XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/88

Estabilização de um Solo Tropical com Escória de Aciaria Elétrica Primária

Francisco Aureliano Rocha de Vasconcelos Teixeira
Doutorando, UFV, Viçosa, Brasil, francisco.teixeira@ufv.br

Klaus Henrique de Paula Rodrigues
Professor, UFV, Viçosa, BR, klaus@ufv.br

Heraldo Nunes Pitanga
Professor, UFV, Viçosa, Brasil, heraldo.pitanga@ufv.br

Taciano Oliveira da Silva
Professor, UFV, Viçosa, Brasil, taciano.silva@ufv.br

Natália Assunção Brasil Silva
Professor, UFV, Viçosa, Brasil, natalia.brasil@ufsj.edu.br

RESUMO: O reaproveitamento de resíduos industriais na engenharia de pavimentos tem se mostrado promissor para substituição de materiais convencionais. A escória de aciaria elétrica primária (EAEP), coproduto siderúrgico com potencial reativo com constituintes dos solos formando compostos cimentícios (C-S-H, C-A-H, C-A-S-H) que melhoram propriedades geotécnicas. Embora estudos demonstrem resultados satisfatórios com teores até 20% de EAEP, o comportamento com teores superiores sob energia Proctor Modificada permanece pouco explorado. Este trabalho avaliou a estabilização de um solo tropical de Viçosa-MG com 0%, 20% e 40% de EAEP (M0, M1 e M2), utilizando a energia Proctor Modificada e cura selada por 7 dias em câmara úmida. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples (RCS), mini-ISC e expansão ISC. Os resultados mostraram incrementos de RCS de 67% (M1) e 253% (M2), mini-ISC acima de 20% (M1) e 80% (M2), além de redução da expansão ISC de 85% (M1) e 90% (M2). Conclui-se que a ampliação da dosagem para 40% com energia Proctor Modificada representa avanço significativo, demonstrando viabilidade técnica da EAEP para camadas estruturais de pavimentos, com benefícios ambientais pelo aproveitamento de coprodutos siderúrgicos e redução do consumo de agregados naturais.

PALAVRAS-CHAVE: Escória de Aciaria Elétrica Primária, Estabilização de Solos, Estabilização Química, Pavimentação, Sustentabilidade.

ABSTRACT: The reuse of industrial waste in pavement engineering has shown promising results for replacing conventional materials. Electric arc furnace slag (EAFS), a steelmaking by-product with reactive potential, interacts with soil constituents to form cementitious compounds (C-S-H, C-A-H, C-A-S-H) that improve geotechnical properties. Although studies demonstrate satisfactory results with EAFS contents up to 20%, the behavior at higher contents under Modified Proctor energy remains underexplored. This study evaluated the stabilization of a tropical soil from Viçosa-MG with 0%, 20%, and 40% EAFS (M0, M1, and M2), using Modified Proctor energy and sealed curing for 7 days in a moist chamber. Unconfined compressive strength (UCS), mini-CBR, and CBR swell tests were performed. The results showed UCS increases of 67% (M1) and 253% (M2), mini-CBR values above 20% (M1) and 80% (M2), and CBR swell reductions of 85% (M1) and 90% (M2). It is concluded that increasing the dosage to 40% with Modified Proctor energy represents a significant advancement, demonstrating the technical feasibility of EAFS for structural pavement layers, with environmental benefits from the utilization of steelmaking by-products and reduction in natural aggregate consumption.

KEYWORDS: Electric Arc Furnace Slag, Soil Stabilization, Chemical Stabilization, Paving, Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a redução de impactos ambientais na construção civil tem incentivado a busca por soluções que conciliem desempenho técnico e responsabilidade ambiental. Nesse contexto, o reaproveitamento de resíduos industriais tem se mostrado promissor para substituição de materiais convencionais, com estudos demonstrando que a escória de aciaria elétrica pode melhorar significativamente o comportamento resiliente e a resposta estrutural de pavimentos asfálticos quando utilizada em camadas de subleito (Rodrigues et al., 2024a; Rodrigues et al., 2024b).

Dentre os coprodutos industriais com potencial geotécnico, destaca-se a escória de aciaria elétrica primária (EAEP), gerada durante o processo de produção do aço em fornos elétricos a arco. Nesse processo, ocorre a fusão de sucatas metálicas e ferro-gusa sob altas temperaturas com injeção de oxigênio. Isso produz uma escória rica em óxidos de cálcio, ferro e magnésio. Esses elementos são responsáveis por conferir ao material caráter básico e reatividade pozolânica (Lopes et al., 2023; Rodrigues et al., 2023).

Ao ser moída e utilizada como fino de escória, a EAEP apresenta capacidade de reagir com os argilominerais do solo e formar compostos cimentícios como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (C-S-H e C-A-H), que melhoram propriedades geotécnicas, criando estruturas mais densas, aumentando a resistência e reduzindo a plasticidade e a expansibilidade (Kang et al., 2024; Lopes et al., 2021; Rodrigues et al., 2024a; Yu et al., 2021).

Estudos recentes demonstraram que o uso de teores de EAEP de até 20% em misturas solo-escória promove elevação significativa da resistência à compressão simples (RCS) e do índice de suporte Califórnia (ISC), além de reduzir a expansão e o teor de umidade ótimo (Lopes et al., 2023; Rodrigues et al., 2023). Entretanto, a literatura técnica ainda apresenta escassez de estudos envolvendo teores superiores a 20% e o uso da energia de compactação Proctor Modificada, condição essencial para simular solicitações típicas da camada de base de pavimentos rodoviários.

Assim, o presente estudo tem como objetivo geral avaliar o comportamento mecânico e volumétrico de um solo tropical da microrregião de Viçosa-MG estabilizado com EAEP, considerando teores de 0%, 20% e 40% utilizando a energia de compactação Proctor Modificada. Pretende-se, com isso, investigar a influência do aumento do teor de EAEP sobre as propriedades mecânicas e expansivas das misturas, buscando verificar sua viabilidade técnica para uso em camada de base de pavimentos asfálticos, conforme os critérios de classificação do manual de pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006).

Este trabalho representa um avanço na literatura ao ampliar a faixa de dosagem de EAEP e avaliar seu comportamento sob maior energia de compactação, contribuindo para o aproveitamento sustentável de resíduos siderúrgicos e para a redução do consumo de agregados naturais em obras de infraestrutura rodoviária.

2 MATERIAIS E METÓDOS

2.1 Materiais

Neste estudo foram utilizados dois materiais: uma amostra de solo tropical residual e uma amostra de uma escória de aciaria elétrica primária (EAEP).

2.1.1 Solo Tropical

A amostra de solo foi coletada no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil. A coleta da amostra seguiu o procedimento PRO 003 (DNER, 1994), a qual foi preparada para os ensaios geotécnicos de laboratório, conforme a NBR 6457 (ABNT, 2024).

Os ensaios realizados para fins de caracterização geotécnica das amostras de solos foram: análise granulométrica conjunta, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2025d); limite de liquidez, segundo a NBR 6459 (ABNT, 2025b); limite de plasticidade, segundo a NBR 7180 (ABNT, 2025c); e massa específica dos grãos do solo (ρ_s), segundo a NBR 17212 (ABNT, 2025a). Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização e classificação geotécnicas da amostra de solo, Autores 2026.

Parâmetro	Resultado
% argila ($\varphi < 0{,}002$ mm)	5
% silte (0,002 mm < φ < 0,06 mm)	24
% areia (0,06 mm < φ < 2 mm)	68
% pedregulho (2 mm < φ < 60 mm)	3
LL (%)	36
LP (%)	18
IP (%)	18
ρ_s (g/cm³)	2,657
TRB	A-2-6
USC	SC
MCT	NA’

O solo apresentou limite de liquidez de 36%, índice de plasticidade de 18% e massa específica dos grãos de 2,657 g/cm³, sendo classificada em A-2-6, SC e NA’ nos sistemas de classificação TRB, USC e MCT, respectivamente.

2.1.2 Escória de Aciaria Elétrica Primária (EAEP)

A amostra de EAEP foi fornecida por uma empresa que atua no setor de fabricação de tubos metálicos, localizada no município de Jeceaba, região do Alto Paraopeba, também no estado de Minas Gerais, Brasil. A coleta das amostras de EAEP em seu estado original (escória bruta) foi realizada de acordo com a norma técnica NBR 10007 (ABNT, 2004). A amostra utilizada foi proveniente de locais de estocagem recente, no qual o tempo máximo entre sua geração e sua disposição foi de 72 horas, não sendo empregado qualquer processo de cura do material antes da realização dos ensaios.

Para a preparação das amostras para os ensaios de caracterização, esse material foi moído para redução da sua granulometria em partículas de diâmetros menores que 0,106 mm (peneira #150) a fim de aumentar a sua superfície específica.

Os ensaios de caracterização física das amostras de EAEP realizados foram: finura por peneiramento, de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2012a), superfície específica pelo método de Blaine, conforme a NBR 16372 (ABNT, 2015), massa específica da escória moída, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017).

A amostra de EAEP moída apresentou índice de finura por peneiramento de 24,88%, superfície específica pelo método de Blaine de 1955,60 cm²/g, massa específica dos sólidos de 3,7 g/cm³.

2.2 Métodos Adotados

As misturas de solo-EAEP foram identificadas como M0 a M2, sendo que a mistura M0 possui 100% de solo, a mistura M1 possui 80% de solo e 20% de EAEP, e a mistura M2 possui 60% de solo e 40% de EAEP. Os teores foram determinados em relação à massa seca das misturas.

Para determinação dos parâmetros de ótimo da massa específica aparente seca e o teor de umidade ótimo o solo e as misturas foram submetidos ao ensaio de compactação conforme a NBR 7182 (ABNT, 2025e) utilizando a energia Proctor Modificada, a qual é representativa das condições de compactação empregadas em camadas de base de pavimentos rodoviários.

As propriedades mecânicas utilizadas para avaliação da estabilização da amostra do solo foram a resistência à compressão simples (RCS) e o índice de mini-ISC, conforme as respectivas normas técnicas NBR 12025 (ABNT, 2012b) e DNIT 254 ME (DNIT, 2023). Essas propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas com os critérios de seleção de materiais para composição de camadas estruturais de pavimentos rodoviários, conforme recomendações da norma técnica NBR 12253 (ABNT, 2012c) e do manual de pavimentação (DNIT, 2006).

Para a determinação das propriedades mecânicas de cada mistura analisada, foram moldados, no teor de umidade ótimo, três corpos de prova, os quais foram submetidos a um processo de cura selada, em filme de PVC, em câmara úmida por sete dias, para que as propriedades cimentantes pudessem ser avaliadas.

O ensaio de RCS foi realizado em corpos de prova da amostra de solo em sua condição natural e das misturas solo-EAEP analisadas, de acordo com a norma técnica NBR 12025 (ABNT, 2012b), sem imersão previa dos corpos de prova em água. Os ensaios para a determinação dos valores de mini-ISC e da expansão ISC da amostra de solo na condição natural e das misturas solo-EAEP analisadas foram realizados segundo a norma técnica DNIT 254 ME (DNIT, 2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de Compactação

Os resultados dos ensaios de compactação indicaram influência direta do teor de EAEP nas propriedades de compactação das misturas. Conforme apresentado na Tabela 2, observou-se redução progressiva do teor de umidade ótimo (w_{ot}) e aumento da massa especifica aparente seca máxima (ρ_{dmax}) com o incremento do teor de EAEP.

Tabela 2. Parâmetros de ótimo das misturas analisadas.

Material	w_{ot} (%)	ρ_{dmax} (g/cm³)
M0	12,711	1,874
M1	11,902	1,959
M2	11,137	2,114

Segundo Zumrawi e Babikir (2017), a diminuição do teor de umidade com a adição de EAEP é devido às trocas catiônicas que ocorrem entre os íons de cálcio provenientes da EAEP e os íons presentes na dupla camada difusa das partículas dos solos. De acordo com Yu et al. (2024), essa redução também pode ser atribuída a uma hidratação prévia dos óxidos de cálcio presentes na EAEP, gerando o composto hidróxido de cálcio, o que implica em menor demanda de água na mistura para alcançar sua massa especifica aparente seca máxima.

O aumento da massa específica aparente seca máxima com adição de EAEP é amplamente reportado na literatura técnica. No presente estudo, observou-se incremento de ρ_{dmax} de 1,87 g/cm³ (M0) para 2,11 g/cm³ (M2, 40% de EAEP), representando aumento de aproximadamente 12,8%. Esse comportamento está associado à maior massa específica real da EAEP em comparação às partículas do solo, promovendo melhorias de propriedades mecânicas (Jia et al., 2022; Lopes et al., 2022; Shi et al., 2022; Yu et al., 2021).

Em misturas solo-escoria submetidas à energia Proctor Normal, Kang et al. (2024) e Ogundare et al. (2024) também observaram incremento de ρ_{dmax} , associando-o tanto ao preenchimento físico de vazios quanto ao desenvolvimento de produtos cimentantes decorrente da reatividade dos óxidos presentes na EAEP.

3.2 Propriedades Mecânicas e Expansão Volumétrica

Utilizando os parâmetros de ótimo dos ensaios de compactação (ρ_{dmax} e w_{ot}), foram moldados corpos de prova para a realização dos ensaios mecânicos de RCS, índice mini-ISC e expansão ISC. Os resultados são apresentados nas Figuras 1, 2 e 3, respectivamente, com barras de erro representando o erro padrão da média calculado a partir das repetições experimentais.

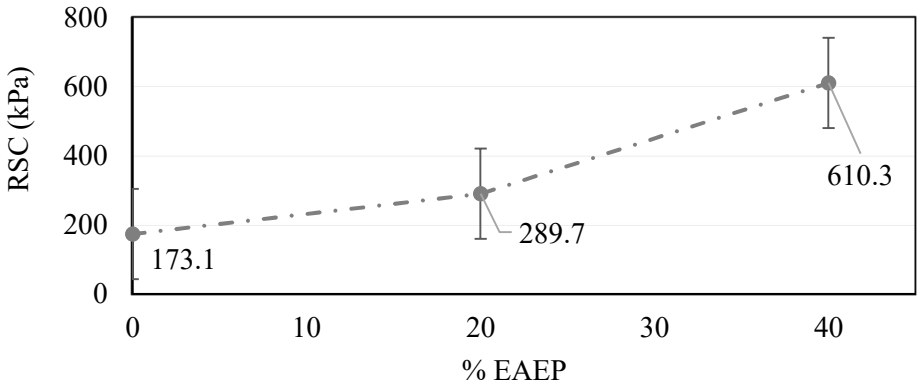


Figura 1. RCS da amostra de solo e suas misturas com EAEP, Autores 2026.

Observou-se uma tendência de aumento de RCS com a adição de EAEP, sendo mais evidente quando o teor de EAEP foi de 40%. Para a amostra de solo, o aumento de RCS foi de 67% para a mistura M1 (20% de EAEP) e de 253% para a M2 (40% de EAEP) quando comparada com a amostra do solo no estado natural, alcançando um valor aproximado de 290 kPa e 610 kPa, respectivamente. Esses valores superam o mínimo de RCS exigido pelo departamento de estradas de Louisiana para que um material possa compor uma camada de reforço de subleito (Gautreau et al., 2010).

Parsaei et al. (2021) observaram, através do ensaio de difração de raios-X (DRX) em misturas de argila, cimento e escoria de forno elétrico a arco, que houve formação de compostos cimentícios, como o C-S-H, o que confere às misturas solo-EAEP maior resistência mecânica e criando uma estrutura mais densa em comparação ao solo natural, conforme também reportado por Rodrigues et al. (2024a). Os autores também observaram que o grau de floculação na estrutura da mistura aumentou, devido ao processo de troca catiônica entre os cátions presentes na EAEP e na amostra de solo. Shi et al. (2022) e Yu et al. (2024) atribuíram o aumento de RCS com o aumento de escória de aciaria elétrica ao aumento da massa especifica aparente seca máxima, à diminuição do teor de umidade ótimo, e à formação de produtos cimentícios via carbonatação.

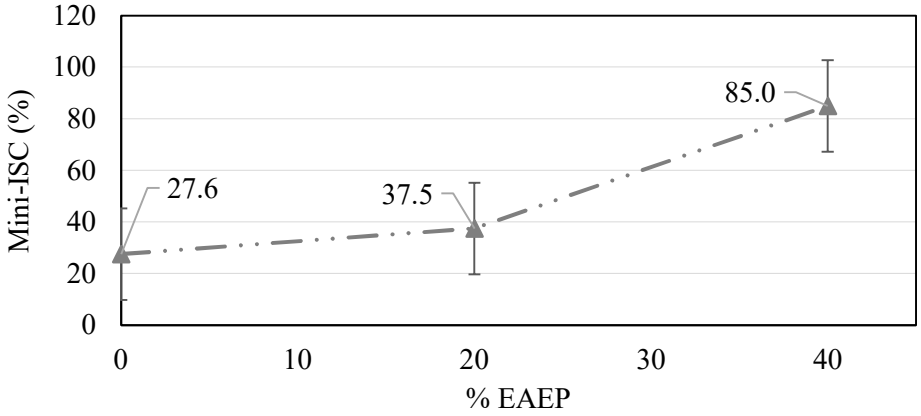


Figura 2. Mini-ISC da amostra de solo e suas misturas com EAEP, Autores 2026.

Verificou-se uma tendência de aumento do valor de mini-ISC com o aumento do teor de EAEP, o que também foi observado por outros autores (Jia et al., 2022; Kang et al., 2024; Lopes et al., 2021, 2022, 2023; Rodrigues et al., 2023). A mistura M1 (20% de EAEP) apresentou mini-ISC acima de 20% e a mistura M2 (40% de EAEP) apresentou índice ISC acima de 80%.

Kang et al. (2024) afirmam que esse aumento é devido aos novos grãos que se formam resultantes de reações químicas entre a amostra de solo e a EAEP, sendo que o processo de troca de cátions gera uma alteração na estrutura do material, tornando-a mais floculada e com maiores tamanhos. Alguns autores atribuem o aumento do valor de ISC com a adição de escória de aciaria elétrica ao aumento da massa específica aparente seca máxima e à redução do teor de umidade ótimo (Jia et al., 2022; Lopes et al., 2021).

Rodrigues et al. (2023) também observaram um aumento nas propriedades mecânicas RCS e ISC com o aumento no teor de EAEP em solos tropicais, o qual foi atribuído à cimentação promovida pelos óxidos presentes na escória, os quais geraram uma estrutura mais densa nos corpos de prova.

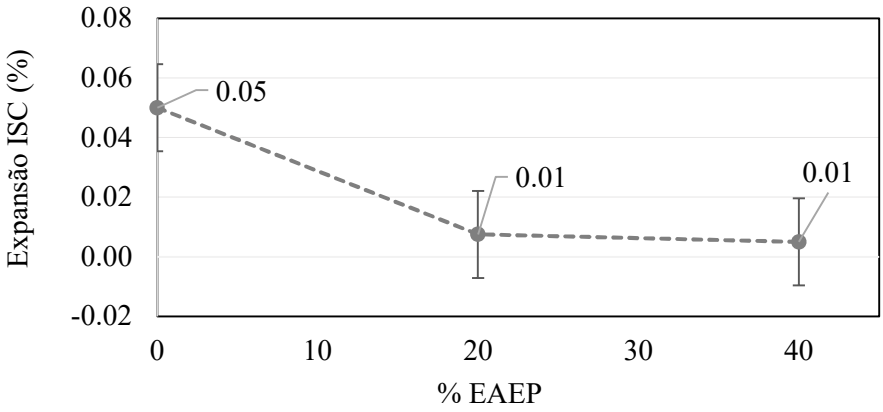


Figura 3. Expansão ISC da amostra de solo e suas misturas com EAEP, Autores 2026.

Observou-se que o incremento do teor de EAEP nas misturas solo-EAEP gerou uma redução nos valores de expansão ISC. As misturas M1 e M2 apresentaram valores de expansibilidade inferiores a 0,5%, valor considerado baixo segundo o manual de pavimentação (DNIT, 2006), indicando a adequada estabilidade volumétrica para aplicação em camada de base. A redução da expansão pode ser atribuída aos mecanismos físico-químicos previamente discutidos.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou a estabilização de um solo tropical da microrregião de Viçosa–MG com escória de aciaria elétrica primária (EAEP), investigando teores de 0%, 20% e 40% (misturas M0, M1 e M2) sob compactação na energia Proctor Modificada e cura selada em câmara úmida por 7 dias.

Os resultados de compactação indicaram redução progressiva do teor de umidade ótimo (w_{ot}) de 12,71% (M0) para 11,137% (M2), acompanhada de aumento da massa específica aparente seca máxima (ρ_{dmax}) de 1,87 g/cm³ para 2,11 g/cm³. O incremento de aproximadamente 12,8% na massa específica seca máxima demonstra melhoria significativa da compacidade com a ampliação do teor de EAEP até 40%.

Quanto ao desempenho mecânico, verificou-se tendência consistente de ganho de resistência à compressão simples (RCS) com a adição de EAEP, com aumento de 67% para a mistura M1 e de 253% para a mistura M2, atingindo valores de 290 kPa e 610 kPa, respectivamente. Os resultados de mini-ISC também apresentaram tendência de incremento com o teor de EAEP, com M1 acima de 20% e M2 apresentando ISC acima de 80%.

No que se refere a estabilidade volumétrica, a adição de EAEP promoveu redução da expansão ISC. As misturas M1 e M2 apresentaram valores inferiores a 0,01%, indicando comportamento expansivo desprezível.

Dessa forma, conclui-se que a ampliação da faixa de dosagem da EAEP para 40%, combinada ao uso de energia Proctor Modificada, constitui um avanço em relação aos estudos anteriores concentrados em teores até 20% e energias menores, ao evidenciar ganhos simultâneos de compacidade, resistência e estabilidade volumétrica. Os resultados reforçam o potencial da EAEP como estabilizante em solos tropicais, com benefícios ambientais associados à redução do consumo de agregados naturais e ao aproveitamento de coprodutos siderúrgicos na infraestrutura de transportes.

Limitações do estudo, esta pesquisa foi conduzida em escala laboratorial com um único tipo de solo tropical e períodos de cura de 7 dias. Estudos futuros devem contemplar ensaios de durabilidade, avaliação de longo prazo, testes em campo e analise de viabilidade econômica pra consolidar a aplicação prática da EAEP em pavimentos rodoviários.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2004). *NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2012a). *NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2012b). *NBR 12025: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2012c). *NBR 12253: Solo-Cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2015). *NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2017). *NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2024). *NBR 6457: Preparo de Amostras de Solos.*

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025a). *NBR 17212: Solos - Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025b). *NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez* (p. 5).

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025c). *NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025d). *NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025e). *NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação*.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). (1994). *PRO 003: Coleta de amostras deformadas de solos*.

Departamento Nacional De Infra-Estrutura De Transportes (DNIT). (2023). *DNIT 254. Solos - Compactação em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão - Método de ensaio*.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). (2006). *Manual de pavimentação*. Rio de Janeiro.

Gautreau, G. P., Zhang, Z., & Wu, Z. (2010). *Accelerated loading evaluation of subbase layers in pavement performance.* Louisiana Transportation Research Center. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/20296

International Organization for Standardization (ISO). (2020). ISO 13320. *Particle Size Analysis - Laser Diffraction Methods*.

Jia, Y., Hua, S., Qian, L., Ren, X., Zuo, J., & Zhang, Y. (2022). Development of steel slag-based solidification/stabilization materials for high moisture content soil. *Journal of Renewable Materials*, *10*(3), 735–749. https://doi.org/10.32604/jrm.2022.016819

Kabeta, W. F., & Lemma, H. (2023). Modeling the application of steel slag in stabilizing expansive soil. *Modeling Earth Systems and Environment*, *9*(4), 4023–4030. https://doi.org/10.1007/s40808-023-01734-1

Kang, X., Li, C., Zhang, M., Yu, X., & Chen, Y. (2024). Mechanical Properties and Stabilization Mechanism of Steel Slag-Rice Husk Ash Solidified High Plasticity Clay. *Geotechnical Testing Journal*, *47*(1), 235–253. https://doi.org/10.1520/GTJ20220294

Lopes, E. C., da Silva, T. O., Pitanga, H. N., Pedroti, L. G., de Carvalho, J. M. F., Nalon, G. H., de Araújo, E. N. D., & de Paula Rodrigues, K. H. (2023). 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*, *25*(7), 1507–1527. https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2268723

Lopes, E. C., da Silva, T. O., Pitanga, H. N., Pedroti, L. G., Franco de Carvalho, J. M., Nalon, G. H., de Lima, G. E. S., & de Araújo, E. N. D. (2022). Stabilisation of clayey and sandy soils with ladle furnace slag fines for road construction. *Road Materials and Pavement Design*, *24*(1), 247–266. https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2017328

Lopes, E. C., da Silva, T. O., Pitanga, H. N., Pedroti, L. G., Franco de Carvalho, J. M., Nalon, G. H., Lima, G. E. S. de, & Rodrigues, M. H. R. (2021). Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. *International Journal of Pavement Engineering*, *23*(14), 5003–5014.

https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1990289

Ogundare, D. A., Adeleke, O. O., & Akinbuluma, A. T. (2024). Chemical and Mechanical Characterisation of Clay Soil Stabilised with Steel Slag and Calcium Carbide Waste. *Civil and Sustainable Urban Engineering*, *4*(1), 55–64. https://doi.org/10.53623/csue.v4i1.427

Parsaei, M., Vakili, A. H., Salimi, M., Farhadi, M. S., & Falamaki, A. (2021). 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*, *80*(8), 6303–6320. https://doi.org/10.1007/s10064-021-02316-0

Rodrigues, K. H. de P., da Silva, T. O., Pitanga, H. N., Pedroti, L. G., & Rodrigues, M. H. R. (2023). Experimental study of mixtures soil-industrial waste using simplex design for application in paving. *Journal of Building Engineering*, *78*(September), 107761. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107761

Rodrigues, K. H. de P., Silva, T. O. da, Pitanga, H. N., Nes, Almeida, M. S. de S., Pedroti, L. G., Rodrigues, M. H. R., & Lopes, E. C. (2024a). Effect of carbonation of soil-slag mixtures on the resilient behaviour and structural response of an asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, *25*(10), 2101–2120. https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2300364

Rodrigues, M. H. R., Silva, T. O. da, Pitanga, H. N., Pedroti, L. G., Rodrigues, K. H. de P., Lopes, E. C., & Nalon, G. H. (2024b). Efficacy of the Simplex-Centroid Method for Optimization of Mixtures of Soil, Ladle Furnace Slag and Fly Ash Applied in Pavement Construction. *Sustainability (Switzerland)*, *16*(17). https://doi.org/10.3390/su16177726

Shi, J., Wang, S., Cao, W., Su, J., & Zhang, X. (2022). Mechanical Properties and Strengthening Mechanism of Dredged Silty Clay Stabilized by Cement and Steel Slag. *Materials*, *15*(11). https://doi.org/10.3390/ma15113823

Yu, C., Cui, C., Wang, Y., Zhao, J., & Wu, Y. (2021). Strength performance and microstructural evolution of carbonated steel slag stabilized soils in the laboratory scale. *Engineering Geology*, *295*(October), 106410. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106410

Yu, C., Cui, C., Zhao, J., Liu, F., Fu, S., & Li, G. (2024). Enhancing mechanical properties of dredged sludge through carbonation stabilization employing steel slag: An eco-friendly and cost-effective approach. *Construction and Building Materials*, *412*(January), 134748. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134748

Zumrawi, M. M. E., & Babikir, A. A.-A. A. (2017). Laboratory Study of Steel Slag Used in Stabilizing Expansive Soil. *Asian Engineering Review*, *4*(1), 1–6. https://doi.org/10.20448/journal.508.2017.41.1.6