

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Comportamento mecânico de misturas solo-escória de aciaria com inclusão de geossintético

Emanuel Bomtempo Matos
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

EMANUEL BOMTEMPO MATOS

Comportamento mecânico de misturas solo-escória de aciaria com inclusão de geossintético

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

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

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

T

M433c
2025
Matos, Emanuel Bomtempo, 1991-
Comportamento mecânico de misturas solo-escória de
aciaria com inclusão de geossintético / Emanuel Bomtempo
Matos. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (73 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2025.

Referências bibliográficas: f. 63-73.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.732>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Engenharia geotécnica. 2. Materiais de construção -
Testes. 3. Escória (Metalurgia) - Reaproveitamento. I. Pitanga,
Heraldo Nunes, 1973-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 624.15136

EMANUEL BOMTEMPO MATOS

Comportamento mecânico de misturas solo-escória de aciaria com inclusão de geossintético

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

APROVADA: 9 de julho de 2025.

Assentimento:

Emanuel Bomtempo Matos
Autor

Heraldo Nunes Pitanga
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 31/10/2025 às 21:25:04 e pelo orientador em 01/11/2025 às 09:27:09. 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 **2JAT.IGCE.WDIZ** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

A Deus, pela sabedoria e saúde, para que pudesse encerrar essa jornada.

A Heraldo Nunes Pitanga, meu orientador, por toda atenção e cuidado, sempre me guiando pelo melhor caminho.

A meu coorientador, Klaus Henrique de Paula Rodrigues, por toda ajuda a mim dedicada neste período.

A meu coorientador, Jefferson Lins da Silva, por toda sua contribuição a este trabalho.

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

Aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil da UFV, especialmente ao Giovani, por toda paciência e boa vontade.

Aos estagiários que estiveram comigo durante esta pesquisa.

A meus pais, Cláudio e Silvana, por todo o carinho, paciência e por toda a ajuda para que esse sonho pudesse se realizar.

A minhas irmãs, Elisa e Érica, pela ajuda e incentivo aos estudos.

A minha namorada, Laíza, por todo apoio nas horas de estudos e pesquisas e por toda sua contribuição.

A todos os colegas da UFV que ficarão para sempre na memória.

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).

RESUMO

MATOS, Emanuel Bomtempo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2025. **Comportamento mecânico de misturas solo-escória de aciaria com inclusão de geossintético.** Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.

A crescente demanda por soluções sustentáveis na engenharia civil impulsiona o reaproveitamento de resíduos industriais, como a escória de aciaria elétrica primária (EAEP), em substituição parcial de materiais convencionais. Paralelamente, os geossintéticos vêm sendo amplamente utilizados como elementos de reforço em obras geotécnicas. No entanto, são escassos os estudos que avaliam a ação combinada entre estabilização química por resíduos siderúrgicos e reforço mecânico por geossintéticos. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo central avaliar o efeito da inserção de um geotêxtil de baixa resistência à tração nas propriedades mecânicas de solos compactados com teor de EAEP, visando ampliar o conhecimento sobre seu desempenho em obras de terra. Objetivos específicos incluíram a realização de uma revisão sistemática da literatura, a análise da influência da granulometria e do tempo de cura, bem como a caracterização microestrutural das misturas. Os resultados indicaram que o tempo de cura foi decisivo para o ganho de resistência das misturas solo-escória, especialmente no solo argiloso (S1), que apresentou ganhos até os 7 dias, com leve redução aos 28 dias, enquanto o solo arenoso (S2) demonstrou crescimento contínuo de resistência. A inserção do geotêxtil aumentou a resistência à compressão, sobretudo no solo arenoso (ganho de 31,9% aos 28 dias). Contudo, no ensaio CBR, o reforço geossintético não promoveu melhorias significativas, e nos ensaios de módulo de resiliência o desempenho com geossintético foi, em alguns casos, inferior. Conclui-se que a combinação de EAEP com solos apresenta potencial promissor para aplicações geotécnicas, sobretudo pelo ganho de resistência com o tempo de cura. Entretanto, a eficácia do reforço geossintético mostrou-se limitada, apontando a necessidade de estudos futuros que possam aprofundar a compreensão da interação solo-escória-geossintético.

Palavras-chave: estabilização de solos; escória de aciaria elétrica primária; misturas solo-resíduos siderúrgicos; geossintéticos

ABSTRACT

MATOS, Emanuel Bomtempo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2025.
Mechanical behavior of soil-steel slag mixtures with inclusion of geosynthetic.
Adviser: Heraldo Nunes Pitanga.

The growing demand for sustainable solutions in civil engineering is driving the reuse of industrial waste, such as primary electric steelmaking slag (PESS), as a partial replacement for conventional materials. At the same time, geosynthetics have been widely used as reinforcement elements in geotechnical works. However, studies evaluating the combined action of chemical stabilization by steelmaking waste and mechanical reinforcement by geosynthetics are scarce. In this context, the main objective of this research was to evaluate the effect of inserting a low-tensile-strength geotextile on the mechanical properties of compacted soils with PESS content, aiming to expand knowledge about its performance in earthworks. Specific objectives included conducting a systematic literature review, analyzing the influence of particle size and curing time, and characterizing the microstructure of the mixtures. The results indicated that curing time was decisive for the strength gains of soil-slag mixtures, especially in clayey soil (S1), which showed gains up to 7 days, with a slight reduction at 28 days, while sandy soil (S2) demonstrated continuous strength growth. The insertion of geotextiles increased compressive strength, especially in sandy soil (31.9% gain at 28 days). However, in the CBR test, geosynthetic reinforcement did not promote significant improvements, and in the resilient modulus tests, the performance with geosynthetics was, in some cases, inferior. It is concluded that the combination of PESS with soils has promising potential for geotechnical applications, especially due to the strength gain with curing time. However, the effectiveness of geosynthetic reinforcement proved to be limited, highlighting the need for future studies to deepen the understanding of soil-slag-geosynthetic interactions.

Keywords: soil stabilization; primary electric steel mill slag; soil-steel residue mixtures; geosynthetics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma da pesquisa bibliográfica	16
Figura 2 - Jazidas de empréstimo dos solos utilizados na pesquisa: (a) solo S1 e (b) solo S2.	23
Figura 3 - Coleta da escória bruta.....	24
Figura 4 – Processo de preparação e armazenamento da escória moída	25
Figura 5 – Imagem em detalhe do geotêxtil	25
Figura 6 – Triângulo de pseudocomponentes	26
Figura 7 - Propriedades mecânicas e Expansão das misturas definidas no planejamento experimental para o solo S1	28
Figura 8 - Propriedades mecânicas e Expansão das misturas definidas no planejamento experimental para o solo S2	29
Figura 9 - Representação do processo de moldagem	32
Figura 10 – Disposição e tamanho do geotêxtil de reforço inserido nos CPs moldados.....	33
Figura 11 - Curvas granulométricas das amostras de solo S1 e S2	35
Figura 12 – Difratomogramas das amostras de solo S1 (a) e S2 (b) obtidos por DRX.....	35
Figura 13 – Micrografias da amostra de solo S1 obtidas por MEV: (a)x300; (b)x5000.....	36
Figura 14 - Micrografias da amostra de solo S2 obtidas por MEV: (a)x300; (b)x5000.....	36
Figura 15 – Curva granulométrica da amostra de EAEP moída.....	37
Figura 16 – DRX da amostra de EAEP moída	37
Figura 17 – Gráfico de variação da tensão resistente (RCNC média) em função do tempo de cura: solo argiloso (S1).....	41
Figura 18 – Difrátograma da mistura Solo S1 e EAEP aos 0, 7 e 28 dias de cura.....	42
Figura 19 - Gráfico de variação da tensão resistente (RCNC média) em função do tempo de cura: solo arenoso (S2)	44
Figura 20 - Difrátograma da mistura Solo S2 e EAEP aos 0, 7 e 28 dias de cura.....	45

Figura 21 - Gráfico comparativo das tensões médias dos solos S1 e S2 para o ensaio RCNC 46	
Figura 22 – Padrão de ruptura dos corpos de prova em 28 dias de cura para as amostras SE de solo S1 (a) e SE de solo S2.....	47
Figura 23 - Padrão de ruptura dos corpos de prova em 28 dias de cura para as amostras SE-GSY de solo S1 (a) e SE-GSY de solo S2.....	47
Figura 24 – Gráfico de variação do CBR médio em função do tempo de cura: solo argiloso (S1)	49
Figura 25 - Bulbo de tensões devido ao espraiamento de tensões no corpo de prova reforçado a meia altura.....	50
Figura 26 - Superfície do geotêxtil no corpo de prova de solo S1 (SE-GSY) aos 28 dias de cura	50
Figura 27 – Gráfico de variação do CBR médio em função do tempo de cura: solo arenoso (S2)	53
Figura 28 - Superfície do geotêxtil no corpo de prova de solo S2 (SE-GSY) aos 28 dias de cura	54
Figura 29 - Comparativo dos resultados do ensaio CBR entre os solos S1 e S2	55
Figura 30 – Gráfico de variação do MR em função do tempo de cura: solo argiloso (S1).....	56
Figura 31 – Gráfico de variação do MR em função do tempo de cura: solo arenoso (S2)	58
Figura 32 - Comparativo dos resultados do ensaio MR entre os solos S1 e S2	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Misturas solo-resíduos definidas no planejamento experimental.....	27
Tabela 2- Codificação dos corpos de prova moldados	31
Tabela 3 - Caracterização e classificação geotécnicas das amostras de solo analisadas	34
Tabela 4 - Composição química obtida por FRX e perda ao fogo das amostras de solos S1 e S2.....	35
Tabela 5 - Composição química e perda ao fogo de amostra de EAEP	38
Tabela 6 - Concentrações dos elementos nos extratos lixiviados.....	38
Tabela 7 - Concentrações dos elementos nos extratos solubilizados	38
Tabela 8 - Propriedades do geossintético Basetrac Woven PP25/25	39
Tabela 9 - Peso específico seco máximo e umidade ótima dos solos e da mistura utilizada ...	40
Tabela 10 – Resultados do ensaio de RCNC para o solo argiloso (S1).....	40
Tabela 11 – Resultados do ensaio de RCNC para o solo arenoso (S2).....	43
Tabela 12 – Resultados do ensaio CBR para o solo S1	48
Tabela 13 – Resultados do ensaio CBR para o solo arenoso (S2).....	51
Tabela 14 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) para o solo argiloso (S1)	56
Tabela 15 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) para o solo arenoso (S2).	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Lista de protocolos da pesquisa bibliográfica	17
Quadro 2 - Resultado dos protocolos de pesquisa.....	17
Quadro 3 - Artigos selecionados	18

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASCE	American Society of Civil Engineers
BOFS	Basic Oxygen Furnace Slag (Escória de Forno Básico de Oxigênio)
C-A-H	Aluminato de Cálcio Hidratado
C-A-S-H	Sílico-Aluminato de Cálcio Hidratado
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBR	California Bearing Ratio (Índice de Suporte Califórnia)
COVID	Coronavirus Disease
CP	Corpo de Prova
CV	Cinza Volante
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de Raios X
EAF	Electric Arc Furnace (Forno Elétrico a Arco)
EAEP	Escória de Aciaria Elétrica Primária
FRX	Fluorescência de Raios X
GM/MS	Gabinete do Ministro da Saúde/Mato Grosso do Sul
ISO	International Organization for Standardization
IAB	Instituto Aço Brasil
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LFS	Ladle Furnace Slag
MCT	Miniatura Compactada Tropical
ME	Método de Ensaio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
PF	Perda ao Fogo
RCNC	Resistência à Compressão Não Confinada
RTCD	Resistência à Tração por Compressão Diametral
TRB	Transportation Research Board

USC	Unified Soil Classification
W _{ot}	Umidade ótima
$\gamma_d^{máx}$	Peso específico seco máximo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização e justificativa da pesquisa	13
1.2	Objetivos.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	Protocolo de levantamento de dados bibliográficos	16
2.2	Revisão sistemática de literatura	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1	Materiais	23
3.1.1	Solos.....	23
3.1.2	Escória de aciaria elétrica primária (EAEP)	24
3.1.3	Geossintético.....	25
3.2	Métodos	25
3.2.1	Planejamento experimental.....	25
3.2.2	Ensaio de caracterização dos solos, EAEP e misturas solo-EAEP reforçadas por geossintético	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	Caracterização geotécnica, constituição mineralógica, análise química e caracterização microestrutural dos solos	34
4.2	Caracterização física, química, mineralógica, microestrutural e ambiental da EAEP ..	37
4.3	Caracterização do geossintético utilizado na pesquisa	39
4.4	Peso específico seco máximo e teor de umidade ótimo	39
4.5	Ensaio de Resistência à Compressão Não Confinada	40
4.5.1	Solo S1	40
4.5.2	Solo S2.....	43
4.5.3	Resultados comparativos de RCNC entre misturas com solo S1 e solo S2.....	45
4.6	Ensaio CBR	48
4.6.1	Solo S1	48
4.6.2	Solo S2.....	51
4.6.3	Resultados comparativos de CBR entre misturas com solo S1 e solo S2.....	55
4.7	Ensaio de Módulo de Resiliência	55
4.7.1	Solo S1	55
4.7.2	Solo S2.....	57
4.7.3	Resultados comparativos de MR entre misturas com solo S1 e solo S2	59
5	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e justificativa da pesquisa

A pandemia do Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) obrigou a indústria do aço a adequar sua produção aos níveis da redução da demanda, chegando, em abril de 2020, a operar com apenas 45% do total de sua capacidade instalada. No mesmo ano, o setor iniciou a reativação da produção e, a partir de junho, o setor passou a colocar no mercado interno mais do que havia sido comercializado em janeiro e fevereiro, antes da pandemia de COVID-19 (IAB, 2020).

Associada à retomada de crescimento da produção do aço, a geração de coprodutos e resíduos que, em 2018, foi de 619 quilogramas para cada tonelada de aço bruto produzido, em 2020, atingiu o valor de 622 quilogramas para cada tonelada de aço. Dentre os coprodutos e resíduos gerados em 2020, 40% correspondiam a agregados de alto-forno, 25% a agregados de aciaria, 6% a finos e pós, 4% às lamas e 25% a outros materiais (IAB, 2020).

Dados do quarto trimestre de 2024 indicam que a produção de aço no Brasil correspondeu a 60% da produção na América Latina, distribuindo a produção em 28,6% no Estado de Minas Gerais, 26% no Rio de Janeiro, 16,9% no Espírito Santo, 11,1% no Estado de São Paulo e 17,4% em outras regiões (IAB, 2024).

Dentre os principais desafios relacionados aos resíduos industriais está a sua destinação final, que frequentemente ocorre por meio do descarte em aterros, causando a ocupação de grandes áreas, risco de contaminação do solo e dos corpos hídricos, além da emissão de gases de efeito estufa, constituindo um passivo ambiental (Palod *et al.*, 2017; Naidu *et al.*, 2020). A transformação de resíduos em insumos para novos processos produtivos é uma das bases da economia circular, que visa romper com o modelo linear de produção e consumo, onde o reaproveitamento permite não apenas a mitigação de impactos ambientais, mas também a valorização econômica dos resíduos, conferindo-lhes nova funcionalidade (Cruz *et al.*, 2024; Silva, 2024; Lima, 2023).

Estudos recentes destacam a importância da reciclagem de sucata metálica como uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de CO₂ na produção de aço. Além da sucata, subprodutos, como escórias e pós de aciaria, têm sido objeto de pesquisas visando sua reutilização. A escória de alto-forno, por exemplo, pode ser empregada na produção de cimento, enquanto os pós de aciaria podem ser tratados para a recuperação de metais valiosos, como o zinco (Kieush *et al.*, 2024; Tillous *et al.*, 2023).

A escória de aciaria e a cinza volante, subprodutos gerados durante o processo de fabricação do aço, representam uma fração significativa dos resíduos industriais sólidos. Tradicionalmente consideradas um passivo ambiental (Pacheco, 2017; Stjepanović *et al.*, 2019), têm sido objeto de estudos que visam sua reutilização em diversas aplicações, como mostram pesquisas atuais, alinhando-se aos princípios da economia circular e da sustentabilidade industrial.

Uma das aplicações mais promissoras da escória de aciaria é na indústria da construção civil. Ren e Li (2023) destacam que a substituição parcial de agregados naturais por escória de aciaria em concretos resulta em aumento da resistência à compressão e à tração, além de melhor desempenho em ambientes agressivos. Loureiro *et al.* (2022) investigaram o uso combinado de escória de aço e agregados de concreto reciclado na pavimentação asfáltica, concluindo que essa combinação pode substituir materiais de pedra, contribuindo para a sustentabilidade da indústria de pavimentação.

A reutilização da escória de aciaria e cinza volante na estabilização de solos tem se mostrado uma alternativa eficiente, com benefícios tanto ambientais quanto técnicos. Estudos demonstram que a escória pode melhorar propriedades geotécnicas de solos, como a resistência à compressão e a capacidade de suporte, especialmente quando aplicada em solos expansivos (Gu *et al.*, 2023; Chaiyaput; Ayawanna, 2021). Além disso, a combinação de escória com cimento tem mostrado ótimos resultados na estabilização de solos silto-arenosos (Gu *et al.*, 2023) e argilosos (Parsaei *et al.*, 2021).

Particularmente nos cenários em que o aproveitamento dos resíduos siderúrgicos em mistura com solos não implica em propriedades de engenharia com magnitudes compatíveis com as mínimas exigidas nos respectivos projetos, a complementação do melhoramento das misturas solo-resíduos siderúrgicos pode ser realizada através da inserção de elementos de reforço, dentre os quais os geossintéticos podem ser destacados.

Os geossintéticos têm sido amplamente utilizados para reforçar solos moles, estabilizar taludes e melhorar fundações superficiais, especialmente em projetos de infraestrutura com solos de baixa capacidade de suporte (Cardoso, 2018). A inclusão de geogrelhas ou geotêxteis pode aumentar significativamente a resistência ao cisalhamento e a rigidez de solos (Li *et al.*, 2021), resultando em uma distribuição de carga mais uniforme (Strahl; Alexiew, 2019), reduzindo recalques e melhorando a durabilidade da estrutura (Li *et al.*, 2021).

Estudos mostram que a combinação de geogrelhas com resíduos melhora o desempenho dos solos. Em solos com cinzas volantes, houve aumento de adesão e ângulo de atrito, obtendo um comportamento mais dúctil (Sivakumar *et al.*, 2013). O uso de resíduos de borracha resultou

em maior capacidade de carga e recuperação elástica (Sharma; Sirdesai, 2014). Já a aplicação em areia reciclada elevou a resistência ao cisalhamento e a interação solo-reforço (Lopes *et al.*, 2024). Por fim, a aplicação em areia de fundição proporcionou ganhos de CBR (até 63%), comprovando a eficácia da técnica (Kumar; Kumar, 2025).

Não se tem conhecimento de pesquisas que envolvam a ação combinada da estabilização química promovida pelos resíduos siderúrgicos com o reforço proporcionado por geossintéticos quando tais materiais são simultaneamente aplicados aos solos, justificando técnica e cientificamente a presente pesquisa.

1.2 Objetivos

Considerando-se a necessidade técnica de viabilização do aproveitamento em grande escala de resíduos siderúrgicos como estabilizantes químicos de solos compactados e que tal viabilização pode ser comprometida pela eventual incapacidade dos resíduos de conferirem aos solos as melhorias almejadas, o objetivo principal desta pesquisa é de avaliar o efeito da inserção de um geotêxtil de baixa resistência à tração nas propriedades mecânicas de misturas de solos com resíduos siderúrgicos compactadas, visando a sua aplicação em obras de terra. Como objetivos secundários, visam-se:

- i) realizar uma revisão sistemática de literatura a fim de conhecer as bibliografias que tratam do assunto abordado nesta pesquisa;
- ii) avaliar as influências da granulometria do solo e do tempo de cura nas respostas mecânicas do produto de engenharia proposto (mistura solo-resíduos siderúrgicos-geossintético compactada);
- iii) elucidar, por meio de ensaios microestruturais, os resultados encontrados nos ensaios mecânicos realizados sobre a mistura proposta.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

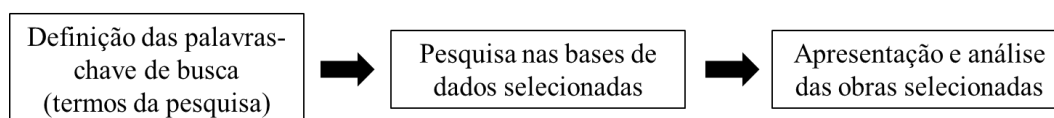
2.1 Protocolo de levantamento de dados bibliográficos

A revisão sistemática de literatura teve como objetivo analisar, de forma crítica e detalhada, os estudos e publicações relevantes sobre o tema principal abordado na pesquisa. Com a revisão sistemática, buscou-se identificar as principais contribuições, tendências e lacunas no conhecimento, além de fornecer um panorama atualizado e fundamentado dos avanços científicos pertinentes ao referido tema. Esse processo metodológico visou compreender o contexto teórico que sustenta o estudo, fornecendo embasamento para as análises e conclusões apresentadas ao longo da dissertação.

A intenção da pesquisa foi descrever as características da produção científica, tanto nacional quanto internacional, sobre o uso de geossintéticos em solos melhorados com escória de aciaria elétrica primária. O foco do estudo correspondeu ao levantamento dos artigos científicos resultante do protocolo de pesquisa bibliográfica.

Assim como Matos, Pinto e Silva (2022), o desenvolvimento da pesquisa bibliográfica ocorreu em três etapas. Na Figura 1, é apresentado o fluxograma deste processo de pesquisa.

Figura 1 - Fluxograma da pesquisa bibliográfica



A busca foi realizada em três bibliotecas eletrônicas consideradas renomadas, com ampla cobertura em diversas áreas científicas: *Web of Science (WoS)*, *Scopus* e *American Society of Civil Engineers Collection (ASCE Collection)*. Nelas, foram coletadas bibliografias de bibliotecas nacionais e internacionais, permitindo ampliar o escopo da pesquisa para estudos oriundos do Brasil e de outros países. As três bases de dados incluíram artigos em qualquer idioma, sem restrições temporais, desde que fossem de acesso aberto. Não houve limitação em relação à classificação WebQualis da CAPES.

A etapa de definição dos termos de pesquisa resultou em um conjunto de palavras, conforme apresentado no Quadro 1, e na busca avançada para a coleta de obras científicas. O operador "TS", utilizado na *Web of Science*, foi eficaz para capturar artigos que mencionaram os termos no título, resumo ou palavras-chave. Na base *Scopus*, assim como na *ASCE Collection*, o operador "ALL" foi empregado para encontrar os termos no título, resumo,

palavras-chave e no corpo do texto. A segunda etapa foi finalizada com a importação dos artigos selecionados, após a execução do processo de busca. O Quadro 1 informa os termos do protocolo de pesquisa utilizado.

Quadro 1 - Lista de protocolos da pesquisa bibliográfica

P1: #1 TS/ALL(Soil stabilization AND Electric arc furnace slag)
P2: #2 TS/ALL(Electric arc furnace slag AND geosynthetics)
P3: #2 TS/ALL(Electric arc furnace slag AND geosynthetics AND Soil stabilization)
Tempo estipulado: Todos os anos, <i>WoS</i> , <i>Scopus</i> e <i>ASCE Collection</i>

A partir dos critérios de busca do Quadro 1, foram encontrados 5 artigos científicos na primeira busca (P1) da *Web of Science*, 28 artigos na *Scopus* e 40 artigos na *ASCE Collection*, totalizando 73 documentos. Na segunda busca (P2), foram listados 1 artigo *Web of Science*, 1 artigo na base *Scopus* e nenhum artigo encontrado na base *ASCE Collection*. A terceira busca (P3) não encontrou resultados em nenhuma das três bases pesquisadas. Após a seleção inicial, foi feita a leitura dos artigos selecionados e excluídos 45 artigos que fugiam do escopo da busca ou que estavam repetidos, totalizando 29 artigos como objeto de análise desta pesquisa. O processo de busca, bem como de seleção e exclusão, é apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Resultado dos protocolos de pesquisa

Primeira busca (P1)	Segunda busca (P2)	Terceira busca (P3)
<i>Web of Science</i>	<i>Web of Science</i>	<i>Web of Science</i>
Cinco (5) artigos selecionados na busca	Um (1) artigo selecionado na busca	Nenhum artigo selecionado na busca
Sem exclusão de artigos	Sem exclusão de artigos	Nenhum artigo selecionado na busca
Cinco (5) artigos foram lidos integralmente	Um (1) artigo foi lido integralmente	Nenhum artigo selecionado na busca
<i>Scopus</i>	<i>Scopus</i>	<i>Scopus</i>
Vinte e oito (28) artigos selecionados na busca	Um (1) artigo selecionado na busca	Nenhum artigo selecionado na busca
Exclusão de quatorze (14) artigos que fugiam ao escopo da busca	Exclusão de um (1) artigo	Nenhum artigo selecionado na busca
Quatorze (14) artigos foram lidos integralmente	Nenhum artigo foi lido	Nenhum artigo selecionado na busca
<i>ASCE Collection</i>	<i>ASCE Collection</i>	<i>ASCE Collection</i>
Quarenta (40) artigos selecionados na busca	Nenhum artigo selecionado na busca	Nenhum artigo selecionado na busca
Exclusão de trinta e um (31) artigos que fugiam ao escopo da busca	Nenhum artigo selecionado na busca	Nenhum artigo selecionado na busca
Nove (9) artigos foram lidos integralmente	Nenhum artigo selecionado na busca	Nenhum artigo selecionado na busca

Os artigos selecionados, após o procedimento de análise, são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Artigos selecionados

Autor	Título	Base de dados	Periódico	Ano de Publicação
Chaiyaput; Ayawanna; Manandhar	Utilization of Waste Material for Stabilization of Lateritic Soil	WoS	Sustainable Construction Resources in Geotechnical Engineering	2023
Pho; Ghazireh; Ghataora	Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines	WoS	Journal of Materials in Civil Engineering	2006
Chaiyaput; Ayawanna	Lateritic Soil Stabilization by Addition of Steel Slags	WoS	Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA	2021
Rodrigues <i>et al.</i>	Experimental study of mixtures soil-industrial waste using simplex design for application in paving	WoS	Journal of Building Engineering	2023
Parsaei <i>et al.</i>	Effect of electric arc and ladle furnace slags on the strength and swelling behavior of cement-stabilized expansive clay	WoS	Bulletin of Engineering Geology and the Environment	2021
Maghool <i>et al.</i>	Interface shear strength properties of geogrid-reinforced steel slags using a large-scale direct shear testing apparatus	WoS	Geotextiles and Geomembranes	2020
Galindo <i>et al.</i>	Optimization of mixtures of soil, construction and demolition waste, and steel slag using the simplex-extreme vertices method	Scopus	Transportation Geotechnics	2024
Suarez; Jonsén; Kajberg	Valorization of Air-Cooled EAF Manganese Slag in Comminution Processes: an Investigation into the Breakage Characterization	Scopus	Mining Metallurgy & Exploration	2023
Llatas-Contreras; Ruiz-Pico	Use of steel slag to improve the mechanical properties of subgrades in clayey soils	Scopus	Dyna	2024
Lopes <i>et al.</i>	Chemical, mineralogical, microstructural and engineering properties of tropical soils stabilised with the combined and individual use of different types of steel slag	Scopus	Road Materials and Pavement Design	2023
Komnitsas <i>et al.</i>	Insights on stabilization of marly soils through alkali activation with the use of slag and metakaolin as additives	Scopus	Case Studies in Chemical and Environmental Engineering	2023
Lopes <i>et al.</i>	Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils	Scopus	International Journal of Pavement Engineering	2021

Quadro 3 - Artigos selecionados (continuação)

Yildirim; Prezzi	Subgrade stabilisation mixtures with EAF steel slag: an experimental study followed by field implementation	<i>Scopus</i>	International Journal of Pavement Engineering	2020
	Effects of freeze-thaw cycles on the characteristics of the expansive soils treated by nanosilica and Electric Arc Furnace (EAF) slag	<i>Scopus</i>	Cold Regions Science and Technology	2020
Pinheiro <i>et al.</i>	Application of the response surface method to optimize alkali activated cements based on low-reactivity ladle furnace slag	<i>Scopus</i>	Construction and Building Materials	2020
Pisciotta	The volume expansion of artificial road aggregates derived from steelmaking slags	<i>Scopus</i>	European Transport	2020
Da Silva <i>et al.</i>	Use of steel waste for the application in urban paving	<i>Scopus</i>	Acta Scientiarum Technology	2019
Pribulova; Futas	Metallurgical Slag in Civil Engineering	<i>Scopus</i>	SGEM Scientific eLibrary	2017
Sol-Sánchez	Stabilization of clayey and marly soils using industrial wastes: pH and laser granulometry indicators	<i>Scopus</i>	Engineering Geology	2015
Pitanga <i>et al.</i>	MCT classification for compacted mixtures of soil-steel slag-fly ash for application in forest roads	<i>Scopus</i>	Revista Árvore	2016
Yildirim; Balunaini; Prezzi	Strength-Gain Characteristics and Swelling Response of Steel Slag and Steel Slag-Fly Ash Mixtures	<i>ASCE Collection</i>	Journal of Materials in Civil Engineering	2023
Montenegro <i>et al.</i>	Ladle Furnace Slag in the Construction of Embankments: Expansive Behavior	<i>ASCE Collection</i>	Journal of Materials in Civil Engineering	2013
Maghool <i>et al.</i>	Laboratory Evaluation of Ladle Furnace Slag in Unbound Pavement-Base/Subbase Applications	<i>ASCE Collection</i>	Journal of Materials in Civil Engineering	2016
Diniz <i>et al.</i>	Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads	<i>ASCE Collection</i>	Journal of Materials in Civil Engineering	2017
Patel; Shahu	Comparative Study of Slags Stabilized with Fly Ash and Dolime for Utilization in Base Course	<i>ASCE Collection</i>	Journal of Materials in Civil Engineering	2017
Rababah <i>et al.</i>	Resilient Response and Permanent Strain of Subgrade Soil Stabilized with Byproduct Recycled Steel and Cementitious Materials	<i>ASCE Collection</i>	International Journal of Geomechanics	2020

Quadro 3 - Artigos selecionados (continuação)

Chompoorat <i>et al.</i>	Alkali-Activated Controlled Low-Strength Material Utilizing High-Calcium Fly Ash and Steel Slag for Use as Pavement Materials	<i>ASCE Collection</i>	Journal of Materials in Civil Engineering	2021
Pai <i>et al.</i>	Structural Evaluation of Flexible Pavement Constructed with Steel Slag–Fly Ash–Lime Mix in the Base Layer	<i>ASCE Collection</i>	Journal of Materials in Civil Engineering	2021
Patel; Shahu	Resilient Response and Permanent Strain of Steel Slag-Fly Ash-Dolime Mix	<i>ASCE Collection</i>	Journal of Materials in Civil Engineering	2016

2.2 Revisão sistemática de literatura

A presente revisão bibliográfica visa a exposição do panorama das principais contribuições da literatura científica sobre os principais temas desta pesquisa, relacionando estudos importantes e identificando convergências e lacunas pertinentes aos mesmos.

Chaiyaput, Ayawanna e Manandhar (2023) investigaram a mistura de solo laterítico com escória, cimento e asfalto, obtendo resultados expressivos de resistência do solo. Segundo os autores, a adição de escória proporcionou um aumento significativo de resistência, cerca de cinco vezes maior em comparação ao solo sem escória, estudo que se alinha com a pesquisa de Chaiyaput e Ayawanna (2021), que demonstrou que o Índice de Suporte Califórnia (CBR) do solo laterítico foi altamente melhorado com a adição de escória de forno panela, devido à reação de hidratação entre a água e o excesso de cal na escória, o que gerou sílica livre no solo.

Rodrigues *et al.* (2023) avaliaram o impacto da carbonatação na mistura solo-EAEP (escória de aciaria de forno elétrico a arco), observando uma melhora significativa nas características resilientes do pavimento. A formação de carbonato de cálcio reduziu as deflexões e as deformações verticais e horizontais, aumentando a vida útil do pavimento e mitigando problemas, como afundamento plástico e trincamento por fadiga.

O controle da expansão dos solos foi abordado no trabalho de Pho, Ghazireh e Ghataora (2006), que destacaram o uso de 15-20% de escória para reduzir a expansão de um solo argiloso, visando aumentar a durabilidade dos pavimentos. Em outro estudo, Parsaei *et al.* (2021) demonstraram que a adição de 10% de escória, juntamente com 5% de cimento, pode impedir a expansão de argilas expansivas, destacando o papel da escória na estabilização química de solos problemáticos.

Yildirim, Balunaini e Prezzi (2023) examinaram as características de resistência ao cisalhamento e rigidez da escória de aciaria, que se mostrou um material competente para

camadas de base e sub-base de pavimentos, embora preocupações com a expansão e a lixiviação de longo prazo ainda existam. A expansão também foi abordada por Montenegro *et al.* (2013), que estudaram o comportamento volumétrico de misturas solo-escória de aciaria de forno panela (LFS), observando expansões leves atribuíveis às reações pozolânicas.

O potencial de reutilização da escória foi amplamente explorado por Maghool *et al.* (2016), que investigaram as propriedades de engenharia da escória de forno panela (LFS) e sua aplicação em camadas de pavimento. Os autores verificaram que a resistência à compressão não confinada da LFS aumentou significativamente após 7 dias de cura, indicando o papel crucial do tempo de cura no desenvolvimento das propriedades mecânicas.

De forma semelhante, Diniz *et al.* (2017) testaram misturas de cal, cimento e escória de aciaria de forno básico de oxigênio (BOFS), encontrando resultados promissores para a estabilização de solos no Brasil. Os solos estabilizados com BOFS apresentaram uma melhoria significativa nos valores de CBR, alcançando aumentos de até 230%, com uma redução notável na expansibilidade.

As análises estruturais dos pavimentos construídos com misturas de escória de aciaria também foram tema de estudo de Patel e Shahu (2017), que compararam o desempenho mecânico de misturas de escória de aciaria, cinza volante e cal dolomítica com o macadame de mistura úmida convencional. Os autores observaram maior resistência ao cisalhamento triaxial e módulos resilientes mais altos nas misturas estabilizadas com escória.

A durabilidade e a resistência dos pavimentos são pontos cruciais em várias obras de pavimentação. Rababah *et al.* (2020) demonstraram que o uso de carepa de laminação em conjunto com materiais cimentícios melhora as propriedades de resistência e rigidez do solo de subleito, permitindo sua utilização eficaz na construção de estradas.

Chompoorat *et al.* (2021) também contribuíram para o estudo da durabilidade ao explorar o uso de materiais de baixa resistência controlados com escória de aciaria em aplicações de pavimentação, relatando melhorias significativas na resistência à compressão e no módulo resiliente.

A incorporação de escórias industriais em pavimentos não só melhora suas propriedades mecânicas, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental. O estudo de Pai *et al.* (2021) validou o desempenho de seções de pavimentos flexíveis construídas com misturas de escória de aciaria, cinza volante e cal, demonstrando uma rigidez superior em comparação ao convencional. Além disso, o uso de escória resultou em uma economia de custo de até 15% e uma vida útil até 2,6 vezes maior do que os pavimentos tradicionais. Patel e Shahu (2016) aprofundaram-se na modelagem do comportamento de misturas de escória, cinza volante e cal

dolomítica, apresentando evidências de que o uso de resíduos industriais na construção de pavimentos pode não apenas melhorar o desempenho técnico, mas também minimizar o impacto ambiental associado ao descarte de materiais.

Por fim, corroborando com o objetivo desta pesquisa que visa a utilização de material geossintético em misturas de solo e escória, na única obra selecionada com os termos de busca, Maghool *et al.* (2020) mostraram que a combinação de escória com geogrelha melhora o atrito interno do solo, conforme resultados obtidos em ensaios de cisalhamento.

Apesar do avanço dos estudos envolvendo o comportamento mecânico dos geossintéticos em contato com diferentes tipos de solo, observa-se que a literatura ainda carece de trabalhos que explorem especificamente a interação entre geossintéticos e misturas solo-escória de aciaria. Essa lacuna é particularmente relevante, considerando o potencial da escória como alternativa sustentável para aplicações em engenharia civil. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma contribuição original ao investigar o desempenho da mistura solo-escória em contato com diferentes geossintéticos, fornecendo dados inéditos que auxiliam na compreensão dos mecanismos de interação.

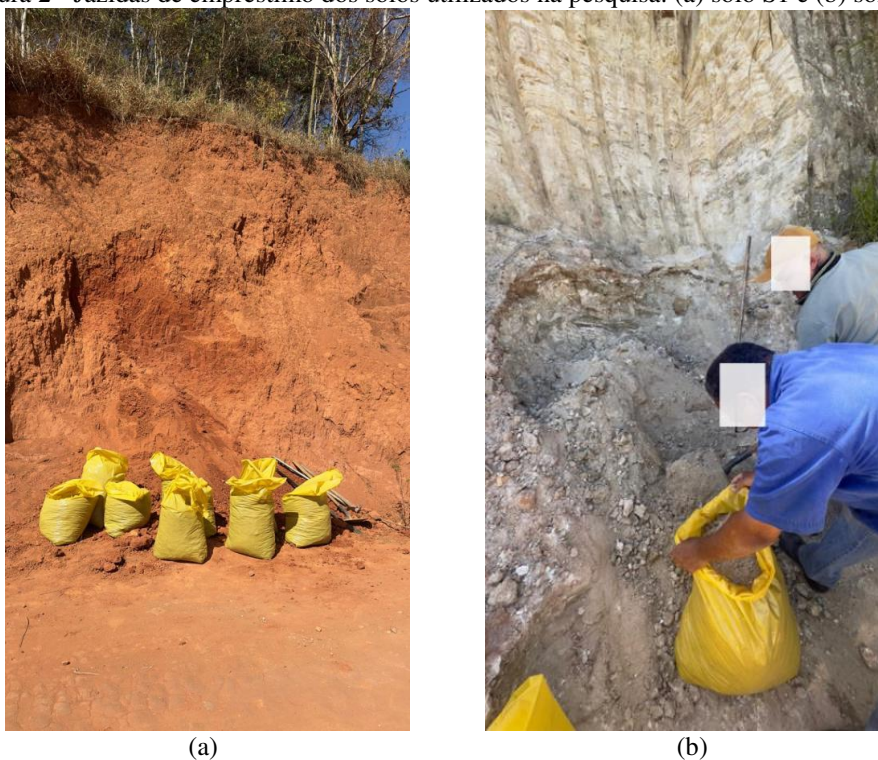
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Solos

Na presente pesquisa, foram utilizados dois diferentes tipos de solos denominados S1 e S2, oriundos de jazidas de empréstimo localizadas no município de Viçosa, no Estado de Minas Gerais, Brasil, os quais foram coletados conforme o procedimento PRO 003 (DNER, 1994a). O solo S1 foi retirado de um horizonte de solo residual maduro e coloração avermelhada, local com coordenadas geográficas de Latitude $20^{\circ}45'08''\text{S}$ e longitude $42^{\circ}51'30''\text{W}$. O solo S2 foi retirado de um horizonte de solo saprolítico de coloração amarelo-acinzentada, local de coordenadas geográficas de Latitude $20^{\circ}45'47''\text{S}$ e Longitude $42^{\circ}51'29''\text{W}$. Ambas amostras foram preparadas para os ensaios geotécnicos seguindo a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2024a). As Figuras 2(a) e 2(b) mostram as jazidas de empréstimo dos solos S1 e S2, respectivamente.

Figura 2 - Jazidas de empréstimo dos solos utilizados na pesquisa: (a) solo S1 e (b) solo S2



(a)

(b)

3.1.2 Escória de aciaria elétrica primária (EAEP)

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

A preparação das amostras para os ensaios de caracterização foi realizada através da moagem do material no aparelho de abrasão *Los Angeles* para reduzir a sua granulometria em partículas de diâmetros menores que 0,6 mm (peneira #30), de acordo com o procedimento PRO 199 (DNER, 1996a). O objetivo dessa redução granulométrica foi de aumentar a superfície específica da EAEP e alcançar um valor próximo a 0,18 m²/g, semelhante ao proposto por Sheen, Le e Lam (2021). Em seguida, foi realizada a preparação das amostras para os ensaios de laboratório de acordo com a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2024a). Os finos de EAEP foram, então, armazenados em tonéis plásticos (bombonas) devidamente vedados (Figura 4). A Figura 3 mostra o momento da coleta da escória bruta.

Figura 3 - Coleta da escória bruta



Figura 4 – Processo de preparação e armazenamento da escória moída



3.1.3 Geossintético

Como material geossintético, empregou-se o geotêxtil tecido Basetrac Woven PP25/25 fornecido pela empresa Huesker Brasil, o qual apresenta baixo valor de resistência à tração. De acordo com o fabricante, a textura de malha fina do Basetrac Woven PP25/25 permite que ele cumpra as funções de separação, filtragem e reforço. O produto é fornecido em grandes painéis para simplificar a instalação em áreas amplas. A resistência alcalina do material, constituído de polipropileno, permite seu uso em solos estabilizados com cimento (Huesker, 2025). A Figura 5 detalha o geotêxtil utilizado na pesquisa.

Figura 5 – Imagem em detalhe do geotêxtil



3.2 Métodos

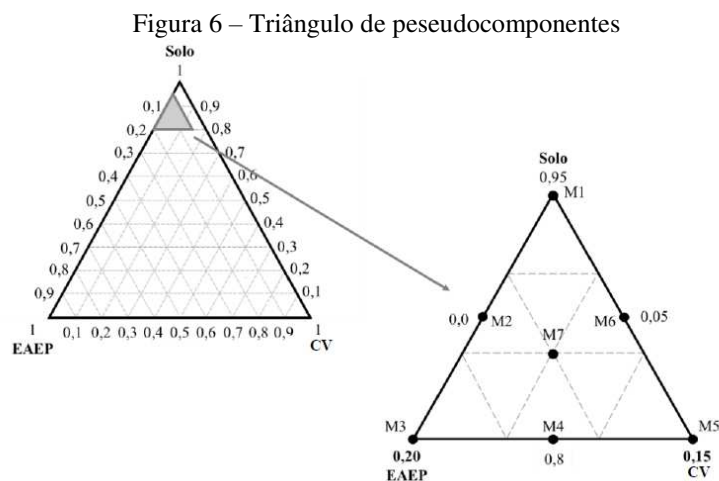
3.2.1 Planejamento experimental

O planejamento experimental da presente pesquisa baseou-se na metodologia utilizada por Ferreira (2023), onde três componentes foram usados para formar as misturas experimentais, constituindo sistemas ternários: solo, Escória de Aciaria Elétrica Primária (EAEP) e Cinza Volante (CV). Para a elaboração do diagrama triangular do método Simplex-Centróide, foi necessário definir os valores máximos e mínimos (variáveis de entrada) que cada componente pode assumir nas misturas (percentagem em relação à massa seca das misturas finais). A avaliação da influência das amostras de EAEP e CV para fins de estabilização química das amostras de solos foi realizada através do método estatístico de planejamento experimental em rede Simplex-Centróide. O software estatístico Minitab 18 foi empregado para esse procedimento, com o objetivo de determinar a dosagem ótima para a estabilização química das amostras de solos.

Ferreira (2023), utilizando o método de planejamento experimental em rede Simplex-Centróide, considerou três componentes nas misturas analisadas, portanto o número de misturas experimentais que foram geradas pelo método foi dado pela Equação (1), em que “q” é o número de componentes, e N, o número de misturas experimentais, sendo gerados 7 pontos no interior de um triângulo equilátero (M1 a M7), o qual constitui um espaço denominado de rede Simplex.

$$N = 2q - 1 \quad (1)$$

Foram gerados três pontos nos vértices, três nas arestas e um no baricentro. O triângulo equilátero gerado com os componentes no estado puro e o triângulo gerado com os pseudocomponentes são apresentados na Figura 6.



Fonte: Ferreira (2023).

Para a avaliação do planejamento experimental da pesquisa realizada por Ferreira (2023), as seguintes propriedades foram consideradas, todas relacionadas diretamente aos critérios de seleção de materiais para composição de camadas estruturais de pavimentos rodoviários: Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), Índice de Suporte Califórnia (CBR), Expansão e Módulo de Resiliência (MR) de corpos de prova compactados das misturas analisadas, em cura selada de 7 (sete) dias, conforme as respectivas normas técnicas NBR 12025 (ABNT, 2012a), ME 181 (DNER, 1994b), NBR 9895 (ABNT, 2016a) e ME 134 (DNIT, 2018a).

A Tabela 1 resume as proporções de cada componente na mistura gerada pelo software Minitab 18 para as amostras S1 e S2. Ferreira (2023) determinou que fossem respeitados os limites inferiores e superiores de cada componente, sendo as proporções determinadas considerando as respectivas massas secas de cada componente em relação à massa seca total da mistura.

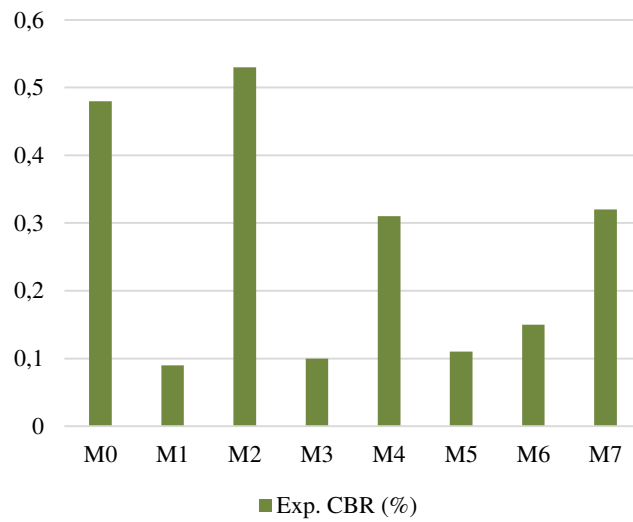
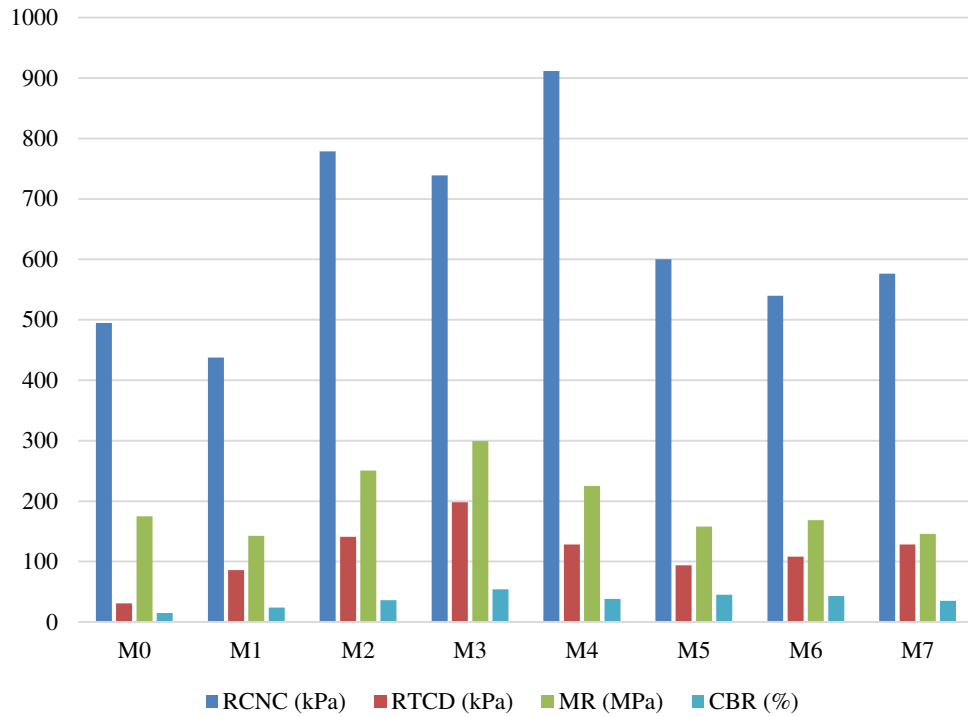
Tabela 1 – Misturas solo-resíduos definidas no planejamento experimental.

Mistura	Solo (%)	EAEP (%)	CV (%)
M0	100	0	0
M1	95	5	0
M2	87,5	12,5	0
M3	80	20	0
M4	80	12,5	7,5
M5	80	5	15
M6	87,5	5	7,5
M7	85	10	5

Fonte: Ferreira (2023).

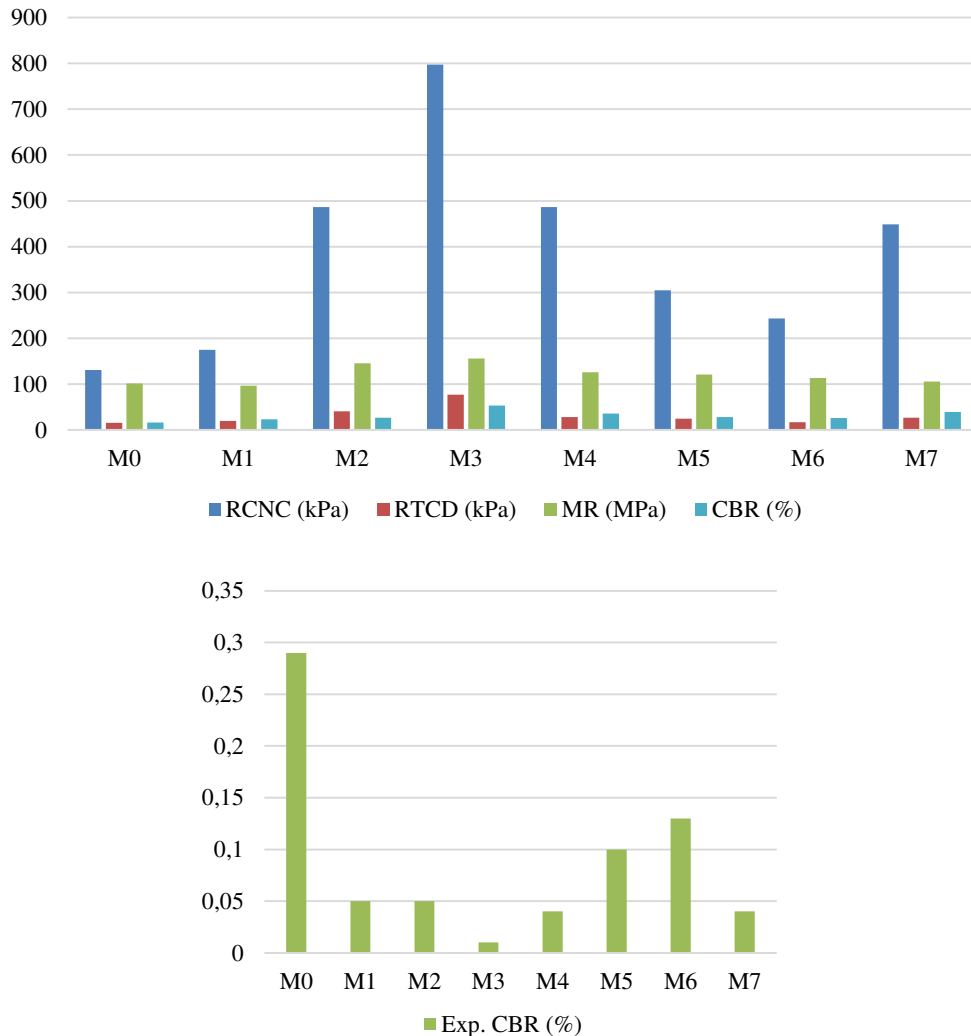
Nas Figuras 7 e 8, são apresentados os valores das propriedades analisadas por Ferreira (2023) para as misturas definidas pelo planejamento experimental.

Figura 7 - Propriedades mecânicas e Expansão das misturas definidas no planejamento experimental para o solo S1



Fonte: dados de Ferreira (2023).

Figura 8 - Propriedades mecânicas e Expansão das misturas definidas no planejamento experimental para o solo S2



Fonte: dados de Ferreira (2023).

É notório o crescimento dos valores das propriedades mecânicas analisadas à medida que se aumentam as proporções de EAEP e de CV adicionados aos solos. É importante ressaltar que a presente pesquisa tem como objetivo principal a avaliação das propriedades mecânicas da mistura solo com resíduos siderúrgicos com a inserção de um geossintético de baixa rigidez. Optou-se, portanto, pela utilização da mistura M1 (95% de solo-5% de EAEP), a qual apresentou valores inferiores das propriedades investigadas dentre todas as misturas planejadas, sendo, portanto, a mistura solo-EAEP que apresentou maior demanda de reforço.

3.2.2 Ensaios de caracterização dos solos, EAEP e misturas solo-EAEP reforçadas por geossintético

A caracterização geotécnica das amostras de solos foram: i) análise granulométrica

conjunta, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2025a); ii) limite de liquidez (LL), segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016b); iii) limite de plasticidade (LP), segundo a NBR 7180 (ABNT, 2016c); iv) massa específica dos grãos do solo (ρ_s), segundo a NBR 6458 (ABNT, 2025b). A determinação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (w_{ot}) dos solos compactados foi realizada por meio do ensaio de compactação na energia do Proctor intermediária, segundo a NBR 7182 (ABNT, 2025c).

As constituições mineralógicas das amostras de solos foram determinadas pela técnica de Difração de Raios-X (DRX), realizadas pelo equipamento D8 Discover (Da Vinci), composto por sistema com reconhecimento automático de componentes, goniômetro com diâmetro de até 1000 mm, tubo de cobre, espelho de Goebel, monocromador de Ge 2 \times (022). As medições teta-2teta foram realizadas na faixa de 5 a 80 graus, com incremento de 0,05 graus e tempo de 1 segundo por passo. As análises químicas das amostras de solos foram realizadas pelo método de Fluorescência de Raios-X (FRX).

As caracterizações microestruturais das amostras de solo, após metalização, foram realizadas utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com elétrons secundários. O equipamento utilizado foi da marca JEOL, modelo JSM-6010LA, microscópio com resolução de 4 nm (com feixe a 20 kV), magnificação de 8X a 300.000X e voltagem de aceleração de 500 V a 20 kV.

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

A caracterização química da EAEP foi realizada com base nas metodologias estabelecidas para a análise de cimento Portland. Foram conduzidos os seguintes ensaios: (i) determinação de óxidos por Fluorescência de Raios-X (FRX); (ii) perda ao fogo, conforme a NBR NM 18 (ABNT, 2012c); (iii) cal livre, segundo a NBR NM 13 (ABNT, 2012d); e (iv) resíduo insolúvel, de acordo com a NBR NM 15 (ABNT, 2012e). A avaliação da pozolanicidade foi realizada por método termogravimétrico, conforme a NBR 5753 (ABNT, 2016d). Os ensaios mineralógicos e microestruturais seguiram os mesmos procedimentos aplicados às amostras de solo.

A caracterização ambiental da amostra de EAEP moída foi realizada com base na norma técnica NBR 10004 (ABNT, 2024b), que estabelece os critérios para a classificação de resíduos

sólidos. Para determinar a classificação de cada resíduo industrial, foram conduzidos ensaios de lixiviação e de solubilização, de acordo com as normas NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2004c), respectivamente.

Para a determinação das propriedades mecânicas, foram realizados os ensaios de Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC), Índice CBR, Expansão e Módulo de Resiliência (MR).

A Tabela 2 resume as codificações dos corpos de prova utilizados na pesquisa. Ressalta-se que as propriedades da mistura de projeto M1 reforçada por geossintético (SE-GSY), mistura foco da pesquisa, foram comparadas com as propriedades do solo (S), solo-geossintético (S-GSY) e solo-escória (SE).

Tabela 2- Codificação dos corpos de prova moldados

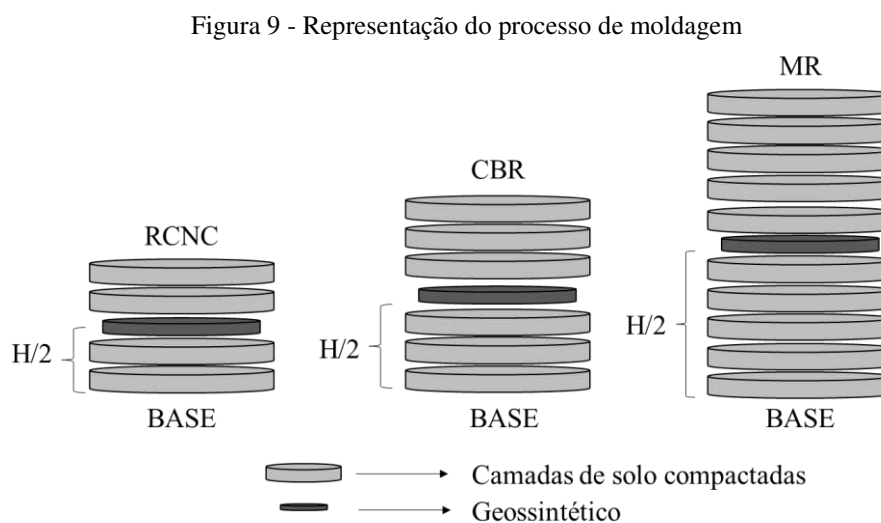
Codificação	Nomenclatura	Porcentagem solo/escória (%)
S	Solo	100/0
S-GSY	Solo-Geossintético	100/0
SE	Solo-Escória	95/5
SE-GSY	Solo-Escória-Geossintético	95/5

Para ambos os solos, os corpos de prova (CPs) da mistura M1 (95% de solo - 5% de EAEP) reforçada com geossintético foram produzidos em moldes cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 127 mm para a avaliação da RCNC, de acordo com a norma técnica NBR 12024 (ABNT, 2012f). As dimensões dos CPs moldados para o ensaio de índice CBR e Expansão foram da ordem de 150,8 mm de diâmetro e 177,8 mm de altura, de acordo com a norma técnica NBR 9895 (ABNT, 2016a). Para o ensaio de MR, os CPs foram moldados em um molde cilíndrico de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, conforme a norma técnica ME 134 (DNIT, 2018a), utilizando os pares de tensões sugeridos para amostras de solos a serem utilizadas na composição de camada de subleito, sendo que o pulso do carregamento teve duração de 0,1 segundo, e o período de repouso teve duração de 0,9 segundo, totalizando um ciclo de 1 segundo.

Para cada ensaio, foram moldados três corpos de prova para cada idade de cura estabelecida (7 e 28 dias). As idades de 0, 7 e 28 dias foram escolhidas para representar, respectivamente, o desempenho inicial, o ganho de resistência precoce e a resistência de referência das misturas solo-escória. Os CPs foram curados em câmara úmida, envolvidos por filme plástico. No caso dos corpos de prova que não exigiram cura (0 dias), a ruptura foi realizada imediatamente após a moldagem, exceto para o ensaio de CBR, cuja imersão seguiu o período estabelecido pela norma técnica (4 dias). Para cada propriedade analisada,

considerou-se a média dos resultados obtidos nas três determinações. Foram adotados coeficientes de variação máximos de 10%, para os ensaios de Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC) e Módulo de Resiliência (MR), e de 15%, para o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR).

Para a moldagem dos CPs, foi utilizada a compactação estática, na qual todos os CPs foram moldados na prensa hidráulica, mediante aplicação da força necessária para a compactação das camadas. Para a compactação dos CPs, foram estabelecidos previamente a massa úmida e o número de camadas a serem compactadas em cada cilindro, respeitando a conservação da energia de compactação Proctor Intermediária. Após a divisão da altura do cilindro em número igual ao número de camadas, foi realizada a compactação por meio de um soquete adaptado à prensa. Com relação ao número de camadas, foram estabelecidas 4 camadas para os CPs do ensaio de RCNC, 6 camadas para os CPs do ensaio CBR e 10 camadas para os CPs do ensaio de MR. A Figura 9 esquematiza a disposição das camadas e do geossintético nos corpos de prova para os três ensaios executados.



O objetivo no número par de camadas para a moldagem dos corpos de prova desta pesquisa é importante para que a disposição do geotêxtil esteja sempre no meio do corpo de prova, mantendo-se um padrão para todos os ensaios. O número de camadas de compactação estabelecido também foi mantido nos corpos de prova sem a inserção do geossintético (solos e misturas solo-EAEP não reforçados).

Avelar (2020), em sua pesquisa com inserção de geossintético em corpos de prova em ensaios CBR, inferiu que as solicitações da carga do pistão CBR, quando chegam ao geotêxtil, afundam a região central do corpo de prova e arrastam as suas bordas para dentro da área de

carregamento, causando a deformação do geotêxtil, o qual encontra-se sem ancoragem. Nesta pesquisa, visando restringir este processo, optou-se pela redução do diâmetro do geossintético de reforço em 2 cm em relação ao diâmetro interno do cilindro utilizado, para as três modalidades de ensaio mecânico (RCNC, CBR e MR), de modo a manter em contato, nas bordas, as duas camadas de solo separadas pelo material geossintético. A Figura 10 exemplifica a disposição e o tamanho do geotêxtil.

Figura 10 – Disposição e tamanho do geotêxtil de reforço inserido nos CPs moldados



Para ambos os solos (S1 e S2), os ensaios mecânicos foram executados em corpos de prova destes materiais na condição natural (sem EAEP e sem geotêxtil), assim como para as misturas M1 (solo-EAEP) não reforçadas (sem geotêxtil), para as idades de 0, 7 e 28 dias de cura, e para as misturas M1 (solo-EAEP) reforçadas (com geotêxtil), também para os períodos de cura de 0, 7 e 28 dias. Os documentos normativos adotados para a realização destes ensaios foram a NBR 12025 (ABNT, 2012a), para a RCNC, a NBR 9895 (ABNT, 2016a), para o CBR, e as normas ME 134 (DNIT, 2018a) e ME 181 (DNIT, 2018b), para o MR.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização geotécnica, constituição mineralógica, análise química e caracterização microestrutural dos solos

Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica são apresentados na Tabela 3, na qual também são apresentadas as classificações dos solos segundo os sistemas TRB (*Transportation Research Board*), conforme a M 145-91 (AASHTO, 2017), USC (*Unified Soil Classification*), conforme a D2487 (ASTM, 2017), e MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), de acordo com a CLA 259 (DNER, 1996b).

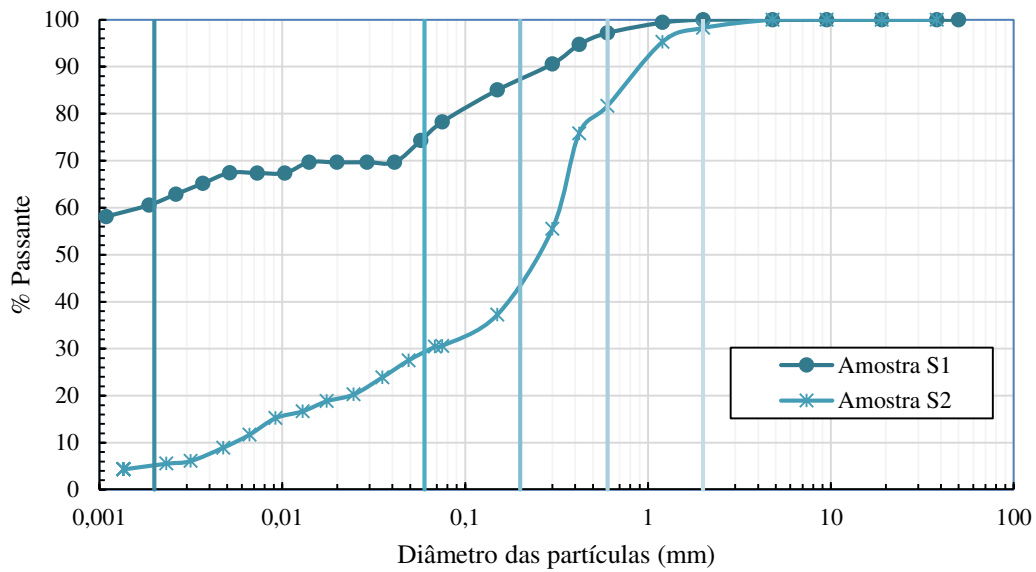
Tabela 3 - Caracterização e classificação geotécnicas das amostras de solo analisadas

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

Nota: * Faixas granulométricas determinadas segundo a NBR 6502 (ABNT, 2022)

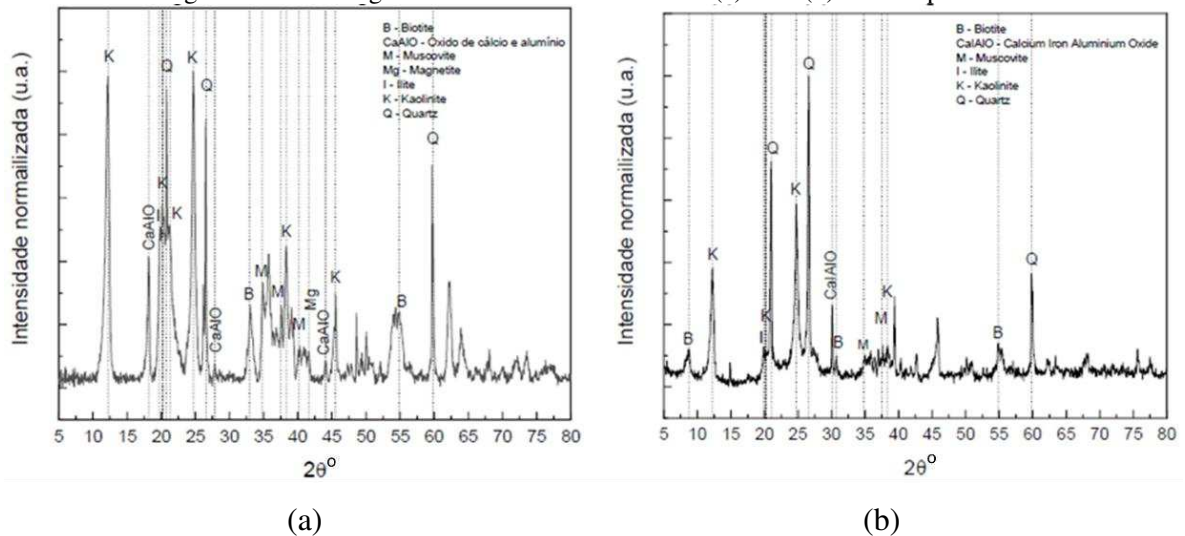
As curvas granulométricas das amostras de solos S1 e S2, apresentadas na Figura 11, indicam que a amostra de solo S1 contém uma alta proporção de partículas de tamanho argila, correspondendo, texturalmente, a uma argila areno-siltosa. Em contraste, na amostra de solo S2, predominam partículas de tamanho areia, correspondendo a uma areia silto-argilosa.

Figura 11 - Curvas granulométricas das amostras de solo S1 e S2



Os resultados das constituições mineralógicas das amostras de solos pela técnica de Difração de Raios-X (DRX) estão apresentados na Figura 12.

Figura 12 – Difratoogramas das amostras de solo S1 (a) e S2 (b) obtidos por DRX



Os resultados da composição química e os respectivos valores de perda ao fogo são apresentados na Tabela 4

Tabela 4 - Composição química obtida por FRX e perda ao fogo das amostras de solos S1 e S2.

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	PF* (%)	Outros (%)
S1	27,11	24,52	12,47	0,02	1,28	0,07	1,55	1,53	0,04	0,27	11,49	19,65
S2	36,27	24,31	1,92	0,17	1,41	1,30	2,40	0,18	0,03	0,22	4,19	27,60

Nota: * Perda ao fogo.

As amostras de solo S1 e S2 apresentam elevados níveis de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . A cor avermelhada do solo S1 é devida à presença de magnetita, enquanto o solo S2 possui uma coloração branco-acinzentada com leve pigmentação amarela em função da predominância do argilomineral caulinita (Castagnotto *et al.*, 2021; Morsi *et al.*, 2019).

O estudo e a avaliação da presença dos compostos previamente mencionados tornam-se importantes para entender o potencial processo de reações pozolânicas, as quais melhoram consideravelmente as propriedades mecânicas de solos para fins de engenharia, tornando-se materiais estabilizadores mais eficientes, e, ainda, para entender como os solos mencionados reagem em contato com a água (Tastan *et al.*, 2011; Hossain; Mol, 2011; Janz; Johansson, 2002).

As imagens microestruturais da amostra de solo S1 revelaram uma granulação fina (Figura 13), com predominância de grãos de diâmetros inferiores a $2\ \mu\text{m}$ e formato lamelar. Por outro lado, a amostra de solo S2 apresentou grãos com tamanhos superiores a $0,1\ \text{mm}$, com formas cúbicas (Figura 14), enquanto seus finos exibiram formas lamelares e prismáticas. A amostra de solo S1 demonstrou uma estrutura mais compacta em comparação à amostra S2 (Wu *et al.*, 2019).

Figura 13 – Micrografias da amostra de solo S1 obtidas por MEV: (a)x300; (b)x5000.

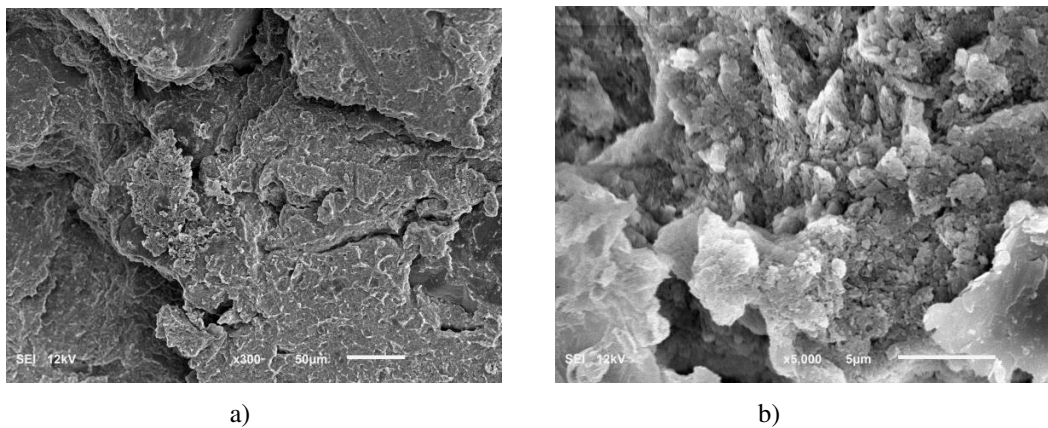
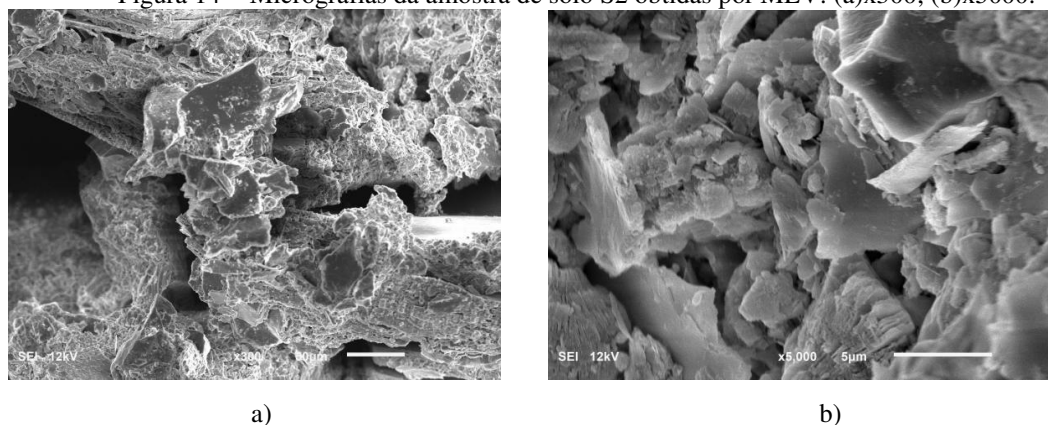


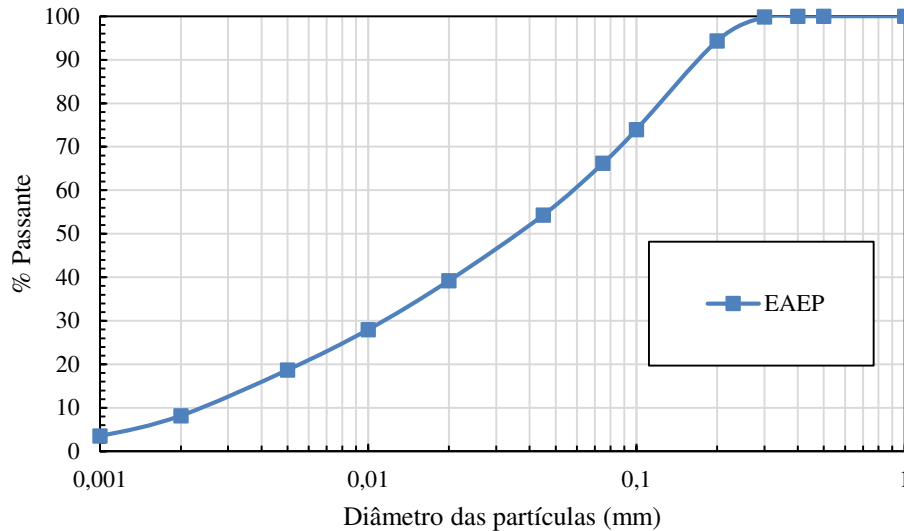
Figura 14 - Micrografias da amostra de solo S2 obtidas por MEV: (a)x300; (b)x5000.



4.2 Caracterização física, química, mineralógica, microestrutural e ambiental da EAEP

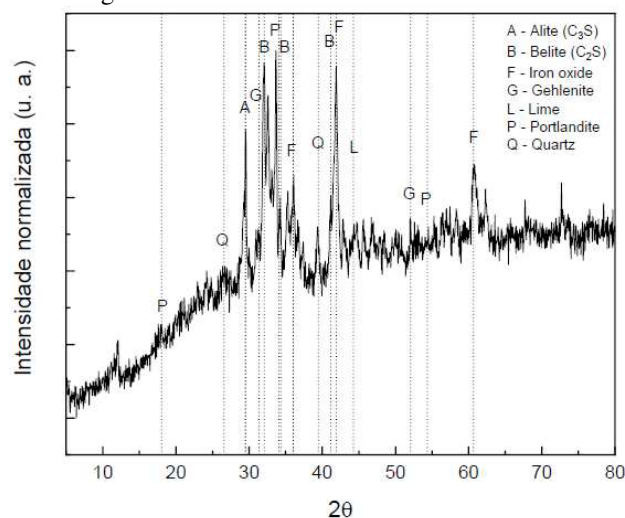
A curva granulométrica da amostra de EAEP moída é apresentada na Figura 15.

Figura 15 – Curva granulométrica da amostra de EAEP moída



A Figura 16 apresenta o resultado da mineralogia da amostra de escória obtida por DRX. Por meio do difratograma, observou-se uma ampla gama de minerais constituintes do material. O resultado indica picos de alta intensidade de óxido de cálcio (*lime*) e óxido de ferro. A presença de óxido de cálcio e óxido de magnésio pode induzir problemas de expansão volumétrica devido à reação desses óxidos com a água. A presença de óxidos de ferro garante elevadas dureza e massa específica para a EAEP (Arribas *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2017; Brand *et al.*, 2020).

Figura 16 – DRX da amostra de EAEP moída



Os resultados da análise por FRX e da perda ao fogo são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química e perda ao fogo de amostra de EAEP

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	PF* (%)	Outros (%)
EAEP	21,35	5,17	24,50	33,15	1,01	0,30	0,00	0,64	0,18	0,32	0,19	13,19

Nota: * Perda ao fogo.

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados das análises dos extratos lixiviados e solubilizados da amostra de EAEP. Nessas tabelas, também são indicados os limites máximos de concentração dos elementos químicos estabelecidos para a classificação de resíduos industriais, conforme a norma técnica NBR 10004 (ABNT, 2024b).

Tabela 6 - Concentrações dos elementos nos extratos lixiviados

Elemento	Limite máximo do elemento (mg/L)*	EAEP
K	-	-
Ca	-	1928,61
Mg	-	2,33
S	-	6,10
Cu	-	-
Fe	-	-
Zn	-	-
Mn	-	-
B	-	0,67
Cd	0,5	-
Cr	5	-
Pb	1	-
Al	-	6,58
Na	-	23,03
As	1	-
Ba	70	1,46

Nota: * Limites impostos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

Tabela 7 - Concentrações dos elementos nos extratos solubilizados

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

Nota: * Limites impostos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

A avaliação química dos extratos lixiviados das amostras de EAEP moída evidenciou que os teores de elementos químicos presentes se mantiveram abaixo dos limites máximos permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 2024b). Esse resultado sugere viabilidade na incorporação desses materiais em misturas com solo para utilização em camadas de pavimentos rodoviários.

Contudo, a análise dos extratos solubilizados indicou que os teores de Ferro e Alumínio da EAEP moída ultrapassaram os valores estipulados pela Portaria GM/MS nº 888/2021, os quais são de 0,3 mg/L, para Ferro, e 0,2 mg/L, para Alumínio, o que contraindica o uso direto desses resíduos em locais com risco de contaminação de mananciais, a fim de preservar a qualidade da água potável.

Diante desses resultados, conclui-se que a EAEP moída pode ser empregada como material estabilizante em camadas de pavimentação, desde que sejam adotadas medidas de controle que impeçam seu contato direto com corpos d'água. O resíduo é enquadrado como Classe II A, ou seja, não perigoso e não inerte, apresentando baixo potencial de impacto ambiental e não oferecendo riscos relevantes à saúde humana ou ao meio ambiente.

4.3 Caracterização do geossintético utilizado na pesquisa

Os resultados dos ensaios de caracterização do material geossintético foram fornecidos pela empresa fabricante e apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades do geossintético Basetrac Woven PP25/25

Massa por unidade de área (g/m ²)	Espessura nominal (mm)	Resistência à tração média na direção de fabricação* (kN/m)	Resistência à tração média na direção transversal à fabricação* (kN/m)	Resistência média à punção CBR** (kN)
147	0,77	26,1	30,6	3,35

* Regido pela norma: Geosynthetics — Wide-width tensile test (DIN EN ISO 10319:2024)

** Regido pela norma: Geosynthetics — Static puncture test (CBR test) (DIN ISO 12236:2006)

4.4 Peso específico seco máximo e teor de umidade ótimo

A Tabela 9 apresenta os parâmetros dos pontos de ótimo das misturas M1 e M0, obtidos através das curvas de compactação, compactadas na energia Proctor Intermediária. As misturas M0 correspondem aos solos naturais, sem adição de escória ou outro material.

Tabela 9 - Peso específico seco máximo e umidade ótima dos solos e da mistura utilizada

Misturas	S1		S2	
	w _{ot} (%)	γ _{dmax} (kN/m ³)	w _{ot} (%)	γ _{dmax} (kN/m ³)
M0 - 100/0/0	28,2	14,98	13,9	17,75
M1 - 95/5/0	27,4	15,35	13,0	18,07

4.5 Ensaio de Resistência à Compressão Não Confinada

4.5.1 Solo S1

Na Tabela 10, apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de RCNC para o solo argiloso (S1).

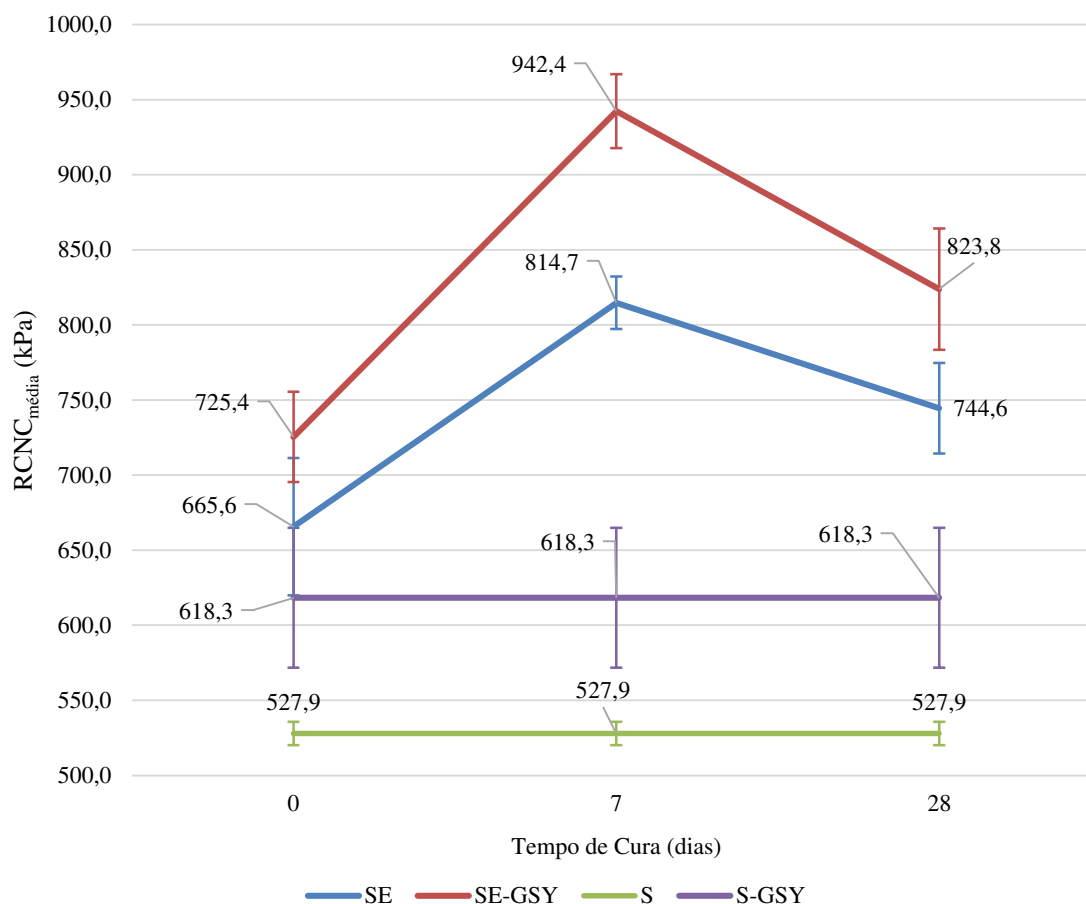
Tabela 10 – Resultados do ensaio de RCNC para o solo argiloso (S1)

Identificação	Tempo de cura (dias)	RCNC (kPa)	RCNC _{média} (kPa)	Coefficiente de Variação (%)*
CP1(SE)	28	773,7	744,6	4,06
CP2(SE)	28	746,7		
CP3(SE)	28	713,4		
CP1(SE-GSY)	28	858,2	823,8	4,90
CP2(SE-GSY)	28	834,0		
CP3(SE-GSY)	28	779,4		
CP1(SE)	7	828,9	814,7	2,15
CP2(SE)	7	795,1		
CP3(SE)	7	820,1		
CP1(SE-GSY)	7	917,6	942,4	2,61
CP2(SE-GSY)	7	966,8		
CP3(SE-GSY)	7	942,8		
CP1(S)	0	527,0	527,9	1,47
CP2(S)	0	536,0		
CP3(S)	0	520,6		
CP1(S-GSY)	0	598,7	618,3	7,53
CP2(S-GSY)	0	584,7		
CP3(S-GSY)	0	671,5		
CP1(SE)	0	612,8	665,6	6,87
CP2(SE)	0	692,1		
CP3(SE)	0	692,0		
CP1(SE-GSY)	0	774,3	747,5	4,03
CP2(SE-GSY)	0	714,9		
CP3(SE-GSY)	0	753,2		

Nota: * O coeficiente de variação máximo estabelecido foi de 10% para os resultados do ensaio de Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC).

Na Figura 17, é possível identificar o progresso das tensões resistentes médias dos corpos de prova de solo argiloso-EAEP reforçados (SE-GSY) e não reforçados (SE), em função dos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias. Adicionalmente, em linhas horizontais, são apresentados os resultados médios dos ensaios para as amostras de solo argiloso (S) e de solo argiloso com a inserção do geossintético (S-GSY).

Figura 17 – Gráfico de variação da tensão resistente (RCNC média) em função do tempo de cura: solo argiloso (S1)



A inserção do elemento de reforço no solo argiloso (compósito S-GSY) promoveu um aumento na RCNC (incremento de 17%). Resultados semelhantes foram encontrados na pesquisa de Parihar e Shukla (2015), onde a inserção do geossintético em solos argilosos proporcionou acréscimos de resistência para a propriedade analisada. Parihar e Shukla (2015) constataram ainda que quanto maior o número de camadas de geotêxtil tecido maior a resistência do solo observada. Constata-se, porém, que o melhoramento geotécnico proporcionado pela adição de escória ao solo argiloso (compósito SE) foi superior ao proporcionado pelo geossintético (compósito S-GSY).

Não se tem conhecimento de estudos publicados que analisem as mesmas propriedades de solos melhorados com escória após a inserção de geossintéticos, mas, seguindo a mesma linha de pesquisa, Azadegan e Pourebrahim (2010) analisaram o efeito da inserção de geogrelhas na resistência à compressão não confinada de solos tratados com cal/cimento, e os resultados mostraram que quanto maior a rigidez da amostra, proporcionada pela reação pozolânica, menor o efeito positivo demonstrado pela aplicação do material de reforço.

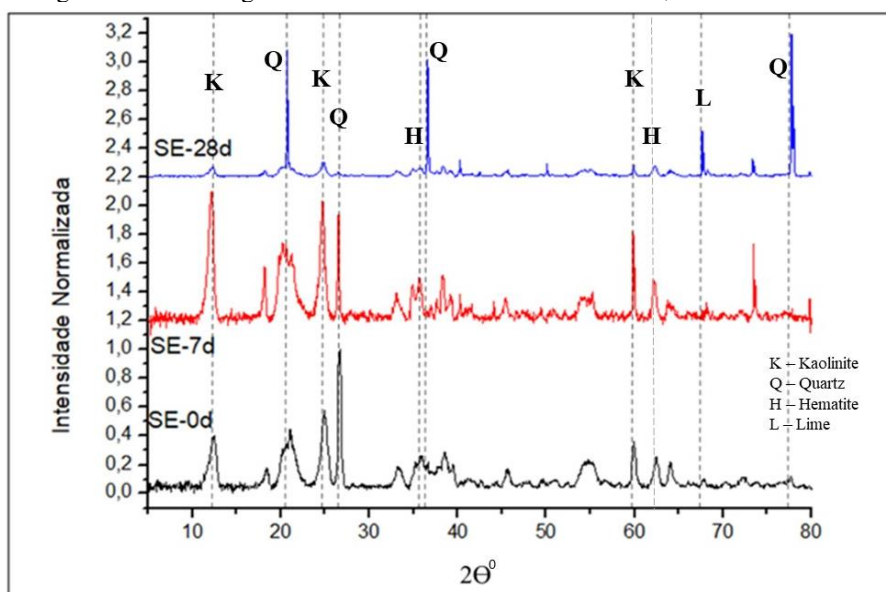
Quando a EAEP e o reforço geossintético são simultaneamente adicionados ao solo

argiloso (compósito SE-GSY), constata-se um desempenho mecânico ainda superior, realçando as vantagens técnicas deste compósito ternário sob a perspectiva da propriedade mecânica investigada (RCNC). A melhora da propriedade também foi comprovada, após a incorporação de EAEP em solo, nas obras de Maghool *et al.* (2016), Rababah *et al.* (2020) e Chompoorat *et al.* (2021).

Comparativamente à mistura solo argiloso-EAEP (compósito SE), os resultados sugerem que a inclusão do geossintético de reforço aumenta a resistência dos CPs para todas as idades de cura analisadas, culminando com uma tensão resistente média de 823,8 kPa aos 28 dias (aumento de 11% na RCNC). Maghool *et al.* (2016), Diniz *et al.* (2017) e Darwish, Tangri e Hajizada (2019) constataram que o tempo de cura é de fundamental importância para o desenvolvimento de resistência de solos tratados com escória, garantindo a estabilização química de solos argilosos problemáticos (Parsaei *et al.*, 2021).

Verifica-se que o pico de ganho de resistência se deu aos 7 dias de cura, seguido de uma queda aos 28 dias. Observa-se que, ao longo do tempo, há variações significativas nos padrões de difração (Figura 18), refletindo transformações nas fases minerais presentes. Aos 7 dias, o decréscimo da caulinita reflete o início das reações pozolânicas e a formação de géis cimentantes (C-S-H e C-A-S-H), justificando o ganho inicial de resistência (Housková *et al.*, 2016; Rodrigues, 2023). Contudo, a intensificação do consumo de caulinita e a maior definição de picos de cal e óxidos metálicos aos 28 dias, com a redução da resistência, sugerem uma reorganização ou transformação das fases cimentantes.

Figura 18 – Difratoograma da mistura Solo S1e EAEP aos 0, 7 e 28 dias de cura



4.5.2 Solo S2

Na Tabela 11, apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de RCNC para o solo arenoso (S2).

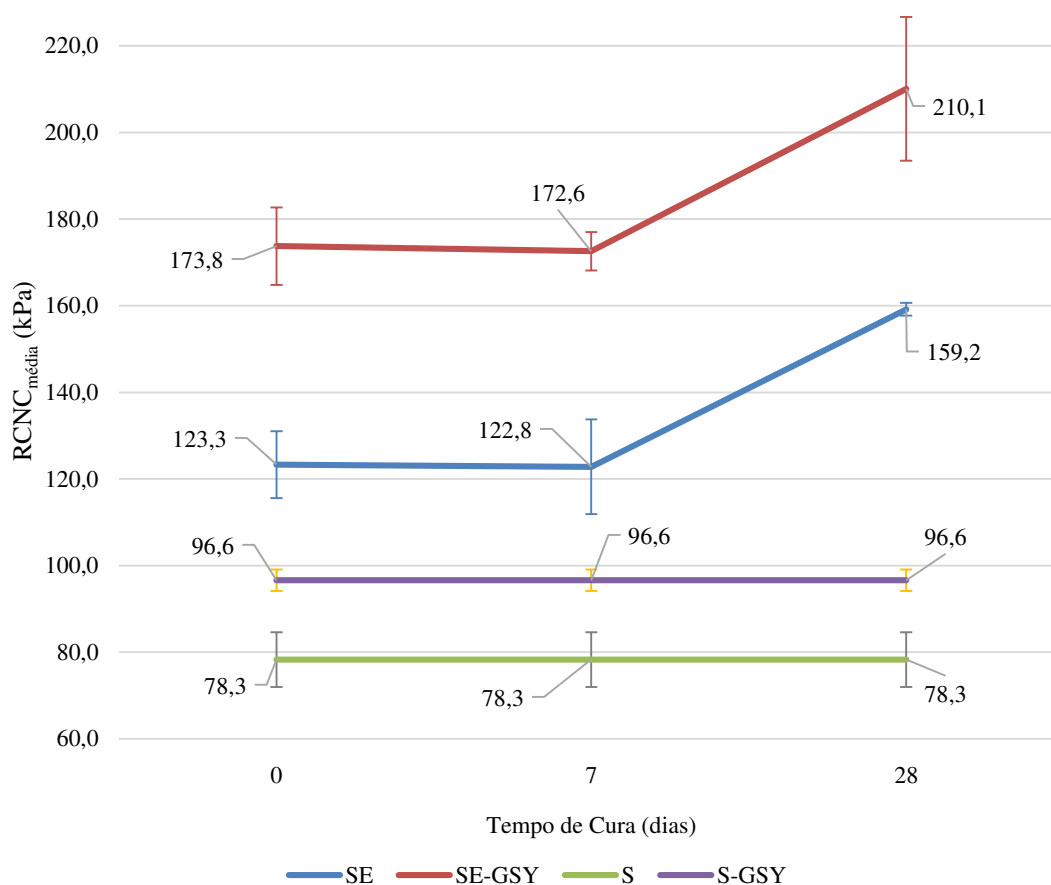
Tabela 11 – Resultados do ensaio de RCNC para o solo arenoso (S2)

Identificação	Tempo de cura (dias)	RCNC (kPa)	RCNC _{média} (kPa)	Coefficiente de Variação (%)*
CP1(SE)	28	160,5	159,2	0,94
CP2(SE)	28	157,5		
CP3(SE)	28	159,5		
CP1(SE-GSY)	28	205,9	210,1	7,90
CP2(SE-GSY)	28	228,4		
CP3(SE-GSY)	28	196,0		
CP1(SE)	7	117,2	122,8	8,93
CP2(SE)	7	115,8		
CP3(SE)	7	135,4		
CP1(SE-GSY)	7	168,7	172,6	2,57
CP2(SE-GSY)	7	171,6		
CP3(SE-GSY)	7	177,4		
CP1(S)	0	71,3	78,3	8,07
CP2(S)	0	80,0		
CP3(S)	0	83,7		
CP1(S-GSY)	0	97,5	96,6	2,56
CP2(S-GSY)	0	98,6		
CP3(S-GSY)	0	93,8		
CP1(SE)	0	138,5	123,3	7,65
CP2(SE)	0	108,8		
CP3(SE)	0	122,4		
CP1(SE-GSY)	0	165,3	173,8	5,15
CP2(SE-GSY)	0	172,9		
CP3(SE-GSY)	0	183,1		

Nota: * O coeficiente de variação máximo estabelecido foi de 10% para os resultados do ensaio de Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC).

Na Figura 19, é possível identificar o progresso das tensões resistentes médias dos corpos de prova de solo arenoso-EAEP reforçados (SE-GSY) e não reforçados (SE), em função dos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias. Adicionalmente, em linhas horizontais, são apresentados os resultados médios dos ensaios para as amostras de solo arenoso (S) e de solo arenoso com a inserção do geossintético (S-GSY).

Figura 19 - Gráfico de variação da tensão resistente (RCNC média) em função do tempo de cura: solo arenoso (S2)



Nota-se que a inserção do elemento de reforço no solo arenoso (compósito S-GSY) promoveu um aumento na RCNC (incremento de 23%). Resultados semelhantes foram encontrados em estudos que avaliaram a evolução da capacidade de carga em solos arenosos após a inserção de um geossintético, chegando a ter ganhos consideráveis de resistência (Santos; Da Silva; Maebara, 2023; Guedes *et al.*, 2020; Dos Santos *et al.*, 2021) e ainda podendo atenuar deformações (Constancio, 2010).

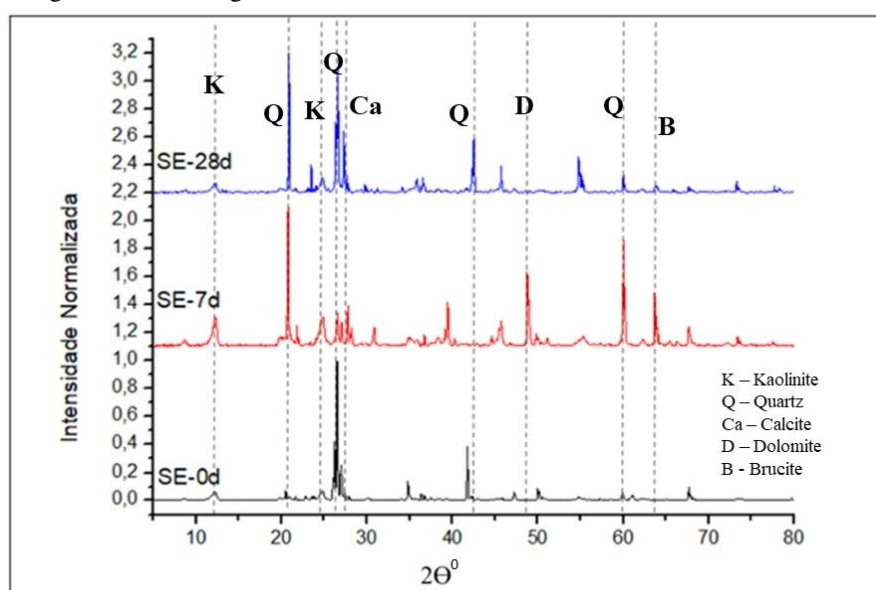
Constata-se, porém, que o melhoramento geotécnico proporcionado pela adição de escória ao solo arenoso (compósito SE) foi superior ao proporcionado pelo geossintético (compósito S-GSY). Quando a EAEP e o reforço geossintético são simultaneamente adicionados ao solo arenoso (compósito SE-GSY), constata-se um desempenho mecânico ainda superior, realçando as vantagens técnicas deste compósito ternário sob a perspectiva da propriedade mecânica investigada (RCNC). Scariot (2018), que analisou a inserção de geossintéticos em solos melhorados com cimento, concluiu que a técnica de estabilização química do solo, comparada às técnicas de reforço por geossintético, proporcionou melhor comportamento resistente nos ensaios da pesquisa, uma vez que a inserção de cimento no solo

promoveu resultados superiores de resistência do solo estudado.

Comparativamente à mistura solo arenoso-EAEP (compósito SE), os resultados sugerem que a inclusão do geossintético de reforço aumenta a resistência dos CPs para todas as idades de cura analisadas, culminando com uma tensão resistente média de 210,1 kPa aos 28 dias (aumento de 32% na RCNC).

A despeito do limitado ganho de resistência nas primeiras idades de cura (até 7 dias), este se mostrou progressivo com o tempo, culminando com o maior ganho de resistência aos 28 dias de cura. Após 7 dias de cura, observou-se (Figura 20) o início das reações de carbonatação da cal com o CO_2 atmosférico, evidenciado pelo aumento dos picos de dolomita e calcita (Ferreira *et al.*, 2019), além da formação de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), típica da hidratação da escória em meio alcalino (Housková *et al.*, 2016). A caulinita mostrou leve redução, indicando reatividade limitada devido à sua baixa concentração no solo. Aos 28 dias, houve intensificação dos picos de calcita (CaCO_3), dolomita, óxido de manganês e brucita, sinalizando o avanço das reações de carbonatação e hidratação (Kazmi *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2017).

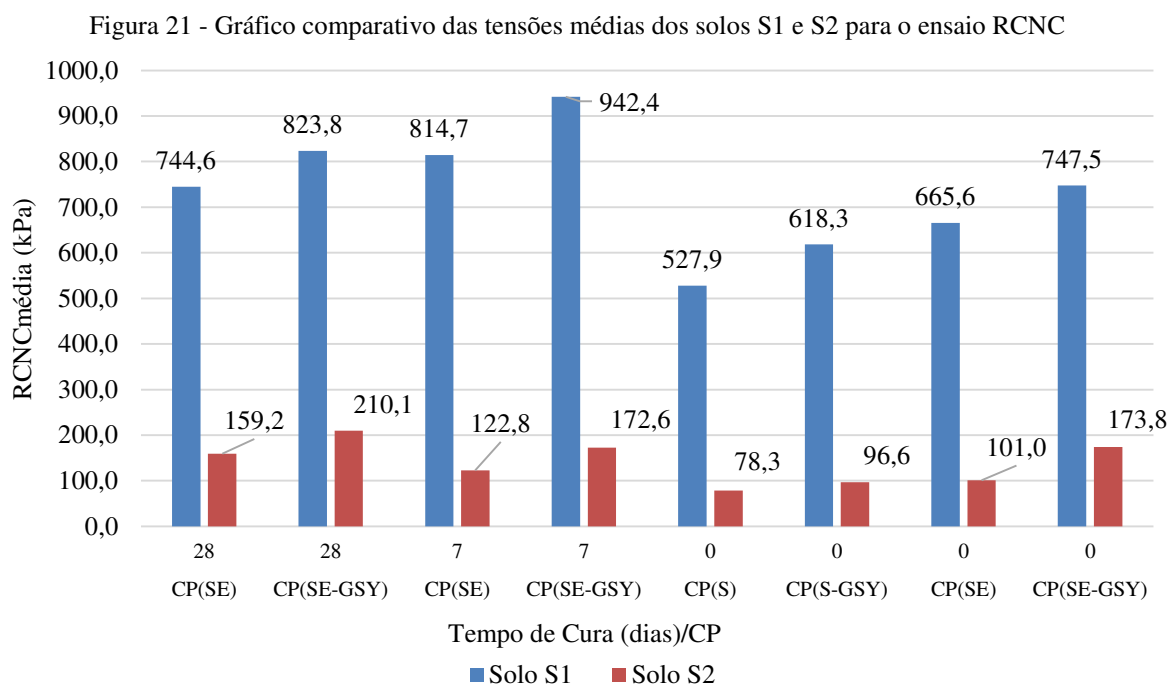
Figura 20 - Difratoograma da mistura Solo S2 e EAEP aos 0, 7 e 28 dias de cura



4.5.3 Resultados comparativos de RCNC entre misturas com solo S1 e solo S2

Observa-se que o Solo S1 apresenta valores significativamente mais altos de resistência em comparação ao Solo S2, em todas as idades e composições. Apesar dos valores absolutos de resistência serem maiores no Solo S1, o Solo S2 mostrou maior ganho relativo com o tempo de cura (Figura 21).

Lima Júnior *et al.* (2016), que pesquisaram a interação de materiais de reforço em solos de características arenosas e argilosas, concluíram que o solo arenoso promove com mais facilidade a transferência das tensões para os geossintéticos. Solos com grãos maiores tendem a apresentar maior resistência na interface solo-geossintético, proporcionando maior atrito interno (Chen *et al.*, 2022), e adicionalmente movimentam-se em direção aos grãos menores, formando uma massa firme entre o solo e o elemento geossintético (Teixeira, 2003).



Avaliando os padrões de ruptura das amostras de solo-EAEP não reforçadas, nota-se que, em ambos os solos, a ruptura se deu por trincamento, apresentando fissuras na base que se deslocaram verticalmente para cima (Figuras 22(a) e 22(b)).

Em corpos de prova onde há o carregamento vertical de compressão, há ruptura por cisalhamento, transmitindo, quando houver, os esforços ao elemento de reforço. Quando o geotêxtil possui boa aderência, todas as tensões levadas ao solo são mobilizadas por ele, aumentando as tensões suportadas (Portelinha, 2017).

Nota-se que, para as misturas solo-EAEP reforçadas, a continuidade das trincas é restringida exatamente na metade da altura do CP, formando uma superfície de ruptura ou plano de cisalhamento (Gerscovich, 2010) no local da inserção do geossintético (Figuras 23(a) e 23(b)).

Figura 22 – Padrão de ruptura dos corpos de prova em 28 dias de cura para as amostras SE de solo S1 (a) e SE de solo S2

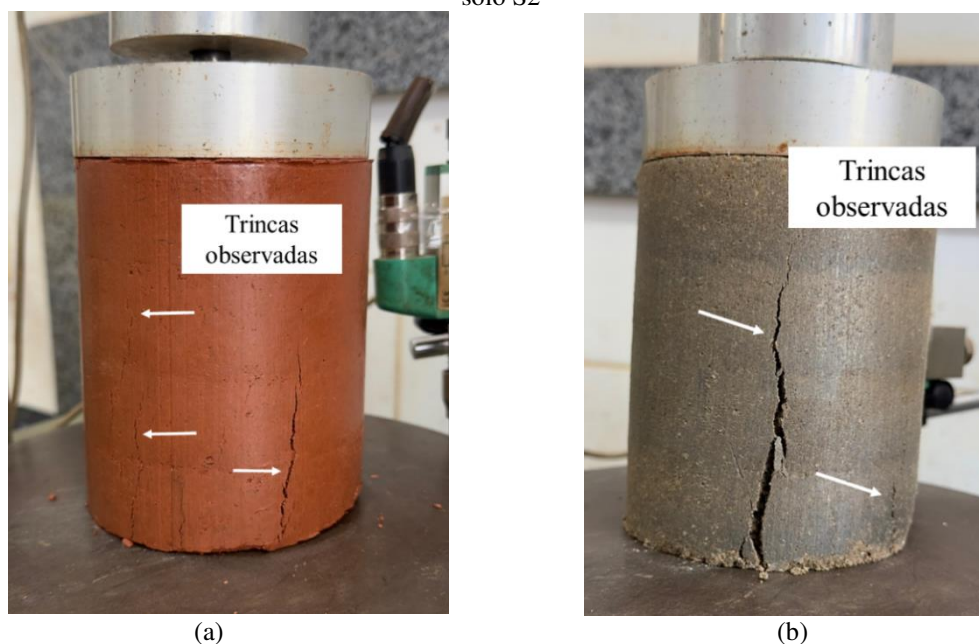
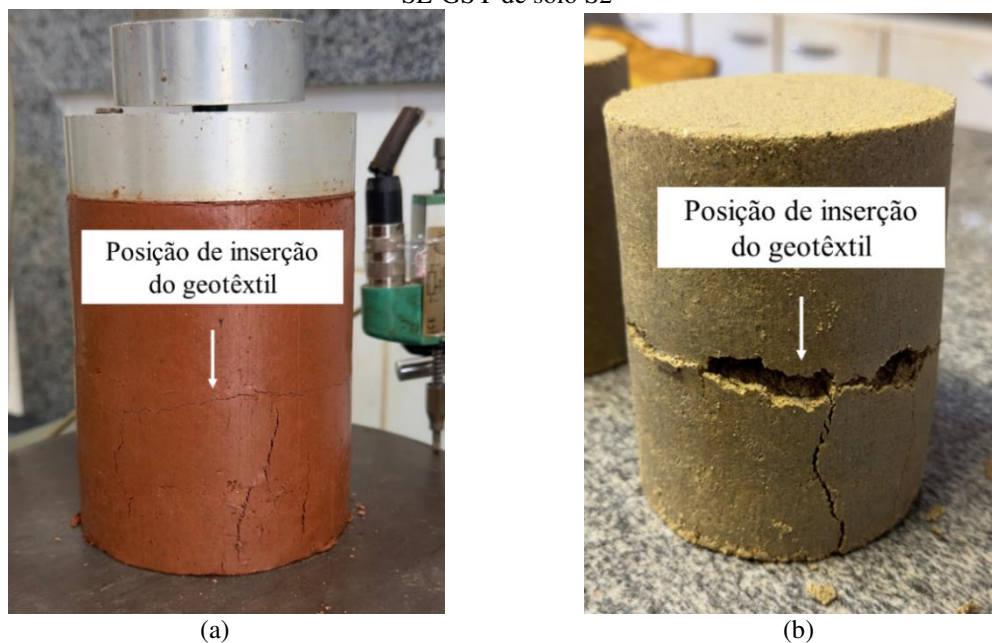


Figura 23 - Padrão de ruptura dos corpos de prova em 28 dias de cura para as amostras SE-GSY de solo S1 (a) e SE-GSY de solo S2



O acréscimo de tensão devido à inserção do elemento de reforço no sistema S1-EAEP foi de aproximadamente 10% (744,6 para 823,8 kPa), sendo de 24% (159,2 para 210,1 kPa) para o sistema S2-EAEP. Segundo Hosseinpour, Almeida e Riccio (2015) e Almeida (2021), ainda que tais resultados sejam positivos, eles podem, devido ao acréscimo não expressivo, indicar falhas na adequada ancoragem do sistema solo-reforço no ensaio RCNC (Teixeira, 2003; Naeini; Mirzaklanlari, 2008).

4.6 Ensaio CBR

4.6.1 Solo S1

Na Tabela 12, apresentam-se os resultados obtidos no ensaio CBR (índice CBR e Expansão) para o solo argiloso (S1).

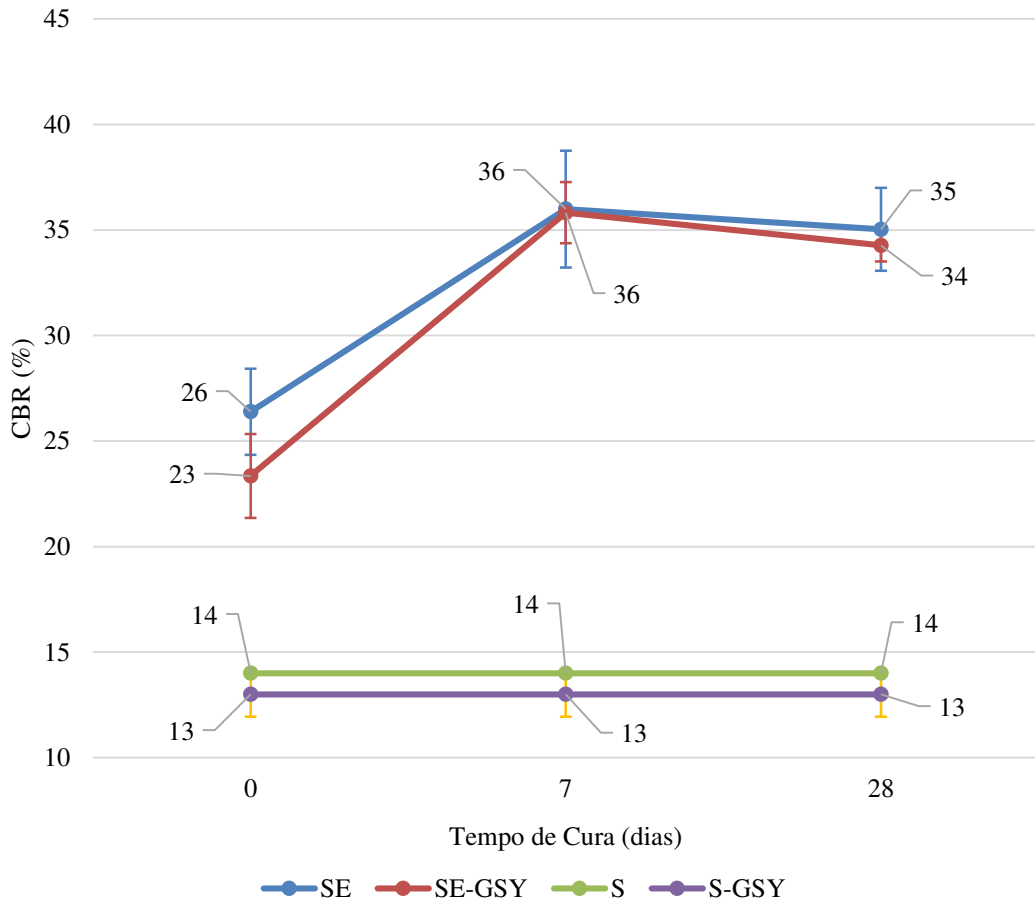
Tabela 12 – Resultados do ensaio CBR para o solo S1

Identificação	Tempo de cura (dias)	Expansão (%)	Expansão _{média} (%)	CBR (%)	CBR _{médio} (%)
CP1(SE)	28	0,01		34	
CP2(SE)	28	0,01	0,01	37	35
CP3(SE)	28	0,01		34	
CP4(SE-GSY)	28	0,01		34	
CP5(SE-GSY)	28	0,02	0,01	35	34
CP6(SE-GSY)	28	0,01		34	
CP7(SE)	7	0,03		39	
CP8(SE)	7	0,07	0,04	36	36
CP9(SE)	7	0,01		33	
CP10(SE-GSY)	7	0,03		37	
CP11(SE-GSY)	7	0,03	0,05	36	36
CP12(SE-GSY)	7	0,08		35	
CP13(S)	0	0,19		14	
CP14(S)	0	0,1	0,14	14	14
CP15(S)	0	0,13		14	
CP16(S-GSY)	0	0,12		12	
CP17(S-GSY)	0	0,12	0,13	13	13
CP18(S-GSY)	0	0,15		14	
CP19(SE)	0	0,08		29	
CP20(SE)	0	0,11	0,09	25	26
CP21(SE)	0	0,09		25	
CP22(SE-GSY)	0	0,11		24	
CP23(SE-GSY)	0	0,07	0,08	21	23
CP24(SE-GSY)	0	0,07		25	

Nota: * O coeficiente de variação máximo estabelecido foi de 15% para os resultados do ensaio CBR.

Na Figura 24, é possível identificar a variação do CBR médio dos corpos de prova de solo argiloso-EAEP reforçados (SE-GSY) e não reforçados (SE), em função dos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias. Adicionalmente, em linhas horizontais, são apresentados os resultados médios de CBR para as amostras de solo argiloso (S) e de solo argiloso com a inserção do geossintético (S-GSY).

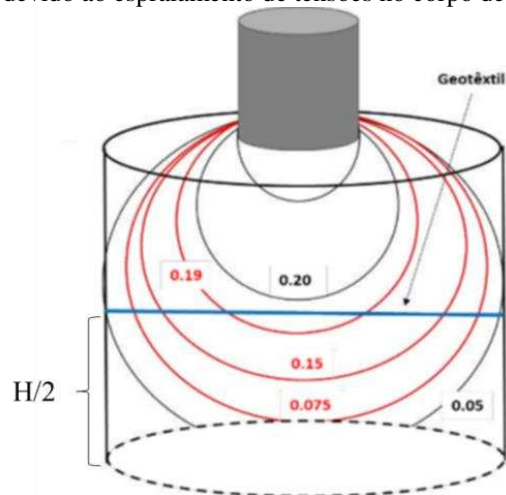
Figura 24 – Gráfico de variação do CBR médio em função do tempo de cura: solo argiloso (S1)



De um modo geral, nota-se que a inserção do reforço geossintético não foi capaz de promover a melhoria geotécnica do solo argiloso (S) e da mistura solo argiloso-EAEP (SE) para as particularidades da solicitação de puncionamento aplicada aos respectivos compósitos (S-GSY e SE-GSY) pelo ensaio CBR. Avelar (2020) comparou amostras argilosas reforçadas e não se observou uma tendência nítida na elevação ou redução do índice CBR, obtendo, em algumas amostras, utilizando a mesma energia de compactação, uma elevação da capacidade de suporte em amostras com o geossintético posicionada a $\frac{1}{4}$ da altura do CP.

O geotêxtil, quando posicionado a $\frac{1}{4}$ da altura total do CP (H/4), ou seja, mais próximo da superfície, recebe, aproximadamente, 52% da carga solicitante, valor mais elevado, comparado ao valor de 19% (Figura 25) de captação da carga pelo elemento de reforço, quando posicionado na metade da altura do corpo de prova (Love, 1929; Avelar, 2020).

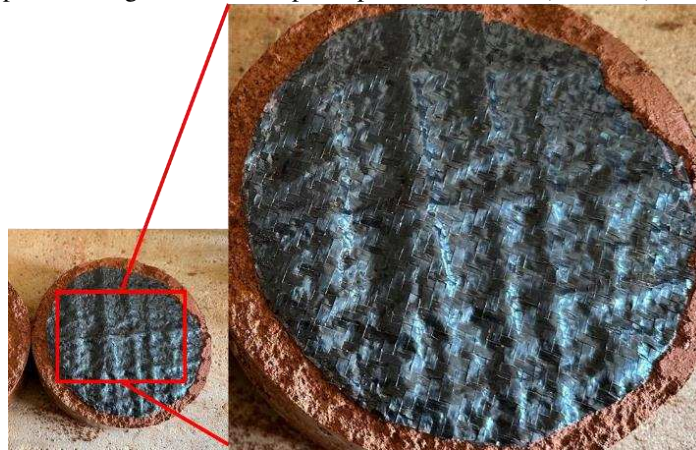
Figura 25 - Bulbo de tensões devido ao espriamento de tensões no corpo de prova reforçado a meia altura



Fonte: Adaptada de Avelar (2020).

A Figura 26 detalha a superfície do geotêxtil no corpo de prova de solo S1 (SE-GSY) após a conclusão do ensaio. Não há qualquer deformação visível capaz de induzir uma ocorrência de solitação do elemento de reforço, justificando a ausência de incremento no valor de CBR pelo reforço.

Figura 26 - Superfície do geotêxtil no corpo de prova de solo S1 (SE-GSY) aos 28 dias de cura



Nota: * Imagem capturada após execução do ensaio

A adição de EAEP ao solo se mostrou suficiente para promover a melhoria geotécnica do solo argiloso sem a necessidade de inserção do reforço geossintético. Comparativamente ao solo argiloso (S), incrementos de CBR no intervalo de 86% a 150% foram alcançados, comportamento que pode ser atribuído, em um primeiro momento (0 dia), ao aumento de peso específico aparente seco máximo e à diminuição do teor de umidade ótimo (Oluwasola *et al.*, 2020). Em curas mais avançadas (7 e 28 dias), o ganho de resistência em solos argilosos pode ser atribuído à cimentação promovida pelo mineral *wustite* (FeO) (Al-Amoudi *et al.*, 2017). A

escória atua como estabilizante, promovendo uma matriz mais densa e resistente (Chaiyaput; Ayawanna, 2021, Rodrigues *et al.*, 2023).

Observa-se uma tendência de aumento do CBR com o tempo de cura nos compósitos SE e SE-GSY, obviamente proporcionado pela presença da EAEP. Autores como Al-Amoudi *et al.* (2017), Aldeeky e Al Hattamleh (2017) e Sebbar *et al.* (2020) sugeriram que há a tendência de aumento do valor de CBR com o aumento do teor de EAEP.

Embora a variação do CBR entre 7 e 28 dias não seja tão expressiva, o ganho entre 0 e 7 dias é notável (incremento de 36%). Firat, Seyhan e Coemert (2011) e Aldeeky e Al Hattamleh (2017) analisaram os valores de CBR para misturas contendo subprodutos siderúrgicos e concluíram que o tempo de cura é de fundamental importância para o ganho de resistência CBR. Os resultados desta pesquisa indicam que a maior parte das reações de estabilização proporcionadas pela EAEP e capturadas pelo índice CBR ocorrem nos primeiros dias de cura.

Os valores de Expansão foram, em geral, baixos, indicando a boa estabilidade volumétrica dos materiais investigados (solo e compósitos). Apesar da baixa diferença estatística entre os respectivos valores de Expansão média de cada material investigado, constata-se que os compósitos com EAEP (SE e SE-GSY) apresentaram expansões ligeiramente inferiores às apresentadas pelos materiais destituídos de EAEP. Estudos relataram que a diminuição da expansão com a adição da EAEP é devida à ocorrência da troca catiônica entre os íons presentes nos dois materiais (solo e EAEP), que gera floculação das partículas, alterando sua estrutura, enquanto outros atribuíram a redução da expansão com o aumento do teor de EAEP à diminuição da plasticidade da mistura (Parsaei *et al.*, 2021; Aldeeky; Al Hattamleh, 2017).

4.6.2 Solo S2

Na Tabela 13, apresentam-se os resultados obtidos no ensaio CBR (índice CBR e Expansão) para o solo arenoso (S2).

Tabela 13 – Resultados do ensaio CBR para o solo arenoso (S2)

Identificação	Tempo de cura (dias)	Expansão (%)	Expansão _{média} (%)	CBR (%)	CBR _{médio} (%)
CP1(SE)	28	0,01		24	
CP2(SE)	28	0,01	0,01	26	25
CP3(SE)	28	0,01		24	
CP4(SE-GSY)	28	0,01		21	
CP5(SE-GSY)	28	0,01	0,01	25	23
CP6(SE-GSY)	28	0,01		23	

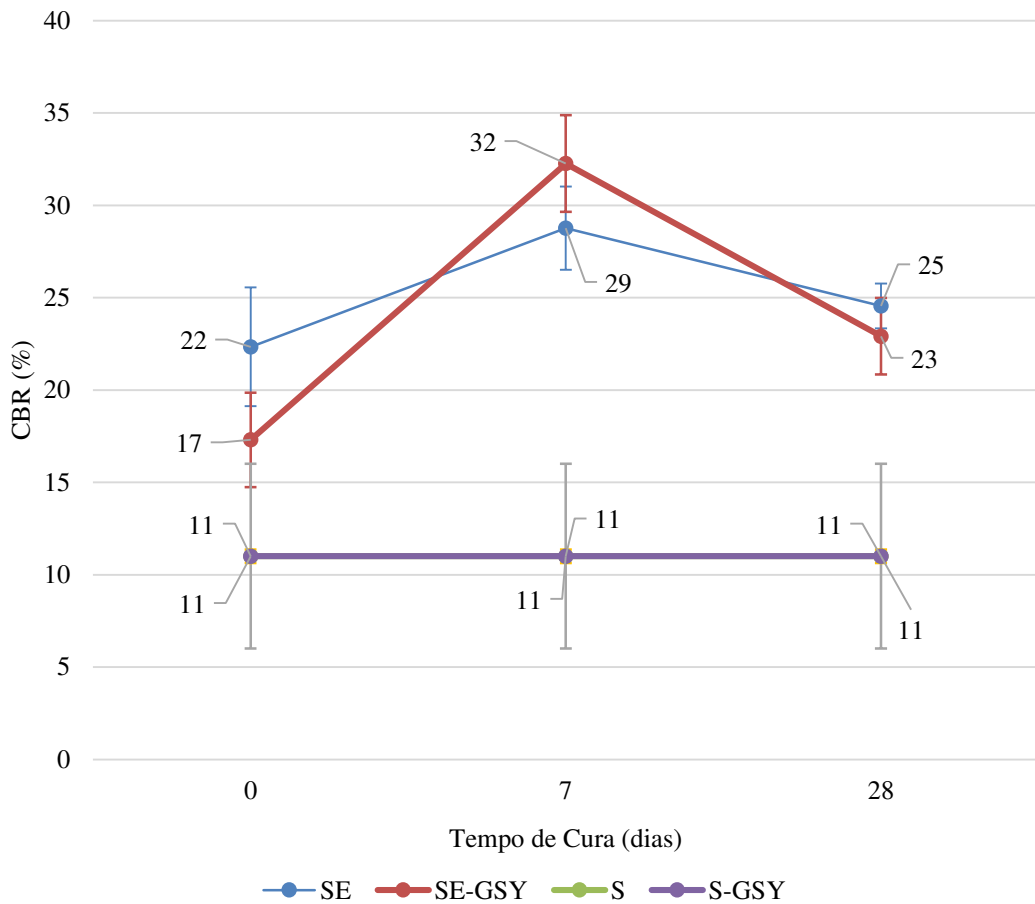
Tabela 13 - Resultados do ensaio CBR para o solo arenoso (S2) (continuação)

CP7(SE)	7	0,03		28	
CP8(SE)	7	0,02	0,02	27	29
CP9(SE)	7	0,01		31	
CP10(SE-GSY)	7	0,01		35	
CP11(SE-GSY)	7	0,01	0,01	30	32
CP12(SE-GSY)	7	0,01		32	
CP13(S)	0	0,13		13	
CP14(S)	0	0,06	0,11	11	11
CP15(S)	0	0,13		10	
CP16(S-GSY)	0	0,07		11	
CP17(S-GSY)	0	0,06	0,06	11	11
CP18(S-GSY)	0	0,05		11	
CP19(SE)	0	0,05		26	
CP20(SE)	0	0,03	0,04	19	22
CP21(SE)	0	0,03		22	
CP22(SE-GSY)	0	0,02		16	
CP23(SE-GSY)	0	0,12	0,06	20	17
CP24(SE-GSY)	0	0,03		16	

Nota: * O coeficiente de variação máximo estabelecido foi de 15% para os resultados do ensaio CBR.

Na Figura 27, é possível identificar a variação do CBR médio dos corpos de prova de solo arenoso-EAEP reforçados (SE-GSY) e não reforçados (SE), em função dos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias. Adicionalmente, em linhas horizontais, são apresentados os resultados médios de CBR para as amostras de solo arenoso (S) e de solo arenoso com a inserção do geossintético (S-GSY).

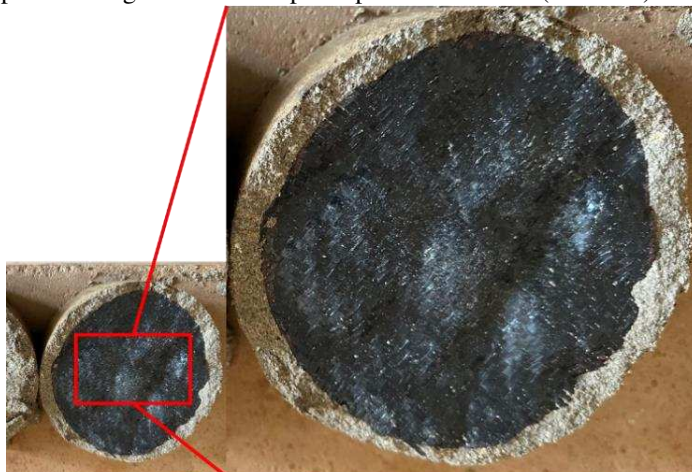
Figura 27 – Gráfico de variação do CBR médio em função do tempo de cura: solo arenoso (S2)



Nota: * As linhas S e S-GSY são coincidentes no gráfico (valor de 11%)

Nota-se que a inserção do reforço geossintético não foi capaz de promover a melhoria geotécnica do solo arenoso (S) e da mistura solo arenoso-EAEP (SE) para as particularidades da solicitação de puncionamento aplicada aos respectivos compósitos (S-GSY e SE-GSY) pelo ensaio CBR. Assim como aconteceu para o solo argiloso, é possível que as tensões causadas pelo pistão CBR não tenham atingido de forma eficiente o elemento de reforço, posicionado em meia altura (Love, 1929; Avelar, 2020), não havendo qualquer deformação visível que pudesse induzir uma ocorrência de solicitação do elemento de reforço, justificando a ausência de incremento no valor de CBR pelo reforço (Figura 28).

Figura 28 - Superfície do geotêxtil no corpo de prova de solo S2 (SE-GSY) aos 28 dias de cura



Nota: * Imagem capturada após execução do ensaio

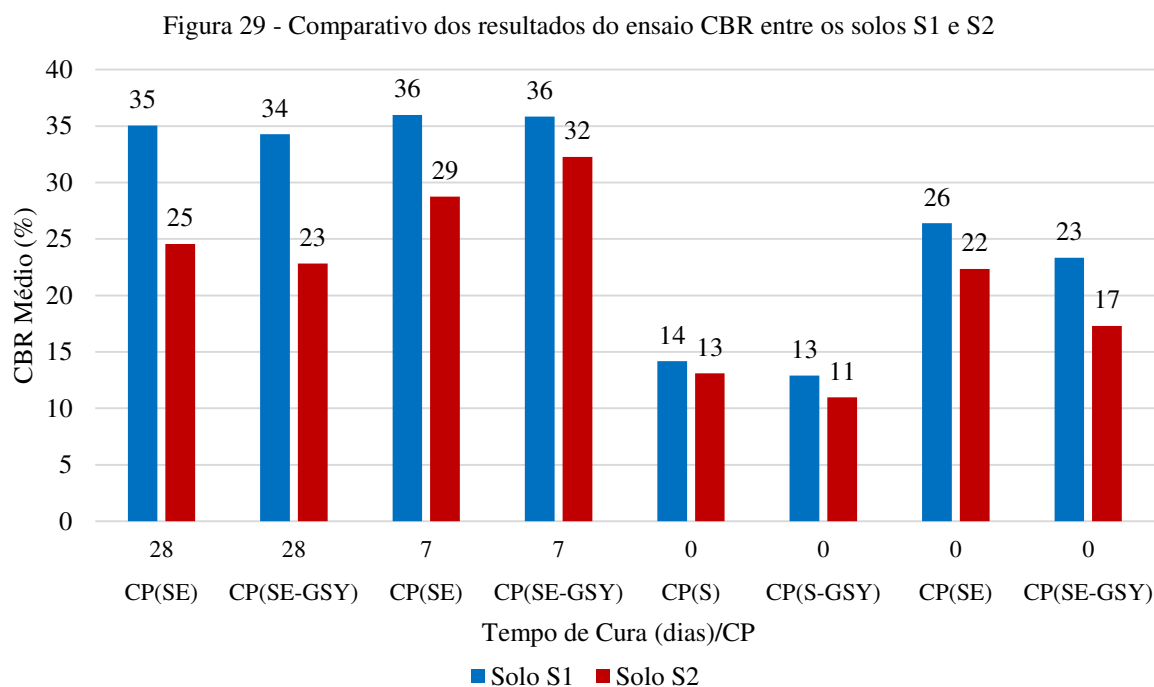
A despeito da melhoria pontual proporcionada pelo reforço à mistura solo arenoso-EAEP aos 7 dias de cura, não há uma diferença estatisticamente significativa entre os respectivos valores de CBR dos compósitos SE e SE-GSY nesta idade. A mesma tendência estatística se constata para a cura aos 28 dias. Conclui-se experimentalmente que a adição de EAEP ao solo se mostrou suficiente para promover a melhoria geotécnica do solo arenoso sem a necessidade de inserção do reforço geossintético. Comparativamente ao solo arenoso (S), incrementos de CBR no intervalo de 69% a 123% foram alcançados.

Os incrementos de CBR do solo arenoso devido à EAEP, segundo Al-Homidy *et al.* (2017), são devidos ao aumento do peso específico aparente seco máximo e à diminuição do teor de umidade ótimo, o que ocorre devido à melhor graduação proporcionada pela presença de grãos finos presentes na EAEP que preenchem os vazios deixados pelos grãos maiores do material granular. Os autores ainda reforçaram que, para misturas de solo arenoso, 2% de cimento e escória (entre 5 e 30%), quanto maior o teor de escória maior a formação de compostos cimentantes.

Os valores de Expansão foram, em geral, baixos, indicando a boa estabilidade volumétrica dos materiais investigados (solo e compósitos). A despeito da baixa diferença estatística entre os respectivos valores de Expansão média de cada material investigado, constata-se que os compósitos com EAEP (SE e SE-GSY) apresentaram expansões ligeiramente inferiores àquelas apresentadas pelos materiais destituídos de EAEP, particularmente após a exposição destes compósitos ao processo de cura. Outros autores também observaram esta redução na expansão (Zumrawi; Babikir, 2017; Ismail; Awad; Mwafy, 2019).

4.6.3 Resultados comparativos de CBR entre misturas com solo S1 e solo S2

A Figura 29 resume os resultados dos ensaios de CBR para os materiais envolvendo os solos S1 (argiloso) e S2 (arenoso) utilizados nesta pesquisa.



Observa-se que o Solo S1 apresenta valores significativamente mais altos de CBR em comparação ao Solo S2, em todas as idades e composições. Nos resultados comparativos mostrados, fica evidente que a introdução do geotêxtil no solo S1 e no solo S2, tal como evidenciado nos estudos de Avelar (2020), não contribuiu para o aumento da resistência, ou seja, a mobilização do atrito entre os materiais não foi suficientemente elevada para o surgimento dos mecanismos de reforço. Ainda, de acordo com Gor *et al.* (2013), o cilindro padrão do CBR não fornece espaço lateral suficiente para que o desenvolvimento dos mecanismos de reforço seja completo.

4.7 Ensaio de Módulo de Resiliência

4.7.1 Solo S1

Na Tabela 14, apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de Módulo de Resiliência para o solo argiloso (S1).

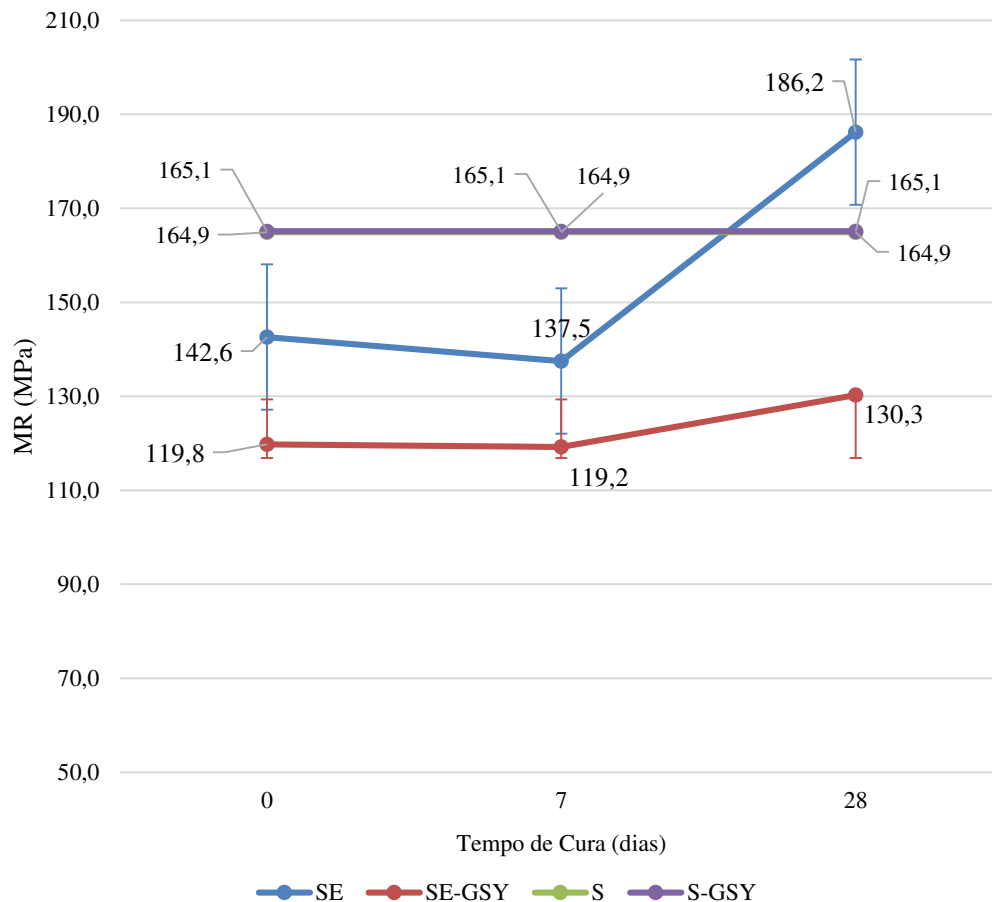
Tabela 14 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) para o solo argiloso (S1)

Identificação	Tempo de cura (dias)	MR (MPa)*
CP1(SE)	28	186,2
CP2(SE-GSY)	28	130,3
CP3(SE)	7	137,5
CP4(SE-GSY)	7	119,2
CP5(S)	0	164,9
CP6(S-GSY)	0	165,1
CP7(SE)	0	142,6
CP8(SE-GSY)	0	119,8

Nota: * Valor referente à média das determinações dos pares de tensões medidas no ensaio de acordo com ME 134 (DNIT, 2018a).

Na Figura 30, é possível identificar a variação do MR dos corpos de prova de solo argiloso-EAEP reforçados (SE-GSY) e não reforçados (SE), em função dos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias. Adicionalmente, em linhas horizontais, são apresentados os resultados de MR para as amostras de solo argiloso (S) e de solo argiloso com a inserção do geossintético (S-GSY).

Figura 30 – Gráfico de variação do MR em função do tempo de cura: solo argiloso (S1)



Nota: * As linhas S e S-GSY são coincidentes no gráfico (valor de aproximadamente 165 MPa)

Constata-se que a inserção do reforço geossintético ao solo argiloso (compósito S-GSY) não foi capaz de promover melhoria na rigidez resiliente do solo (S), não havendo diferença estatística significativa entre seus respectivos valores de MR. Wei, Yu e Yin (2007) realizaram ensaios de módulo de resiliência em solos argilosos reforçados com geossintéticos. Os resultados mostraram que, em níveis baixos de deformação axial, a resistência dos solos reforçados era até inferior à dos não reforçados, dada a não solicitação do elemento de reforço.

O compósito solo argiloso-EAEP-geossintético (SE-GSY) não se mostrou tecnicamente viável, apresentando valores de MR inferiores aos apresentados pelo solo argiloso (S). Em estudo semelhante, Casagrande, Teixeira e Ferreira (2021) analisaram o efeito do teor e tipo de cimento no módulo de resiliência de solo estabilizado quimicamente e concluíram que algumas amostras não tiveram incrementos no módulo de resiliência. Dificuldades no estabelecimento de correlações satisfatórias também foram reportadas por Rocha e Rezende (2017) para solos melhorados. As autoras afirmam que este comportamento não esperado pode estar relacionado às condições de compactação, problemas na realização dos ensaios e limitações da norma, enfatizando a necessidade de maior controle na moldagem dos corpos de prova estabilizados.

Para as particularidades do ensaio de MR, presume-se que a incapacidade do reforço geossintético de promover a melhoria geotécnica do solo (S) e do solo argiloso-EAEP (SE) pode estar relacionada à interferência do geossintético na compactação (Werk, 2000) e/ou à formação de plano de descontinuidade que altera a propagação das tensões (Santos; Araújo, 2015; Chiarello, 2022).

Pelos resultados, vislumbra-se o potencial de melhoramento geotécnico do solo argiloso pela adição de EAEP (compósito SE) em idades mais avançadas, indicando a capacidade do processo de cura de incrementar o MR do solo ao longo do tempo (aumento de 13% aos 28 dias de cura). O aumento de MR com maiores tempos de cura, assim como na pesquisa de Rodrigues (2023), pode ser atribuído à formação de compostos pozolânicos.

4.7.2 Solo S2

Na Tabela 15, apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de Módulo de Resiliência para o solo arenoso (S2).

Tabela 15 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) para o solo arenoso (S2)

Identificação	Tempo de cura (dias)	MR (MPa)*
CP1(SE)	28	66,2
CP2(SE-GSY)	28	61,6

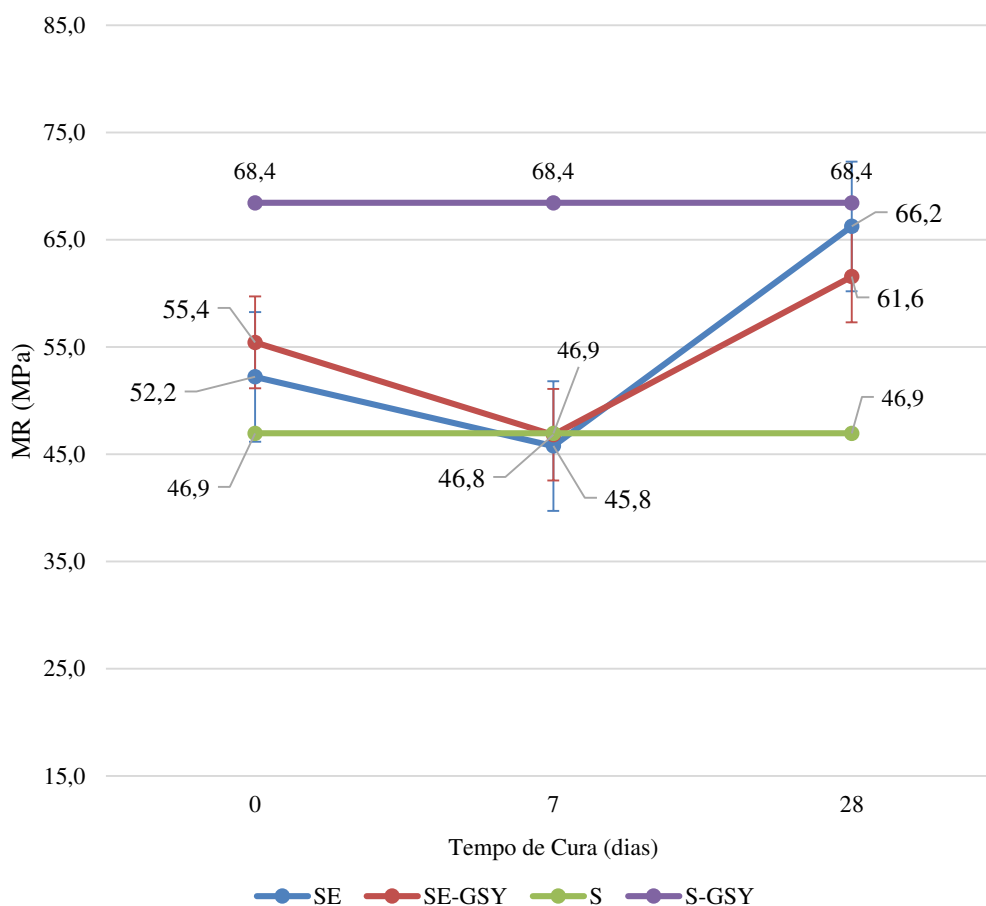
Tabela 15 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) para o solo arenoso (S2) (continuação)

CP3(SE)	7	45,8
CP4(SE-GSY)	7	46,8
CP5(S)	0	46,9
CP6(S-GSY)	0	68,4
CP7(SE)	0	52,2
CP8(SE-GSY)	0	55,4

Nota: * Valor referente à média das determinações dos pares de tensões medidas no ensaio de acordo com ME 134 (DNIT, 2018a).

Na Figura 31, é possível identificar a variação do MR dos corpos de prova de solo arenoso-EAEP reforçados (SE-GSY) e não reforçados (SE), em função dos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias. Adicionalmente, em linhas horizontais, são apresentados os resultados de MR para as amostras de solo arenoso (S) e de solo arenoso com a inserção do geossintético (S-GSY).

Figura 31 – Gráfico de variação do MR em função do tempo de cura: solo arenoso (S2)



Constata-se, de um modo geral, que os compósitos investigados (S-GSY, SE e SE-GSY) foram capazes de incrementar a rigidez resiliente do solo arenoso. O melhor desempenho foi

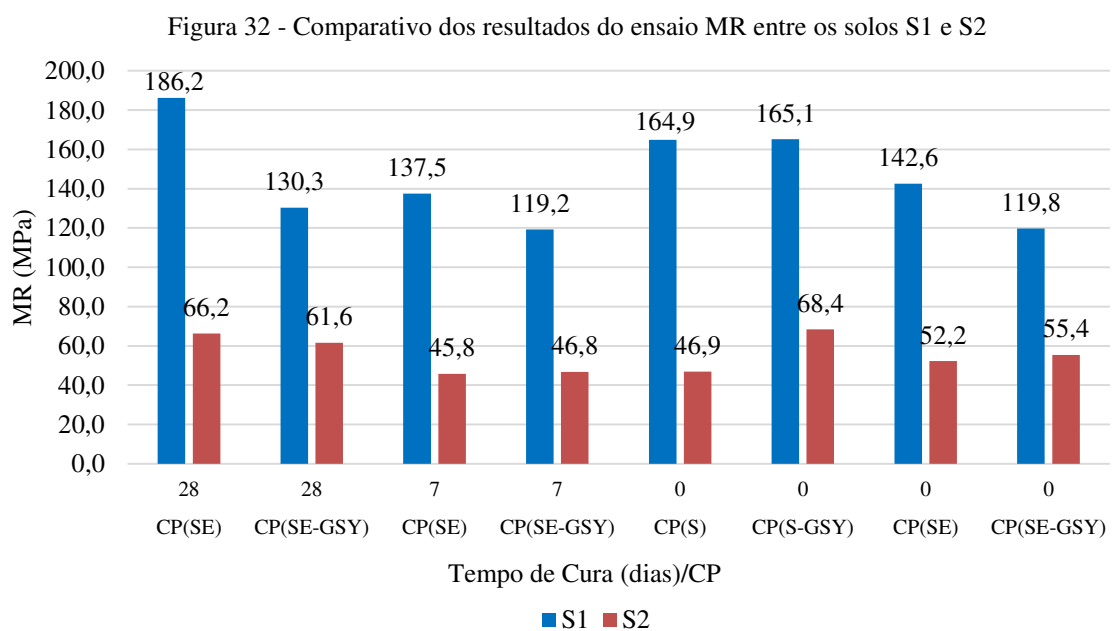
proporcionado pelo compósito S-GSY.

A despeito da melhoria geotécnica promovida pelo compósito SE-GSY, esta se mostrou estatisticamente similar à promovida pelo compósito SE, indicando que o reforço geossintético não se mostrou capaz de melhorar a resposta resiliente da mistura solo arenoso-EAEP, não se justificando, portanto, a necessidade técnica de inclusão do geossintético nesta mistura. Estudos semelhantes concluíram que o reforço geossintético é mais eficaz na redução da deformação permanente do que no aumento do módulo de resiliência das amostras (Abu-Farsakh; Nazzal; Mohammad, 2007; Yang; Han, 2013).

O compósito SE apresentou uma nítida tendência de incremento do MR em idades de cura mais avançadas, a despeito da queda pontual aos 7 dias de cura, o que também foi constatado para o compósito SE-GSY. Esta queda, porém, se deu para magnitudes de MR similares à apresentada pelo solo arenoso (S). Estudos de Galindo (2022) e Lopes *et al.* (2022) registraram melhoras consideráveis no comportamento resiliente de solos com características arenosas após a adição dos resíduos ao solo. Segundo Lopes *et al.* (2024), os benefícios obtidos podem ser atribuídos, principalmente, a melhorias proporcionadas pelos produtos das reações cimentícias.

4.7.3 Resultados comparativos de MR entre misturas com solo S1 e solo S2

A Figura 32 resume os resultados dos ensaios de MR para os materiais envolvendo os solos S1 (argiloso) e S2 (arenoso) utilizados nesta pesquisa.



A Figura 32 indica que os compósitos (SE) para os solos S1 e S2 apresentam aumento nos valores de módulo de resiliência (MR) em 28 dias de cura. Estudo de Zhang *et al.* (2023) comprovou que a adição de escória melhora significativamente a resistência ao cisalhamento e o módulo de resiliência de solos, principalmente pelo aumento do ângulo de atrito interno.

De modo geral, a presença do geossintético nos corpos de prova com escória, tanto em S1 como em S2, não conseguiu melhorias de MR, sugerindo que a interação entre escória e geossintético pode alterar o comportamento mecânico do material. Em contraste, amostras com solo natural sem cura (S) e com geossintético (S-GSY) apresentaram MR mais altos.

Assim como Da Trindade, De Carvalho e Barbosa (2003), o módulo de resiliência de ambos os solos estabilizados mostrou-se variável para os diferentes níveis de tensão aplicados durante os ensaios de MR. De acordo com Parreira *et al.* (1998), a condição de carregamento, o estado de tensão e a natureza do solo e das misturas estabilizadas quimicamente estão entre um grande número de fatores que podem causar variações no valor do módulo de resiliência.

5 CONCLUSÕES

Como forma de avaliar a ação combinada entre estabilização química por resíduos siderúrgicos e reforço mecânico por geossintéticos, a pesquisa teve como objetivo principal avaliar o efeito da inserção de geotêxtil tecido de baixa resistência à tração nas propriedades mecânicas de misturas de solos compactados com diferentes teores de EAEP.

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

- O tempo de cura foi um fator primordial para o ganho de resistência nos solos misturados com escória utilizados nesta pesquisa. A mistura de solo S1 (argiloso) e escória demonstrou ganhos expressivos de resistência até os 7 dias de cura. No entanto, observou-se uma leve queda nos valores de resistência aos 28 dias, principalmente no ensaio de RCNC (queda de 8,6%), possivelmente devido à reorganização mineralógica e à transformação das fases cimentantes. A mistura de solo S2 (arenoso) e escória apresentou um comportamento mais estável e gradual, apresentando, em todos os ensaios, valores de resistência que aumentaram de forma contínua com o tempo de cura;
- A inserção de geotêxtil de baixa rigidez no centro dos corpos de prova aumentou a resistência à compressão dos dois solos utilizados para o ensaio de RCNC (aumento de 9,6% para a mistura de solo S1 e escória e de 31,9% para a mistura de solo S2 e escória, ambos aos 28 dias de cura). O Solo S2 mostrou maior ganho relativo com o tempo de cura, para o mesmo ensaio;
- A inserção do reforço geossintético não foi capaz de promover a melhoria geotécnica dos solos argiloso S1 e arenoso S2 e das misturas solo-EAEP (SE) para as particularidades da sollicitação de puncionamento aplicada aos respectivos compósitos (S-GSY e SE-GSY) pelo ensaio CBR (queda de 2,85% para a mistura de solo S1 e escória e queda de 8% para a mistura de solo S2 e escória, ambos aos 28 dias de cura), não havendo qualquer deformação visível que pudesse induzir uma ocorrência de sollicitação do elemento de reforço;
- Os corpos de prova dos compósitos SE-GSY dos solos S1 e S2, submetidos ao ensaio de Módulo de Resiliência (MR), não apresentaram melhora consistente com

a inclusão do geossintético, e, em alguns casos, o desempenho foi inferior.

O tema desta dissertação insere-se em uma linha de pesquisa em expansão, voltada para a valorização de resíduos industriais em aplicações geotécnicas. Contudo, a investigação da interação conjunta entre escória de aciaria e geossintéticos, com ênfase em seu comportamento mecânico, ainda permanece incipiente na literatura, necessitando de estudos adicionais. Nesse contexto, destacam-se como relevantes abordagens futuras, por exemplo, a avaliação do efeito da variação da energia de compactação sobre a mistura e a realização de ensaios específicos de arrancamento e de cisalhamento direto em interface, capazes de fornecer parâmetros mais robustos para a compreensão dos mecanismos de interação solo–escória–geossintético.

REFERÊNCIAS

- ABU-FARSAKH, Murad Y.; NAZZAL, Munir D.; MOHAMMAD, Louay N. Effect of reinforcement on resilient and permanent deformations of base course material. **Transportation Research Record**, n. 2004, p. 120–131, 2007
- AL-AMOUDI, O. S. B.; AL-HOMIDY, A. A.; MASLEHUDDIN, M.; SALEH, T. A. Method and Mechanisms of Soil Stabilization Using Electric Arc Furnace Dust. **Scientific Reports**, 7, n. 1, p. 46676, 2017/04/28 2017.
- ALDEEKY, H.; AL HATTAMLEH, O. Experimental study on the utilization of fine steel slag on stabilizing high plastic subgrade soil. **Advances in Civil Engineering**, 11p., 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9230279>.
- AL-HOMIDY, A. A.; AL-AMOUDI, O.; MASLEHUDDIN, M.; SALEH, T. A. Stabilisation of dune sand using electric arc furnace dust. **International Journal of Pavement Engineering**, 18, n. 6, p. 513-520, 2017.
- ALMEIDA, D. C. **Análise do comportamento mecânico de sistemas de solos reforçados com geotêxteis**. (Dissertação) Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2021.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 145-91**: Standard Specification for Classification of Soils and Soil Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes Washington, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2487-17**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Pensilvânia ASTM International, 2017.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM C618-19**, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- ARRIBAS, I.; SANTAMARIA, A.; RUIZ, E.; ORTEGA-LOPEZ, V. et al. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. **Construction and Building Materials**, 90, p. 68-79, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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. **NBR 12025**: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio. Rio de

Janeiro. 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n° 200). Rio de Janeiro. 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de 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 etileno glicol. Rio de Janeiro. 2012d.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. 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 5753**: Cimento Portland - Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro. 2016d.

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 6502**: Solos e rochas - Terminologia. Rio de Janeiro. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro. 2024a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2024b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro. 2025a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458** - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2025b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro. 2025c.

AVELAR, M. G. de. **Abordagem experimental da interação solo tropical–reforço geossintético sob a perspectiva de aplicação em obras de terra**. (Dissertação) Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

AZADEGAN, O.; POUREBRAHIM, Gh. R. Unconfined Compressive Strength and Elasticity Modulus of Lime and Cement Treated Soils. In: 3rd International Conference on Seismic Retrofitting (ICSR), 2010, Tabriz. *Proceedings...* Tabriz, Iran, 2010.

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, p. 4251, 2020.

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

CASAGRANDE, M. D. T.; TEIXEIRA, R. S.; FERREIRA, J. W. S. Efeito do teor e tipo de cimento no módulo de resiliência de solo arenoso estabilizado quimicamente. **Ciências exatas e da Terra e Engenharias**, 2021.

CARDOSO, R. R. **Aterro estruturado com colunas de jet grouting e reforçado com geossintéticos construído sobre solo mole: caso de obra do encontro de ponte sobre o rio Curimataú, BR-101/RN**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2018. 2018.

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

CHAIYAPUT, S.; AYAWANNA, J. Lateritic soil stabilization by addition of steel slags. **Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA**, v.52, n.3, p.66-69, 2021.

CHAIYAPUT, S. et al. Utilization of Waste Material for Stabilization of Lateritic Soil. In: **International Conference on Construction Resources for Environmentally Sustainable Technologies**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. p.355-362.

CHEN, Jian-Nan *et al.* Effects of grain size and moisture content on the strength of geogrid-reinforced sand in direct shear mode. **International Journal of Geomechanics**, v. 22, n. 4, p. 04022006, 2022.

CHIARELLO, G. P. **Interação de interfaces entre solo e geomembranas por meio de ensaios de cisalhamento direto**. Dissertação (Mestrado), universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio Grande do Sul, 2022.

CHOMPOORAT, T., et al. Alkali-activated controlled low-strength material utilizing high-calcium fly ash and steel slag for use as pavement materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.33, n.8, p. 04021178, 2021.

CONSTANCIO, Lucas Amarante. Capacidade de carga de um modelo de fundação superficial em solo arenoso fofo com reforço de geotêxtil. **Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas**, 2010.

CONTRERAS, J. A. Llatas; PICO, Á., A., R. Use of steel slag to improve the mechanical properties of subgrades in clayey soils. **DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín**, v.91, n.231, p.128-134, 2024.

CRUZ, M. C. R. G.; BATISTA, L.; CORRÊA, B. N. de C.; QUEIROZ, L. C. Coprocessamento: reutilização de resíduos industriais na produção de cimento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO CIMENTO, 2024. **Anais** [...]. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbcc/article/view/3671>. Acesso em: 12 maio 2025.

DA SILVA, Taciano Oliveira et al. Use of steel waste for the application in urban paving. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 41, p. e37596, 2019.

DA TRINDADE, Tiago Pinto; DE CARVALHO, Carlos Alexandre Braz; BARBOSA, Almeida. Estudo dos Módulos de Resiliência de Dois Solos Tropicais no Estado Natural e Quando Estabilizados com Cimento. **Revista Engenharia Civil-Um**, n. 17, p. 19-30, 2003.

DARWISH, Ghulam Sakhi; TANGRI, Aman Preet; HAJIZADA, Baryalai. Effects of ground granulated blast furnace slag & lime on the engineering properties of clayey soil: a review. **International Journal of Technical Innovation In Modern Engineering & Science**, v. 5, n. 5, 2019.

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

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-CLA 259**. Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova

compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996b.

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

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

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

DOS SANTOS, C. E. et al. Capacidade de carga de Solo reforçado com Geossintéticos. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 11558-11579, 2021.

FERREIRA, A. L. S. et al. Avaliação da reatividade pozolânica de solos com adição de cal. **Revista Matéria**, v.24, n.4, p.1–14, 2019.

FERREIRA, F. H. N. P. **Dosagem Estatística de misturas solo-resíduos siderúrgicos visando a aplicação em camadas estruturais de pavimentos asfálticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 87. 2023.

FIRAT, S.; COEMERT, A. Curing time effects on CBR of stabilized kaoline with fly ash, lime and cement. **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, v. 26, n. 4, 2011.

GALINDO, J. R. F. **Estabilização de solos tropicais com resíduos da construção civil e escória de aciaria para uso em pavimentação**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Viçosa, 2022.

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.48, p.101361, 2024.

GERSCOVICH, D. M. S. **Apostila Estruturas de Contenção, Empuxos de Terra**. Faculdade de Engenharia/UERJ. Departamento de Estruturas e Fundações. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2010.

GUEDES, E. S.; R. et al. Análise do comportamento de um solo arenoso reforçado com geogrelhas derivadas de materiais alternativos. **Anais da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT) do IFS**, v. 2, n. 1, p. 388-392, 2020.

GOR, V.S.; THAKUR, L.S.; BIYANI, K.R. Study of typical characteristic of expansive subgrade with geotextiles and cushion materials. **Proceedings...Seventh International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering**. 2013.

GU, L. et al. Stabilization of Fluidic Silty Sands with Cement and Steel Slag. **Buildings**, v. 13, n. 11, 2705, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/11/2705>. Acesso em:

12 maio 2025.

HOSSAIN, K. M. A.; MOL, L. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. **Construction and Building Materials**, v.25, n.8, p.3495-3501, 2011.

HOSSEINPOUR, I.; ALMEIDA, M.S.S.; RICCIO, M. Full- scale load test and finite-element analysis of soft ground improved by geotextile-encased granular columns. **Geosynthetics International**. v.22. n.6. London, England, 2015.

HOUSKOVÁ, P. et al. Pozzolanic reaction in blended cement pastes with metallurgical slag. **Cement and Concrete Composites**, v.65, p.82-92, 2016.

HUESKER BRASIL. Basetrac®: Reforço de base – simplificado pela HUESKER. São José dos Campos: HUESKER Brasil, 2025. Disponível em: https://www.huesker.com.br/fileadmin/media/Brochures/BR/SB-PB_Basetrac_BR.pdf. Acesso em: 17 maio 2025.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Anuário Estatístico**. Rio de Janeiro-RJ: Instituto Aço Brasil, 2024, 99p.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Relatório de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro - RJ: Instituto Aço Brasil. Disponível em: https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/09/2020_relatorio-de-sustentabilidade.pdf, 2020. Acesso em: 27 de março de 2025.

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

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

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

KAZMI, S. M. S. *et al.* Mineralogical transformation and strength development in industrial by-product stabilized soils. **Construction and Building Materials**, v. 210, p. 149–161, 2019.

KIEUSH, L. et al. Roadmap for recycling practices and resource utilization in the iron and steelmaking industry: a case studies. **Matériaux & Techniques**, Paris, v. 112, n. 5, 2024. Disponível em: https://www.mattechjournal.org/articles/mattech/full_html/2024/05/mt20240007/mt20240007.html. Acesso em: 12 maio 2025.

KUMAR, R.; KUMAR, P. Geogrid-reinforced clay soil with waste foundry sand: experimental study. **CivilEng**, v. 6, n. 2, p. 1–15, 2025.

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

LIMA JÚNIOR, P. R. G. et al. **Dimensionamento de estruturas de contenção em solo reforçado com geossintético e face elaborada com blocos segmentais de concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Alagoas, 2016.

LIMA, R. R. F. de. A aplicação de resíduos no desenvolvimento de produtos sustentáveis na indústria cerâmica. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. e262801, 2023. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/journal/ci/article/doi/10.4322/cerind.2024.035>. Acesso em: 12 maio 2025.

LI, M.; WANG, Q.; YANG, J.; GUO, X. et al. Strength and Mechanism of Carbonated Solidified Clay with Steel Slag Curing Agent. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 25, n.3, p.805-821, 2021/03/01 2021.

LOUREIRO, C. D. A. *et al.* Steel Slag and Recycled Concrete Aggregates: Replacing Quarries to Supply Sustainable Materials for the Asphalt Paving Industry. **Sustainability**, v. 14, n. 9, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/5022>. Acesso em: 12 maio 2025.

LOPES, E. C. *et al.* Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. **International Journal of Pavement Engineering**, v.23, n.14, p.5003-5014, 2022.

LOPES, E. C. *et al.* Chemical, mineralogical, microstructural and engineering properties of tropical soils stabilised with the combined and individual use of different types of steel slag. **Road Materials and Pavement Design**, v.25, n.7, p.1507-1527, 2024.

LOPES, J. A.; SILVA, R. F.; ALMEIDA, C. C. Geogrid-reinforced recycled sand: experimental evaluation. **Soils and Rocks**, v. 47, n. 2, p. 1–15, 2024.

LOVE, A.E.H. The stress produced in a semi-infinite solid by pressure on part of the boundary. **Philosophical Transaction of the Royal Society Serie A**, Londres, v.228, p.377-420, 1929.

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

MAGHOOL, F., *et al.* Laboratory evaluation of ladle furnace slag in unbound pavement-base/subbase applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.29, n.2, p.04016197, 2017.

MAGHOOL, F. et al. Interface shear strength properties of geogrid-reinforced steel slags using a large-scale direct shear testing apparatus. **Geotextiles and Geomembranes**, v.48, n.5, p.625-633, 2020.

MATOS, E. B.; PINTO, W. J.; DA SILVA, L. N. Empreendedorismo no setor da construção civil: uma revisão sistemática de literatura. **Revista de Ensino de Engenharia**, v.41, 2022.

MONTENEGRO, J. M. et al. Ladle furnace slag in the construction of embankments: expansive behavior. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.25, n.8, p.972-979, 2013.

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

NAEINI, S.A.; MIRZAKHANLARI, M. The effect of geotextile and grading on the bearing ratio of granular soils. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 13 (J), p. 1-10. 2008.

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

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

PACHECO, R. F. R. **Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer.** Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-28112017-082247/pt-br.php>. Acesso em: 18 jun. 2025

PAI, R. R. et al. Structural evaluation of flexible pavement constructed with steel slag–fly ash–lime mix in the base layer. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.33, n.6, p.04021097, 2021.

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

PARREIRA, A. B. et al. O módulo resiliente de alguns materiais de pavimentação e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples. In: Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica, 11., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: 1998. p. 149-155.

PARIHAR, N. S.; SHUKLA, R. P. Unconfined compressive strength of geotextile sheets reinforced soil. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, v.8, p. 1379-1385, 2015.

PARSAEI, M. et al. Effect of electric arc and ladle furnace slags on the strength and swelling behavior of cement-stabilized expansive clay. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v.80, n.8, p.6303-6320, 2021.

PATEL, S.; SHAHU, J. T. Resilient response and permanent strain of steel slag-fly ash-dolime mix. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.28, n.10, p.04016106, 2016.

- PATEL, S.; SHAHU, J. T. Comparative study of slags stabilized with fly ash and dolime for utilization in base course. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.29, n.10, p.04017168, 2017.
- PINHEIRO, C. et al. Application of the response surface method to optimize alkali activated cements based on low-reactivity ladle furnace slag. **Construction and Building Materials**, v.264, p. 120271, 2020.
- PISCIOTTA, M. The volume expansion of artificial road aggregates derived from steelmaking slags. **Eur. Transp.-Trasp. Eur**, v.75, 2020.
- PITANGA, H., N. et al. MCT classification for compacted mixtures of soil-steel slag-fly ash for application in forest roads. **Revista Árvore**, v.40, p.911-919, 2016.
- POH, H. Y.; GHATAORA, G. S.; GHAZIREH, N. Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines. **Journal of materials in Civil Engineering**, v.18, n.2, p.229-240, 2006.
- PORTELINHA, F. H. M.; ZORNEBERG, J. Effect of infiltration on the performance of an unsaturated geotextile -reinforce soil wall. **Geotextiles and Geomembranes**. v.45, n.3, 2017.
- PRIBULOVA, A; FUTAS, P. Metallurgical slag in civil engineering. **17th International multidisciplinary scientific geoconference sgem**, p.137-144, 2017.
- RABABAH, S. et al. Resilient response and permanent strain of subgrade soil stabilized with byproduct recycled steel and cementitious materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 6, p. 04020139, 2020.
- REN, Z.; LI, D. Application of Steel Slag as an Aggregate in Concrete Production: A Review. **Materials**, v. 16, n. 17, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/17/5841>. Acesso em: 12 maio 2025.
- ROCHA, M. T.; REZENDE, L. R. **Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação**. Revista Matéria, 22 (4). 2017
- RODRIGUES, K. H. et al. Experimental study of mixtures soil-industrial waste using simplex design for application in paving. **Journal of Building Engineering**, v.78, p.107761, 2023.
- SANTOS, F.R. B.C, ARAUJO, G. L. S. **Interação solo-geomembrana com variação do grau de saturação em solo fino**. VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos, Brasília, v.1, p 116-122, 2015.
- SCARIOT, K. A. **Estudo paramétrico da resistência ao cisalhamento de um solo de baixa capacidade de suporte**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, João Pessoa, 2018.
- SEBBAR, N.; LAHMILI, A.; BAHI, L.; OUADIF, L., 2020, **Treatment of clay soils with steel slag, in road engineering**. EDP Sciences. 2017.
- SHARMA, R. K.; SIRDESAI, G. Performance of geogrid reinforced rubber waste as subgrade material. **International Journal of Geomechanics**, v. 15, n. 6, p. 9731–9740, 2014.

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

SILVA, P. G. C. da. **Beneficiamento de biomassa residual da indústria papelreira por meio de rotas termoquímicas**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/34359>. Acesso em: 12 maio 2025.

SIVAKUMAR, B.; KUMAR, S.; VIDYA, K. Interface studies on geogrid and fly ash. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 258–267, 2013.

SOL-SÁNCHEZ, M. et al. Stabilisation of clayey and marly soils using industrial wastes: pH and laser granulometry indicators. **Engineering geology**, v.200, p.10-17, 2016.

SUAREZ, L.; JONSÉN, P.; KAJBERG, J. Valorization of air-cooled EAF manganese slag in comminution processes: An investigation into the breakage characterization. **Mining, Metallurgy & Exploration**, v.40, n.6, p.2449-2462, 2023.

SANTOS, D. C. et al. Estudo da pozolanicidade em misturas solo-cimento com adição de escória de alto forno. **Geotecnia**, n.141, p.57–69, 2017.

SANTOS, S. F. et al. Caracterização mineralógica e reações pozolânicas em materiais cimentícios. **Revista Matéria**, v.22, n.2, p.e 11890, 2017.

SANTOS, G. F.; DA SILVA, L. T.; MAEBARA, A. K.; Análise da utilização de geogrelha como reforço na camada de subleito de pavimentos. **Journal of Exact Sciences**, v. 37, n. 2, 2023.

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

STJEPANOVIĆ, N. et al. Usage of steel slag as a construction material and in environmental applications. **Advances in Civil and Architectural Engineering**, v. 10, n. 19, p. 13-22, 2019.

STRAHL, Z.; ALEXIEW, D. Cellular confinement system reinforcement – Innovation at the base of sustainable pavements. In: **CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS FOR SOUTHERN AFRICA (CAPSA)**, 12., 2019, Sun City. Proceedings [...]. Sun City: CAPSA, 2019. p. 999–1018.

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

TEIXEIRA, S. H. C. **Estudo da interação solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicação na análise e dimensionamento de maciços reforçados**. 2003. 208 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2003.

TILLOUS, M. et al. Future research and developments on reuse and recycling of steelmaking by-products. *Metals*, Basel, v. 13, n. 4, 676, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/13/4/676>. Acesso em: 12 maio 2025.

WEI, H.; YU, Z.; YIN, H. Triaxial shear tests on clayey soil reinforced with geosynthetics. *Engineering Mechanics*, v. 24, n. 5, p. 107–113, 2007.

WERK, S. M. S. de. **Estudo da influência dos métodos de compactação no comportamento resiliente de solos**. 2000. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

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

YANG, X.; HAN, J. An analytical model for resilient modulus and permanent deformation of geosynthetic-reinforced unbound granular material. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 139, n. 9, p. 1443–1453, set. 2013

YILDIRIM, I. Z.; BALUNAINI, U.; PREZZI, M. Strength-gain characteristics and swelling response of steel slag and steel slag–fly ash mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.35, n.8, p.04023223, 2023.

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

YILDIRIM, I., Z.; PREZZI, M. Subgrade stabilisation mixtures with EAF steel slag: an experimental study followed by field implementation. *International Journal of Pavement Engineering*, v.23, n.6, p.1754-1767, 2022.

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

ZHANG, Y. et al. Engineering Properties and Environmental Impact of Soil Mixing with Steel Slag Applied in Subgrade. *Applied Sciences*, v. 13, n. 3, p. 1574, 2023.

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