2,46E-04	B	B
	120	480	0,06	0,07	3,50E-05	A	A
BR SEM NAOH - 7 DIAS	40	40	0,13	0,14	4,00E-05	A	A
	40	80	0,25	0,26	6,10E-05	B	B
	40	120	0,20	0,21	8,70E-05	B	B
	40	160	0,14	0,15	1,61E-04	B	B
	80	80	0,07	0,08	2,30E-05	A	A
	80	120	0,04	0,04	2,70E-05	A	A
	80	240	0,21	0,22	6,00E-05	B	B
	80	320	0,11	0,12	8,70E-05	B	B
	120	120	0,21	0,22	4,20E-05	A	A
	120	240	0,23	0,23	7,10E-05	B	B
	120	360	0,24	0,25	1,12E-04	B	B
	120	480	0,24	0,25	1,12E-04	B	B
BR SEM NAOH - 28 DIAS	40	40	0,21	0,22	2,10E-05	A	A
	40	80	0,02	0,02	3,50E-05	A	A
	40	120	0,07	0,07	3,10E-05	A	B
	40	160	0,09	0,11	1,29E-04	B	B
	80	80	0,25	0,25	5,40E-05	B	B
	80	120	0,07	0,07	6,20E-05	B	B
	80	240	0,20	0,20	7,10E-05	B	B
	80	320	0,09	0,10	7,60E-05	B	B
	120	120	0,25	0,25	5,40E-05	B	B
	120	240	0,08	0,09	5,90E-05	B	B
	120	360	0,08	0,08	5,40E-05	B	B
	120	480	0,07	0,08	8,30E-05	B	B

Primeiramente, com relação às duas abordagens adotadas, evidenciou-se uma significativa aderência entre ambas na classificação dos solos desta pesquisa, tendo em vista que o enquadramento foi equivalente somente em 92% dos casos.

Em relação aos enquadramentos considerando a Proposição B como referência, verificou-se que, para as misturas não ativadas, a resposta plástica dos materiais foi classificada na região A, isto é, abaixo do limite de Shakedown plástico, em 63,89% dos casos. Em 36,11% das situações, o comportamento foi enquadrado na região B, caracterizada por valores superiores ao limite de Shakedown plástico, porém ainda inferiores ao limite de fluência plástica, o que demanda análise mais criteriosa quanto à viabilidade de aplicação em pavimentação.

Para as misturas ativadas, a resposta plástica foi classificada na região A em 13,89% dos casos, indicando uma tendência marcante de estabilização ou acomodação no acúmulo de deformação permanente para as misturas com solo BR ativadas. Em 86,11% das situações, observou-se enquadramento na região B. Não foram registradas ocorrências de colapso incremental, característico da região C.

Destaca-se, ainda, que as misturas dos dois solos apresentaram respostas distintas quanto ao comportamento de deformação plástica, o que indica a influência das características físico-mineralógicas do solo e da interação solo–ligante no desempenho mecânico e na estabilidade sob carregamentos cíclicos.

5.3.3 Discussões finais

Ao avaliar os resultados das misturas estabilizadas por ativação alcalina, observa-se que seu comportamento sob carregamento cíclico é semelhante ao de solos estabilizados com cimento. Estudos conduzidos por Viana da Fonseca *et al.* (2013), Panico e Fonseca (2016) e Bastos (2024) indicam que as taxas de deformação permanente em misturas cimentadas são, em geral, reduzidas, comportamento compatível com os resultados obtidos na presente pesquisa.

Nesse contexto, Panico e Fonseca (2016), ao investigarem misturas cimentadas sob baixos níveis de confinamento, observaram que, em corpos de prova cimentados, a deformação plástica evolui lentamente nos ciclos iniciais e passa a crescer de forma mais acentuada após determinado número de ciclos, evidenciando que, enquanto as ligações cimentantes permanecem íntegras, a estrutura do solo se mantém praticamente inalterada; a

partir da degradação dessas ligações, a deformação plástica passa a se desenvolver predominantemente na matriz granular.

Resultados semelhantes são reportados por Rios *et al.* (2022), que demonstraram que, em corpos de prova cimentados, a deformação permanente acumulada permanece muito reduzida durante os primeiros 10.000 ciclos, aumentando de forma mais expressiva após esse limite. Em contrapartida, nos corpos de prova não cimentados, observa-se acúmulo significativo de deformação permanente nos estágios iniciais do ensaio, com tendência à estabilização após, aproximadamente, 1.000 ciclos. Segundo os autores, esses resultados indicam que, para materiais não estabilizados com ligante, a classificação à luz da Teoria do Shakedown pode ser realizada com número limitado de ciclos, conforme preconizado pela norma europeia. Entretanto, para materiais cimentados, a aplicação direta desses critérios normativos não é plenamente adequada, uma vez que não representa o comportamento de longo prazo, o qual é fortemente influenciado pela degradação progressiva da cimentação.

Nesse contexto, considerando que a resposta à deformação plástica das misturas submetidas à ativação alcalina é semelhante à observada em misturas estabilizadas com cimento, infere-se que a avaliação adequada do comportamento segundo a Teoria do Shakedown deve contemplar a possibilidade de aumento progressivo das deformações permanentes acumuladas ao longo do carregamento cíclico a partir de ensaios de DP de longa duração, com elevado número de ciclos.

5.4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos no presente programa experimental de pesquisa, conclui-se que:

- Os ensaios cíclicos demonstraram que a ativação alcalina é eficaz para reduzir a deformação permanente (DP) das misturas, em comparação às misturas não ativadas, em praticamente todos os níveis de tensão e idades de cura avaliados. Observou-se que o acúmulo total de DP se concentrou, majoritariamente, até cerca de 6.000 ciclos, indicando tendência de estabilização do afundamento sob carregamento repetido e comportamento compatível com materiais de maior rigidez e maior integridade estrutural da matriz estabilizada;
- A resposta à DP foi fortemente dependente do tipo de solo, evidenciando que a natureza granulométrica e a estrutura inicial controlam o ganho promovido pela

ativação alcalina. No solo VS (mais arenoso), a redução de DP foi mais pronunciada, sugerindo que a combinação EAEP–CV favorece a densificação física (preenchimento de vazios) e a consolidação da matriz, resultando em maior estabilidade sob carregamentos elevados;

- A avaliação pela Teoria do Shakedown indicou que misturas álcali-ativadas, apesar de apresentarem baixos valores absolutos de DP, podem exibir regimes de resposta plástica menos favoráveis em determinadas combinações de tensão, inclusive com ocorrência pontual de colapso incremental. Esse resultado sugere que, para materiais ligados/estabilizados (como os álcali-ativados), protocolos limitados a 10.000 ciclos (EN 13286-7/DNIT 179) podem não capturar plenamente mecanismos de degradação progressiva das ligações sob carregamento repetido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANU, J.; KRISHNAN, J. M.; ROBINSON, R. G. Mechanical response of cement-stabilized pond ash during repeated loading based on shakedown concept. *International Journal of Geomechanics*, v. 24, n. 3, art. 04024010, 2024. DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-7516.

ANUPAM, A. K.; KUMAR, P.; RANSINCHUNG, R. N. G. D. Effect of fly ash and rice husk ash on permanent deformation behaviour of subgrade soil under cyclic triaxial loading. *Transportation Research Procedia*, v. 17, p. 596–606, 2016. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.11.114.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: materiais pozolânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BASTOS, S. D. V. *Estudo do comportamento mecanístico-empírico de materiais alternativos e cimentícios em camadas de pavimentos*. 2024. 310 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

CABRAL, W. S. *Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da microrregião de Mossoró/RN*. 2021. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION). EN 13286-7: cyclic load triaxial test for unbound mixtures. Brussels: European Standard, 2004.

CHEN, J. S.; LIN, C. H.; STEIN, E.; HOTHAN, J. Development of a mechanistic-empirical model to characterize rutting in flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering*, v. 130, n. 4, p. 519–525, 2004.

CHEN, W. B. *et al.* Characterization of permanent axial strain of granular materials subjected to cyclic loading based on shakedown theory. *Construction and Building Materials*, v. 198, p. 751–761, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.012.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. *Anuário CNT do Transporte: estatísticas consolidadas*. Brasília, 2025. : <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2025/File/PrincipaisDados.pdf>.

DAWSON, A.; KOLISOJA, P. Permanent deformation. Report on Task, v. 2, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). PRO 003/94: coleta de amostras deformadas de solo. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). PRO 199/96: redução de amostras de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro: DNER, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 179/2018-IE: pavimentação – solos – determinação da deformação permanente – instrução de ensaio. Brasília: DNIT, 2018.

FRANCO, F. A. C. P. *MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional: manual de utilização*. Versão 1.0.0. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

GUIMARÃES, A. C. R. *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

HUA, J.; WHITE, T. A study of nonlinear tire contact pressure effects on HMA rutting. *International Journal of Geomechanics*, v. 2, n. 3, p. 353–376, 2002.

HUANG, Y. H. *Pavement analysis and design*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

JAYAKODY, S.; ZIMAR, A. M. Z.; RANAWEERA, R. A. L. M. Potential use of recycled construction and demolition waste aggregates for non-structural concrete applications. 2018.

KIM, H. C. *et al.* Mechanical response of nickel-titanium instruments with different cross-sectional designs during shaping of simulated curved canals. *International Endodontic Journal*, v. 42, n. 7, p. 593–602, 2009.

LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. State of the art. I: resilient response of unbound aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, v. 126, n. 1, p. 66–75, 2000.

LI, D.; SELIG, E. T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 122, n. 12, p. 1006–1013, 1996.

LIMA, C. D. A. *Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas*. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; ARAGÃO, F. T. S. Ensaio de deformação permanente: efeito do número de ciclos na interpretação do comportamento de solos e britas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 3, e13044, 2021. DOI: 10.1590/S1517-707620210003.13044.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; GUIMARÃES, A. C. R.; MOTA, B. C.; ARAGÃO, T. S. Investigation of the deformability of sandy soils for pavement layers under repeated load triaxial tests. *Construction and Building Materials*, v. 477, p. 141367, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141367.

MEDINA, J. de. *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.

MOTTA, L. M. G. *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critérios de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas*. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

NORBACK, C. *Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de duas misturas solo-brita*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

OLIVEIRA, M. G. M. *et al.* Melhoramento de solo com resíduos da construção civil reforçado com fibras de polipropileno. *ELECS*, Vitória, 2011.

OMRANI, M. A.; MODARRES, A. Emulsified cold recycled mixtures using cement kiln dust and coal waste ash: mechanical and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, v. 199, p. 101–111, 2018.

OZER, I.; SOYER-UZUN, S. Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin-based geopolymers with different molar Si/Al ratios. *Ceramics International*, v. 41, n. 8, p. 10192–10198, 2015. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.04.125.

PANICO, F.; FONSECA, A. V. da. Long-term cyclic response of a soil-cement mixture: experimental study and modelling. *Procedia Engineering*, v. 143, p. 178–186, 2016.

QIAN, J.; WANG, Y.; LIN, Z. *et al.* Dynamic shakedown analysis of flexible pavement under traffic moving loading. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION GEOTECHNICS (ICTG), 3., 2016, Guimarães. *Proceedings...* Guimarães, 2016.

RAHMAN, M. S. Characterising the deformation behaviour of unbound granular materials in pavement structures. 2015. PhD Thesis – KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015.

RAHMAN, M. S.; ERLINGSSON, S.; AHMED, A. Modelling the permanent deformation of unbound granular materials in pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 2022. DOI: 10.1080/14680629.2022.2108883.

RENJITH, R.; *et al.* Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction. *Journal of Cleaner Production*, v. 294, p. 126264, 2021.

RIOS, S.; PANICO, F.; VIANA DA FONSECA, A. Comportamento cíclico e dinâmico de uma areia siltosa artificialmente cimentada = Cyclic and dynamic behaviour of an artificially cemented silty sand. *Geotecnia*, Lisboa, n. 155, p. 29–52, jul. 2022. DOI: 10.14195/2184-8394_155_2.

SAREM, M.; DERESSE, N. E.; VERSTRYNGE, E.; FRANÇOIS, S. Phase-field modeling of cyclic behavior in quasi-brittle materials: a micromechanics-based approach. *arXiv preprint*, v. 2511.11838, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2511.11838.

SCHREINERT, G. G. *Estudo do comportamento mecânico de solos residuais*. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SEVERO, C. G. S. *et al.* Características dos materiais ativados alcalinamente. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 8, n. 2, p. 55–67, 2013.

VIANA DA FONSECA, A.; RIOS, S.; AMARAL, M.; PANICO, F. Fatigue cyclic tests on artificially cemented soil. *Geotechnical Testing Journal*, v. 36, n. 2, p. 227–235, 2013. DOI: 10.1520/GTJ20120113.

VIEIRA, G. L. *et al.* Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, v. 271, p. 122665, 2020.

WERKMEISTER, S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions. 2003. PhD Thesis – Dresden University of Technology, Dresden, 2003.

WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1757, p. 75–81, 2001.

ZHANG, J.-J.; LI, B.; YU, C.; ZHANG, M.-Y. Mechanical properties of slag–fly ash based geopolymer stabilized sandy soil. *Rock and Soil Mechanics*, v. 43, n. 9, p. 2421–2430, 2022. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.6925.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os objetivos desta pesquisa, verificou-se que a ativação alcalina promoveu melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos solos tropicais avaliados, evidenciando seu potencial como técnica de estabilização para aplicação em camadas de pavimentos. A utilização de cinza volante e escória de aciaria elétrica primária, associadas ao hidróxido de sódio, mostrou-se eficaz, além de configurar uma alternativa técnica que favorece o aproveitamento de resíduos industriais e contribui para a redução dos impactos ambientais relacionados ao seu descarte.

Foi possível propor um protocolo de dosagem estatística fundamentado no planejamento experimental Box-Behnken, capaz de otimizar, simultaneamente, múltiplas propriedades de engenharia relevantes ao desempenho de pavimentos, como a Resistência à Compressão Simples, o Índice de Suporte Califórnia e o Módulo de Resiliência.

Observou-se que a eficácia da estabilização por ativação alcalina é fortemente influenciada pelo tipo de solo e por suas características físicas e mineralógicas. Observou-se que o tempo de cura também exerce influência direta no desempenho mecânico das misturas ativadas, sendo registrados ganhos progressivos de Módulo de Resiliência, Índice de Suporte Califórnia e Resistência ao Cisalhamento, associados ao avanço das reações de dissolução, policondensação e formação de géis cimentícios.

As caracterizações química, mineralógica e microestrutural realizadas permitiram diferenciar os mecanismos associados à ativação alcalina daqueles decorrentes exclusivamente da hidratação das misturas solo-CV-EAEP, confirmando que a presença do ativador potencializa a formação de produtos do tipo NASH e CASH, responsáveis pela consolidação da matriz e pelo aumento da rigidez do material.

A avaliação à luz da Teoria do Shakedown indicou que, embora as misturas álcali-ativadas apresentem baixos valores absolutos de deformação permanente, podem ocorrer regimes de resposta plástica menos favoráveis sob determinadas combinações de tensão, incluindo episódios pontuais de colapso incremental. Esse resultado sugere que protocolos baseados em um número limitado de ciclos podem não capturar integralmente mecanismos progressivos de degradação das ligações cimentantes, evidenciando a necessidade de abordagens experimentais mais abrangentes para materiais estabilizados por ativação alcalina.

Por fim, confirma-se o potencial da ativação alcalina na estabilização de solos tropicais para aplicação em pavimentação, com o emprego de hidróxido de sódio como ativador e de

cinza volante e escória de aciaria elétrica primária como precursores. De maneira geral, os resultados demonstram que a técnica constitui uma alternativa tecnicamente eficiente para a estabilização de solos visando a utilização em camadas de pavimentos.