

Influência da utilização de escória de aciaria elétrica secundária no ensaio de módulo de resiliência

Mateus Henrique Ribeiro Rodrigues
Doutorando em Engenharia Civil, UFV, Viçosa, Brasil, mateus.ribeiro@ufv.br

Klaus Henrique de Paula Rodrigues
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, klaus@ufv.br

Bruna Martins de Melo
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, bruna.m.melo@ufv.br

Taciano Oliveira da Silva
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, taciano.silva@ufv.br

Heraldo Nunes Pitanga
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, heraldo.pitanga@ufv.br

RESUMO: A procura por materiais alternativos eficientes que possam substituir materiais naturais, se torna uma medida indispensável no atual cenário da engenharia. Dentre esses materiais, destaca-se as escórias de aciaria, geradas em grande quantidade nas indústrias siderúrgicas, aproximadamente 15% em massa para cada tonelada de aço bruto produzida. Objetivando a reutilização da escória de aciaria elétrica secundária (EAES) na construção de camadas estruturais de pavimentos, este estudo apresentou a análise da influência desse resíduo na estabilização de duas amostras de solos frente ao seu comportamento no ensaio de módulo de resiliência (MR). A fim de avaliar a influência da EAES na estabilização das amostras de solos, sob a perspectiva do comportamento tensão-deformação, foram realizados ensaios de MR em misturas solo-EAES. Foram utilizados os teores de 5%, 12,5% e 20% de EAES em relação à massa seca das misturas, as quais foram compactadas no teor de umidade ótimo e submetidas à cura selada em câmara úmida por 7 dias. Após a execução dos ensaios de MR, observou-se que as misturas apresentaram uma melhora significativa, evidenciando assim, a viabilidade da utilização da EAES em obras de pavimentação, visto que é um material de baixo custo e seu reaproveitamento gera redução do impacto ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Módulo de resiliência, estabilização de solos, escória de aciaria elétrica secundária, pavimentação.

ABSTRACT: The search for efficient alternative materials that can replace natural materials has become essential in the current engineering scenario. Among these materials, steel slag stands out, which is produced in large quantities in the steel industry, about 15% of the mass of each ton of crude steel produced. With the aim of reusing ladle furnace slag (LFS) in the construction of structural layers of road pavements, this study analyzed the influence of this residue on the stabilization of two soil samples in relation to their behavior in the resilient modulus (RM) test. In order to evaluate the influence of LFS on the stabilization of soil samples in terms of stress-strain behavior, RM tests were performed on soil-LFS mixtures. LFS contents of 5 %, 12.5 % and 20 % were used in relation to the dry mass of the mixtures, which were compacted at optimum moisture content and cured sealed in a humid chamber for 7 days. After conducting the RM tests, it was found that the mixtures showed a significant improvement, proving the feasibility of using LFS in paving works, as it is a cost-effective material and its reuse leads to a reduction in environmental impact.

KEYWORDS: Resilient modulus, soil stabilization, ladle furnace slag, pavement.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil ao longo de quase cinco décadas ampliou a produção nacional de aço em quase sete vezes, tornando-se assim, o décimo segundo maior exportador de produtos siderúrgicos do mundo, com um montante de 10,5 milhões de toneladas (IAB, 2018). Embora seja uma estatística positiva, elevando o país a uma posição proeminente frente ao mercado internacional de aço, o ônus dessa atividade impacta diretamente o meio ambiente, em decorrência do descarte dos resíduos oriundos de sua produção. Atualmente, grande parte dos resíduos apresentam uma destinação alternativa ao simples descarte no meio ambiente, citando como principal expoente a escória de alto forno, que vem sendo utilizada como adição na produção de cimento (IAB, 2018). Além disso, um outro campo de atuação referente ao uso de resíduos siderúrgicos diz respeito à estabilização de solos, técnica amplamente utilizada na engenharia civil para a construção de camadas estruturais de bases e sub-bases, melhoria de subleitos, fundações, aterros e obras de contenção (Rodrigues et al., 2024, Rodrigues et al., 2023, Lopes et al., 2022, Maghool et al., 2019).

Dentro desse cenário de utilização de resíduos como agentes estabilizadores de solos como uma alternativa de material para aplicação em pavimentação de baixo custo se encontram as escórias de aciaria, resíduos siderúrgicos provenientes do primeiro estágio (estágio de fusão) da produção de aço a partir de sucata (Terrones-Saeta et al., 2021).

O comportamento resiliente de um material corresponde à sua resposta elástica resultante de uma carga aplicada em pulsos de curta duração. Este comportamento pode ser observado através de um ensaio triaxial de cargas repetidas, por meio do qual são aplicados diferentes pares de tensão confinante e desviadora. O parâmetro de maior importância desse ensaio é o módulo de resiliência, que é obtido através da relação entre a tensão desviadora e a deformação resiliente. Este parâmetro tem sua aplicabilidade no método mecanístico-empírico, referente ao dimensionamento de pavimentos flexíveis, que chega em substituição ao antigo método de dimensionamento, no qual utiliza-se o Índice de Suporte Califórnia (ISC), como parâmetro de dimensionamento, proposto pelo DNIT. Vale ressaltar que o módulo de resiliência depende da natureza e composição granulométrica do solo, do seu estado físico, da condição de carregamento, do histórico de tensões, do método utilizado na compactação, do grau de compactação, entre outros fatores (Medina and Preussler, 1980, Svenson, 1980, Lima et al., 2018, Santos et al., 2019).

A presente pesquisa tem como objetivo, portanto, avaliar a influência da adição de EAEP no módulo de resiliência de duas amostras de solos tropicais da microrregião de Viçosa-MG, com a finalidade de melhorar suas propriedades de engenharia a fim de que pudessem ser utilizados em obras de pavimentação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foram utilizadas duas amostras de solos (C e V) provenientes de jazidas de empréstimo localizadas no Município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil. As amostras de solos foram coletadas no estado deformado. As amostras foram conduzidas ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LEC/UFV) e preparadas para a realização de ensaios de laboratório, seguindo as recomendações da norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a).

A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica das amostras de solos determinadas a partir das recomendações da norma técnica NBR 7181 (ABNT, 2016b). As amostras de solos também foram submetidas a ensaios de laboratório para a determinação da massa específica dos grãos do solo, conforme a norma técnica NBR 6458 (ABNT, 2016c), e dos Limites de Atterberg, conforme as prescrições das normas técnicas NBR 6459 (ABNT, 2016d) e NBR 7180 (ABNT, 2016e).

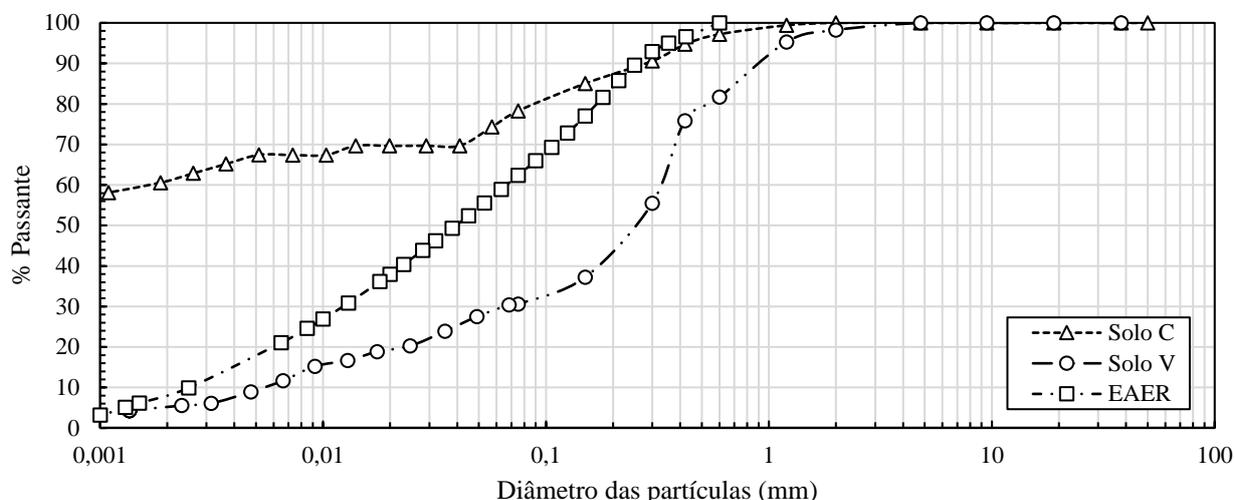


Figura 1: Curva granulométrica dos materiais.

A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica das amostras de solos analisadas.

Tabela 1: Caracterização física e classificações geotécnicas das amostras de solos analisadas.

Parâmetro	C	V
% argila ($\phi < 0,002$ mm)	61	5
% silte ($0,002$ mm $< \phi < 0,06$ mm)	14	24
% areia fina ($0,06$ mm $< \phi < 0,2$ mm)	12	13
% areia média ($0,2$ mm $< \phi < 0,6$ mm)	10	40
% areia grossa ($0,6$ mm $< \phi < 2$ mm)	3	15
% 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
TRB	A-7-5 (20)	A-2-6 (1)
USC	MH	SC
MCT	LG'	NA'

A amostra de escória de aciaria elétrica redutora (EAER) foi coletada em seu estado bruto no pátio de estocagem de uma empresa que atua no ramo de fabricação de tubos metálicos, localizada no Município de Jeceaba, Estado de Minas Gerais, Brasil.

Antes de sua utilização nesse estudo, a amostra bruta de EAER foi submetida ao processo de secagem ao ar, moagem e peneiramento para a retirada de partículas maiores que 0,6mm (peneira #30). A redução granulométrica por moagem da amostra bruta de EAER teve como objetivo aumentar a superfície específica desse material a níveis semelhantes aos utilizados em outros estudos envolvendo coprodutos siderúrgicos (Manso et al., 2013, Akinwumi, 2014, Mahmudi et al., 2021, Sheen et al., 2021). A amostra de EAER apresentou índice de finura igual a 55,8% e superfície específica de 1604,4 cm²/g, determinados conforme as normas técnicas NBR 11579 (ABNT, 2012a) e NBR 16372 (ABNT, 2015), respectivamente. O peso específico das partículas sólidas da amostra de EAER é igual a 29,1 kN/m³, valor este obtido a partir dos procedimentos apresentados na norma técnica NBR 16605 (ABNT, 2017). A curva granulométrica da amostra de EAER está apresentada na Figura 1.

2.2 Métodos

Foram realizadas misturas das amostras de solo com substituição parcial de EAER nas proporções apresentadas na Tabela 2, sendo as proporções estabelecidas em relação à massa seca das misturas.

Tabela 2: Proporção dos materiais nas misturas solo-EAER

Mistura	% de solo	% de EAER
M0	100	0
M1	95	5
M2	87,5	12,5
M3	80	20

2.2.1 Ensaio de compactação

As amostras de solo no estado natural e suas misturas foram submetidas ao ensaio de compactação na energia Proctor intermediária, de acordo com a norma técnica NBR 7182 (ABNT, 2016f).

2.2.2 Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência foi realizado conforme a norma técnica ME 134 (DNIT, 2018), sendo que os pares de tensão utilizados para as amostras de solo e suas misturas com EAER corresponderam aos pares de tensões para amostras de subleito. O pulso de carregamento utilizado foi de 0,1 segundo de duração e período de repouso de 0,9 segundos, completando um ciclo de 1 segundo. O ensaio de módulo de resiliência é fundamental para que uma análise mecanicista seja realizada a fim de se projetar um pavimento e de se determinar a vida de projeto do mesmo considerando o trincamento por fadiga, sendo que esse ensaio está diretamente relacionado com os critérios de seleção de materiais para composição de camadas estruturais de pavimentos rodoviários, conforme recomendações da norma técnica IS 247 (DNIT, 2021).

Para a realização do cálculo do módulo de resiliência, adotou-se um par de tensões ($\sigma_3 = 0,05$ MPa e $\sigma_d = 0,1$ MPa) proposto por Santos et al. (2019), o qual é compatível com um possível estado de tensões atuante no subleito (σ_3 : tensão confinante; σ_d : tensão desviadora). O modelo composto (Equação 1), proposto por Pezo et al. (1992), foi utilizado para realizar a regressão dos dados de MR, para as amostras de solo C e V e para as misturas solo-EAEP para cada amostra de solo (Medina and Motta, 2015).

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (1)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de Compactação

Através das curvas de compactação das misturas analisadas e compactadas na energia Proctor Normal pôde-se obter os valores de peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótimo, os quais são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de compactação das amostras de solo e das misturas solo-EAER.

Misturas	Solo C		Solo V	
	w _{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	w _{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
M0	31,6	13,9	15,1	17,2
M1	29,6	14	15,2	17,4
M2	28,3	14	16,4	17,5
M3	27,7	15,2	15,3	17,6

A Figura 1 apresenta os parâmetros de ótimo [peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) e teor de umidade ótimo (wot)] obtidos através das curvas de compactação das misturas analisadas e compactadas na energia do Proctor Normal.

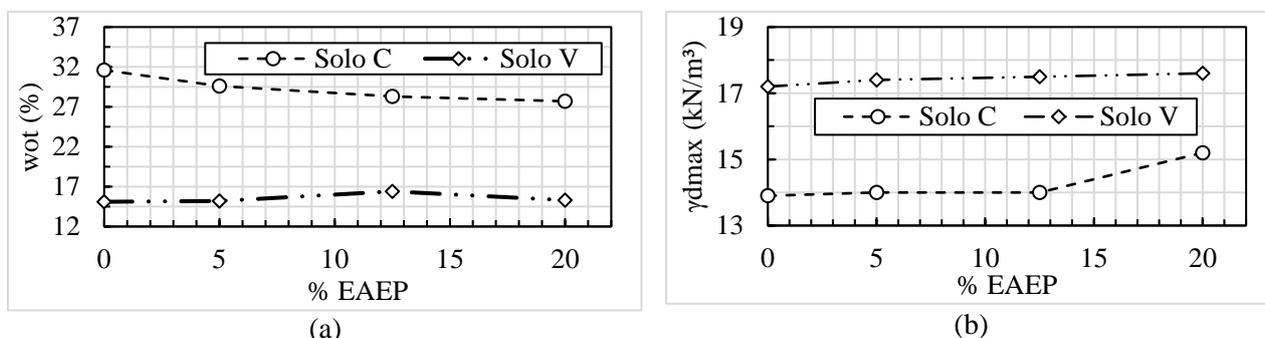


Figura 2: Variação do teor de umidade ótimo e do peso específico aparente seco máximo com o teor de EAES.

Houve um aumento do peso específico aparente seco máximo com o aumento do teor de EAES, o que está relacionado com a maior massa específica real da escória em relação à massa específica dos grãos das amostras de solos analisados (Al-Amoudi et al., 2017, Brand et al., 2020, Sebbar et al., 2020, Oluwasola et al., 2020).

Em relação ao teor de umidade ótimo foi observado uma diminuição com o incremento de escória nas misturas de ambas as amostras de solos analisadas. Essa diminuição, segundo Zumrawi e Babikir (2017) está relacionada com trocas catiônicas que ocorrem entre os íons de cálcio presentes na escória e os íons presentes na dupla camada difusa das partículas dos solos.

3.2. Ensaio de Módulo de Resiliência

A Tabela 4 apresenta os valores de MR médio determinados através de ensaios em duplicata para cada amostra de solo e para as misturas solo EAER.

Tabela 4: Valores de MR médio para as amostras de solo e suas misturas com EAER.

Misturas	MR (MPa)	
	Solo C	Solo V
M0	34,75	26,24
M1	34,66	41,15
M2	54,75	43,08
M3	65,32	46,82

A Figura 3 apresenta esses dados em forma de gráfico.

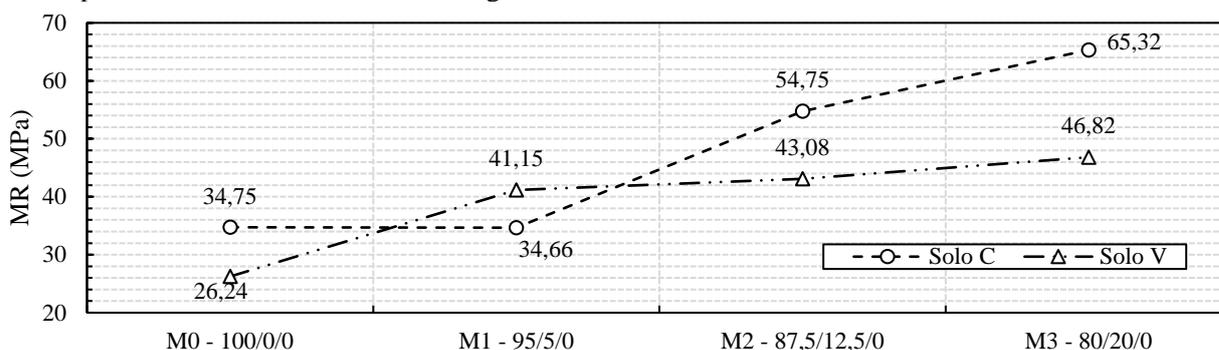


Figura 3: Resultados dos ensaios de MR das amostras de solo e suas misturas com EAES.

Observou-se que houve uma tendência de aumento nos valores de MR com o aumento do teor de EAER, o que possivelmente está relacionado com a formação de compostos cimentícios e pozolânicos.

Os resultados dos ensaios de MR, conforme o modelo composto, para as misturas M3 das amostras de solo C e V são apresentados na Figura 4.

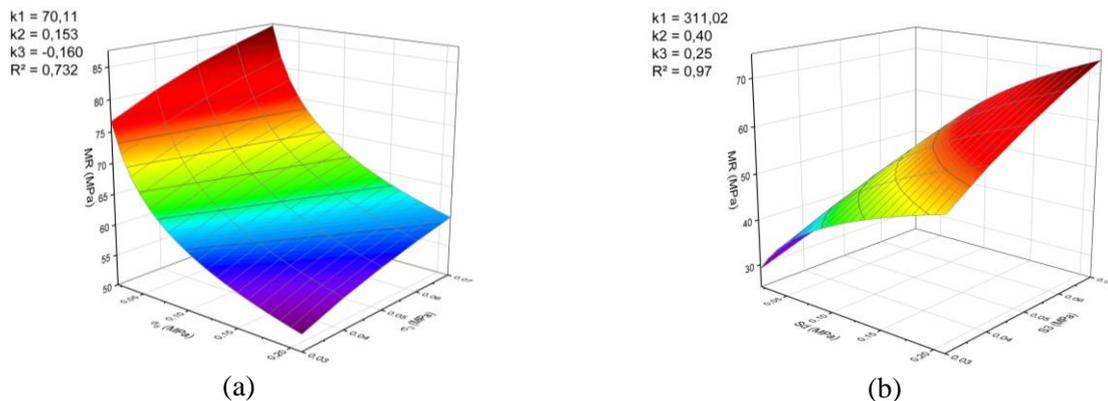


Figura 4: Resultados de MR para a mistura (a) M3 do solo C e (b) M3 do solo V.

Observou-se que a amostra de solo C, de matriz argilosa, é muito susceptível a variações nos valores da tensão desviadora, e que a amostra de solo V, de matriz arenosa, sofre maior influência devido a variações relativas à tensão confinante, o que condiz com a literatura técnica (Medina e Motta, 2015).

Todas as misturas, considerando as duas amostras de solos, apresentaram melhor performance quando comparadas às amostras de solo no estado natural, sendo que a adição de EAES promove uma melhora na resposta da mistura sob carregamento cíclico para as amostras de solo C e V, na medida em que sua proporção na mistura aumenta. Bhuvaneshwari et al. (2019) estudaram o efeito de cal na estabilização de uma amostra de solo no módulo de resiliência e atribuíram um aumento no valor dessa propriedade à troca catiônica entre os íons Ca^{2+} e as partículas de argila presentes no solo para idades de até 3 dias de cura selada. Para tempos de cura acima de 3 dias, Bhuvaneshwari et al. (2019) observaram um aumento no MR, atribuído à formação de compostos pozolânicos.

Observou-se que para a amostra de solo C (de matriz argilosa) com 20% de EAES (mistura M3), houve um aumento de 87,97% no valor do MR em relação à amostra de solo na sua condição pura. Para a amostra de solo V com 20% de teor de EAES (mistura 3), verificou-se um aumento de 78,43% em relação à amostra de solo na sua condição pura. De posse desses dados é possível constatar que a influência da EAES no MR teve maior impacto na amostra de solo V.

De acordo com o MEPDG (AASHTO, 2020), para que uma camada de solo possa suportar uma camada de material granular em um pavimento flexível é necessário o seu módulo de resiliência seja superior a 68,95 MPa. Caso esse valor não seja alcançado pela camada de solo, a mesma deve ser melhorada para alcançar esse valor. De acordo com esse valor mínimo estabelecido pelo MEPDG (AASHTO, 2020), verificou-se que ambas as amostras de solos e suas misturas com EAES não conseguiram alcançar esse valor. Entretanto, observou-se que a mistura M3 para a amostra de solo C ficou muito próxima desse valor. Possivelmente, com o aumento do tempo de cura acima de 7 dias, as misturas contendo EAES possam vir a desenvolver reações de hidratação e reações pozolânicas gerando um aumento ainda maior nos valores de MR em relação aos que foram observados.

O aumento de MR de amostras de solos estabilizados é de grande importância para o aumento da vida útil dos pavimentos asfálticos. Segundo Rodrigues et al. (2024), os valores do número de solicitações do eixo padrão admissível (N_{adm}) considerando a deflexão no topo do revestimento, a deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento e a deformação vertical no topo do subleito são significativamente aumentados, provendo um aumento considerável na vida útil dos pavimentos asfálticos.

4 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da adição de EAES no módulo de resiliência de duas amostras de solos tropicais com a finalidade de melhorar suas propriedades de engenharia a fim de que pudessem ser utilizados em obras de pavimentação. Verificou-se que o aumento de EAES promoveu um aumento de peso específico aparente seco máximo e diminuição no teor de umidade ótimo decorrentes da maior massa específica das partículas de EAES e de trocas catiônicas entre o cálcio presente na EAES e os cátions presentes nas partículas de solo. Observou-se que a amostra de solo V e suas misturas com EAES apresentaram uma maior variação nos valores de MR com a tensão desviadora e que a amostra de solo V e suas misturas com EAEP apresentaram maiores alterações nos valores de MR com a tensão confinante.

Observou-se que os valores de MR aumentaram com a adição de EAEP para ambas as amostras de solos analisadas, com destaque para a mistura com 20% de EAES para a amostra de solo C, que obteve um valor de MR muito próximo do limite mínimo para que uma camada possa ser utilizada como suporte de uma camada granular de um pavimento. A melhora no comportamento mecânico das misturas solo-EAES evidencia a viabilidade da utilização desse resíduo em obras de pavimentação, visto que é um material de baixo custo e seu reaproveitamento gera redução do impacto ambiental, em contraposição ao seu descarte no meio físico.

AGRADECIMENTOS

À UFV por disponibilizar toda estrutura necessária para a realização desse trabalho e aos integrantes do grupo de pesquisa Infratest que colaboram com as atividades de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2020). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice*, [Washington D.C.], American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Akinwumi, I. J. P. C. E. (2014). Soil modification by the application of steel slag. 58, 371-377.
- Al-Amoudi, O. S. B., Al-Homidy, A. A., Maslehuddin, M., et al. (2017). Method and Mechanisms of Soil Stabilization Using Electric Arc Furnace Dust. *Scientific Reports*, 7, 46676.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 11579. *Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μ m (n $^{\circ}$ 200)*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). NBR 16372. *Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457. *Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). 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.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. *Solo — Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo — Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Solo — Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. *Solo — Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 16605. *Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.

- Bhuvaneshwari, S., Robinson, R. and Gandhi, S. (2019). Resilient modulus of lime treated expansive soil. *Geotechnical Geological Engineering*, 37, 305-315.
- Brand, A. S., Singhvi, P., Fanijo, E. O., et al. (2020). Stabilization of a Clayey Soil with Ladle Metallurgy Furnace Slag Fines. *Materials*, 13, 4251.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). *Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). *Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2024). *Instrução de Serviço – IS-247: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa*. Rio de Janeiro.
- IAB. (2018). Sustainability report. *Instituto Aço Brasil*.
- Lima, C., Motta, L., Guimarães, A., et al. (Year) Published. Contribution to the study of Brazilian tropical soils as pavement materials. Proceedings of the 13th Conference on Asphalt Pavements–ISAP, 2018.
- Lopes, E. C., da Silva, T. O., Pitanga, H. N., et al. (2022). Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. *International Journal of Pavement Engineering*, 23, 5003-5014.
- Maghool, F., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., et al. (2019). Geotechnical properties of steel slag aggregates: Shear strength and stiffness. *Soils and Foundations*, 59, 1591-1601.
- Mahmudi, M., Altun, S. and Eskisar, T. (2021). Experimental and Numerical Evaluation of Clay Soils Stabilized with Electric Arc Furnace (EAF) Slag. *Advances in Sustainable Construction Resource Management*, 144, 73.
- Manso, J. M., Ortega-López, V., Polanco, J. A., et al. (2013). The use of ladle furnace slag in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 40, 126-134.
- Medina, J. and Motta, L. (2015). *Mecânica dos pavimentos*. Ed, Interciência.
- Medina, J. and Preussler, E. S. (1980). Características resilientes de solos em estudos de pavimentos. *Solos e Rochas*, 3, 3-26.
- Oluwasola, E., Afolayan, A., Popoopa, M., et al. (2020). Effect of Steel Slag on Engineering Properties of Lateritic Soil. *American Journal of Engineering Research*, 9, 20-27.
- Rodrigues, K. H. d. P., da Silva, T. O., Pitanga, H. N., et al. (2023). Experimental study of mixtures soil-industrial waste using simplex design for application in paving. *Journal of Building Engineering*, 78, 107761.
- Rodrigues, K. H. d. P., Silva, T. O. d., Pitanga, H. N., et al. (2024). Effect of carbonation of soil-slag mixtures on the resilient behaviour and structural response of an asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 1-20.
- Santos, T. A. d., Specht, L. P., Pinheiro, R. J. B., et al. (2019). Avaliação da resistência e da deformação resiliente de quatro solos de subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul. *TRANSPORTES*, 27, 48-64.
- Sebbar, N., Lahmili, A., Bahi, L., et al. (Year) Published. Treatment of clay soils with steel slag, in road engineering. E3S Web of Conferences, 2020. EDP Sciences, 02017.
- Sheen, Y.-N., Le, D.-H. and Lam, M. N.-T. (2021). Performance of Self-compacting Concrete with Stainless Steel Slag Versus Fly Ash as Fillers: A Comparative Study. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*.
- Svenson, M. (1980). Ensaios triaxiais dinâmicos de solos argilosos.
- Terrones-Saeta, J. M., Suárez-Macías, J., Iglesias-Godino, F. J., et al. (2021). Development of High Resistance Hot Mix Asphalt with Electric Arc Furnace Slag, Ladle Furnace Slag, and Cellulose Fibers from the Papermaking Industry. *Applied Sciences*, 11.