

Efeito Da Estabilização De Um Solo Arenoso Com Escória De Aciaria Elétrica Primária Na Redução Da Deformação Permanente

Bruna Martins de Melo

Graduanda em Engenharia Civil, UFV, Viçosa, Brasil, bruna.m.melo@ufv.br

Klaus Henrique de Paula Rodrigues

Professor, UFV, Viçosa, Brasil, klaushenrique@hotmail.com

Juliana Rodrigues Silva

Graduanda em Engenharia Civil, UFV, Viçosa, Brasil, juliana.r.silva@ufv.br

Taciano Oliveira da Silva

Professor, UFV, Viçosa, Brasil, taciano.silva@ufv.br

Heraldo Nunes Pitanga

Professor, UFV, Viçosa, Brasil, heraldo.pitanga@ufv.br

RESUMO: Esta pesquisa teve por objetivo avaliar o efeito da estabilização de um solo arenoso com EAEP na redução da deformação permanente; além de verificar a aplicabilidade da teoria de *Shakedown*. Para isto, utilizou-se uma amostra de solo arenosa e uma amostra de escória de aciaria elétrica primária (EAEP). Para verificar qual a melhor dosagem a ser ensaiada procedeu-se a um estudo utilizando a metodologia de planejamento experimental em rede simplex-centróide. Como resultado obteve-se a dosagem ótima constituída por 80% de solo e 20% de EAEP. A confecção dos corpos de prova deu-se na energia Proctor normal e no teor de umidade ótimo, em seguida, esses corpos de prova foram submetidos à cura selada em câmara úmida por 28 e 56 dias. Efetuaram-se testes triaxiais de cargas repetidas para a avaliação dos resultados de deformação permanente e, verificou-se que a estabilização do solo arenoso com EAEP produziu redução significativa na deformação permanente quando comparada à sua condição natural. Além disso, na condição natural, muitos corpos de prova não suportaram o procedimento inicial do ensaio; ao passo que aqueles submetidos à estabilização química resistiram a um número consideravelmente maior de aplicações de carga, mesmo apresentando valores elevados de ϵ_p . Verificou-se também que o prolongamento no tempo de cura não produziu diminuição significativa no que tange à redução da deformação permanente.

PALAVRAS-CHAVE: Solo arenoso. Escória de aciaria elétrica primária. Estabilização de solos. Deformação permanente. Teoria de *Shakedown*.

ABSTRACT: The aim of this study was to evaluate the effects of stabilizing sandy soil with EAFS on the reduction of permanent deformation and to verify the applicability of the Shakedown theory. For this purpose, a sample of sandy soil and a sample of Electric Arc Furnace Slag (EAFS) were used. To determine the optimal dosage for the tests, a study was conducted using the simplex- centroid design of experiments method. The result showed that the optimum dosage consisted of 80% soil and 20% EAFS. The test specimens were prepared at normal Proctor energy and optimum moisture content and then cured sealed in a humid chamber for 28 and 56 days. Triaxial repeated load tests were conducted to evaluate the results of permanent deformation, and it was found that stabilizing sandy soil with EAFS significantly reduced permanent deformation compared to the natural state. Furthermore, in the natural state, many specimens could not even withstand the first testing procedure, whereas the chemically stabilized samples withstood a significantly higher number of loading applications, even at high values of ϵ_p . It was also found that extending the curing time did not significantly reduce the reduction in permanent deformation.

KEYWORDS: Sandy soil. Electric arc furnace slag. Soil stabilization. Permanent deformation. Shakedown theory.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo de sua história, o Brasil tem dado prioridade ao modal rodoviário, conforme evidenciado por suas políticas de investimento em transporte. Segundo informações da CNT (2022), as estradas respondem por cerca de 65,0% do transporte de cargas e 95,0% do transporte de passageiros no país. Esta pesquisa, CNT (2022), revelou ainda que aproximadamente 61.311 quilômetros, correspondendo a 55,5% da extensão total das estradas pavimentadas, apresentam algum tipo de problema, seja no pavimento, na sinalização ou na geometria da via. Destes, 31,1% estão em condição regular, 18,6% em condição ruim e 5,8% em condição péssima. As principais falhas observadas incluem desgaste do pavimento, trincas e afundamentos por trilhas de roda.

A fim de melhorar o desempenho e garantir a segurança e estabilidade das estradas, pesquisas têm sido feitas para analisar a melhoria dos parâmetros de resistência de solos estabilizados com materiais com propriedades aglomerantes como cal, cinza volante energética, cinza volante biológica, escória de aciaria, cimento (Lindh; Lemenkova, 2023), polímeros (Huang et al., 2021).

Segundo o relatório de sustentabilidade emitido pelo Instituto Aço Brasil (IAB, 2020), somente a região Sudeste do Brasil foi responsável pela produção de 27 milhões de toneladas de aço, sendo a concentração da maior produção no estado de Minas Gerais. De acordo com esse relatório, a cada tonelada de aço produzida são gerados 622 kg de coprodutos e resíduos siderúrgicos, entre os quais se destaca a escória de aciaria, que sozinha contribui com 25% desse valor. Em 2020, cerca de 63% desse total foi reutilizado, vendido ou doado, restando ainda, 37% sem destino ou tratamento adequado. Nesse contexto de emprego de resíduos como agentes estabilizadores de solo, uma opção de material de baixo custo para uso em pavimentação que vem ganhando destaque são as escórias de aciaria, que são subprodutos da indústria siderúrgica gerados durante a produção de aço a partir da sucata (Terrones-Saeta et al., 2021).

A resposta geral do material de subleito sob carregamentos cíclicos é comumente analisada através de deformações resilientes e permanentes, as quais são frequentemente avaliadas com base na Teoria de *Shakedown*. De acordo com esta teoria, o comportamento de um material pode ser agrupado em três categorias nomeadas como *Shakedown* plástico, fluência plástica e colapso incremental (Wang; Zhuang, 2021). Wang e Zhuang (2021) investigaram a resposta de solos de subleito ferroviário de granulação grossa sob carregamento cíclico com base na Teoria de *Shakedown*. Para caracterizar e quantificar o comportamento dinâmico dos solos foram utilizados ensaios triaxiais dinâmicos. Os resultados da pesquisa indicaram que, embora a tensão dinâmica crítica do solo de granulação grossa aumentasse com o aumento da pressão confinante efetiva, esta diminuía à medida que a frequência de carregamento aumentava de 1,0 Hz para 3,6 Hz.

Diante do exposto, é possível perceber a crescente preocupação com a reutilização de materiais cujo descarte ainda é inadequado, bem como sua aplicação em diversas áreas da engenharia civil. Posto isso, a proposta da presente pesquisa foi avaliar a utilização da escória de aciaria elétrica primária (EAEP) na estabilização de solos, e verificar a aplicabilidade da Teoria de *Shakedown*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Amostra de Solo Arenoso

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma amostra de solo proveniente de jazida de empréstimo localizada no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil. A amostra em questão apresentou predominância de partículas da fração areia. A preparação desse material para os ensaios geotécnicos de laboratório foi realizada conforme a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Os ensaios realizados para fins de caracterização geotécnica das amostras de solos foram: i. Granulometria conjunta, conforme a norma técnica NBR 7181 (ABNT, 2018); ii. Limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), conforme as normas técnicas NBR 6459 (ABNT, 2017a) e NBR 7180 (ABNT, 2016b), respectivamente; iii. Massa específica dos grãos do solo, conforme a norma técnica NBR 6458 (ABNT, 2017b); iv. Compactação na energia do Proctor Normal, conforme a norma técnica NBR 7182 (ABNT, 2020), para fins de determinação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e do teor de

umidade ótimo (w_{ot}) dos solos compactados. Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica são apresentados na Tabela 1.

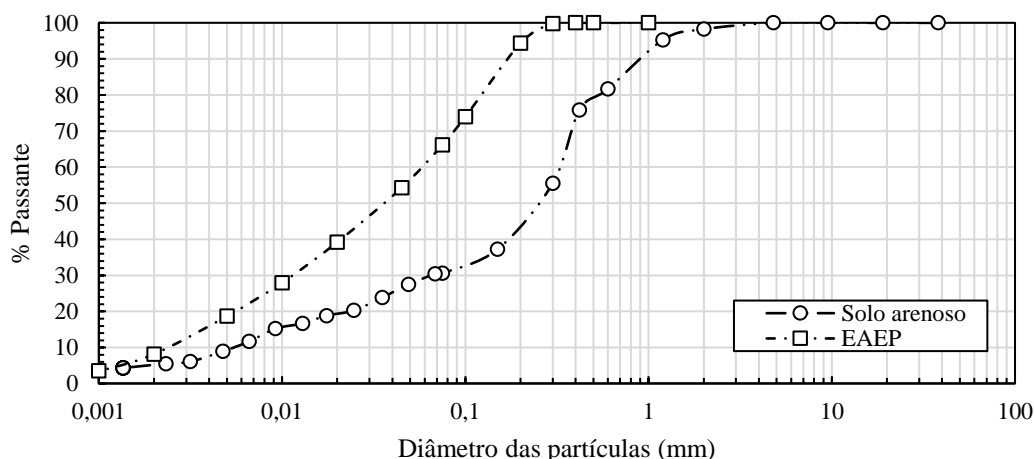
Tabela 1 - Caracterização e classificação geotécnica da amostra de solo analisada.

Parâmetro	Resultado
% argila ($\phi < 0,002$ mm)	5
% silte ($0,002$ mm $< \phi < 0,06$ mm)	24
% areia ($0,06$ mm $< \phi < 2$ mm)	68
% pedregulho (2 mm $< \phi < 60$ mm)	3
LL (%)	36
LP (%)	18
IP (%)	18
ρ_s (g/cm ³)	2,657
$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	15,57
w_{ot} (%)	15,00
TRB	A-2-6 (1)
USC	SC
MCT	NA'

2.1.2 Amostra de EAEP

Para esta pesquisa foram coletadas amostras de EAEP fornecidas por uma empresa que atua no setor de fabricação de tubos metálicos, localizada na região do Alto Paraopeba, estado de Minas Gerais, Brasil. Na sequência, as amostras foram moídas em equipamento de abrasão Los Angeles para redução da sua granulometria em partículas de diâmetros menores que 0,6 mm (peneira #30). Para proceder a redução das amostras de EAEP utilizou-se o procedimento PRO 199 (DNER, 1996b), e a preparação para a realização de ensaios de laboratório conforme a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Os ensaios de caracterização física da amostra de EAEP moída foram realizados seguindo as metodologias preconizadas para caracterização de cimento, a saber: i. Distribuição granulométrica do material depois de passado na peneira de 0,6 mm, determinada por difração a laser conforme a norma ISO 13320 (ISO, 2020); ii. Finura por peneiramento, conforme a norma técnica NBR 11579 (ABNT, 2013); iii. Superfície específica, conforme a norma técnica NBR 16372 (ABNT, 2015); iv. Massa específica, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017c). O índice de finura por peneiramento da amostra de EAEP moída foi de 24,88%, considerado alto para materiais cimentícios no Brasil (Lopes et al., 2021). Em relação à massa específica dos sólidos o valor obtido foi de 3,7 g/cm³. A superfície específica pelo método de Blaine foi de 0,20 m²/g, valor próximo ao requerido para cimento Portland, o qual deve ser superior a 0,24 m²/g (Diniz et al., 2017). A curva granulométrica da amostra de EAEP moída e da amostra de solo arenoso é apresentada na Figura 1.



2.2 Métodos

A fim de avaliar o comportamento no que tange à deformação permanente foram confeccionados nove corpos de prova para cada mistura apresentada na Tabela 2. Os corpos de prova foram confeccionados em moldes cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm e submetidos a cura selada em filme PVC em câmara úmida por 28 dias e 56 dias na temperatura de 20 °C. Posteriormente, foram realizados ensaios de compactação, visando a determinação dos parâmetros ótimos de compactação, na energia Proctor Normal, conforme a NBR 7182 (ABNT, 2020).

Tabela 2 – Misturas de solo arenoso-EAEP

Misturas	S natural ot	SE ot/28	SE ot/56
Teor de umidade	ótimo	ótimo	ótimo
Tempo de cura	0 dias	28 dias	56 dias

A análise da deformação permanente em amostras de solo e misturas solo-EAEP em seu estado natural foi realizada conforme as orientações da norma técnica IE 179 (DNIT, 2018). O ensaio foi conduzido utilizando um equipamento de compressão triaxial, em que nove corpos de prova foram submetidos a 10.000 ciclos de carga. Os dados das tensões aplicadas em cada corpo de prova para cada condição avaliada neste estudo estão apresentados na Tabela 3. Os ciclos de carga foram aplicados a uma frequência de 2 Hz, com 0,1 segundo de carga seguido por 0,4 segundo sem carga.

Tabela 3 - Tensões atuantes nos corpos de prova.

Corpo de prova	Tensão Confinante (σ_3) x Tensão Desvio (σ_d) (kPa)	Razão de tensões σ_1/σ_3
CP1	40 x 40	2
CP2	40 x 80	3
CP3	40 x 120	4
CP4	80 x 80	2
CP5	80 x 160	3
CP6	80 x 240	4
CP7	120 x 120	2
CP8	120 x 240	3
CP9	120 x 360	4

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os resultados de deformação permanente da amostra de solo arenoso em sua condição natural e teor de umidade ótimo, em mm, em função do número de aplicações de carga. Visando facilitar a visualização os corpos de prova submetidos às razões de tensões igual a 2, 3 e 4 são apresentados com marcadores circulares, quadrados e triangulares, respectivamente.

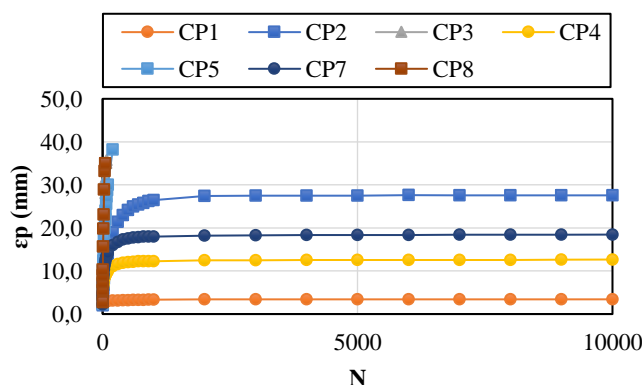


Figura 2 - Deformação permanente da mistura S natural ot

De acordo com a Figura 2, observou-se que a amostra de solo arenoso, em sua condição natural, apresentou valores de deformação permanente muito elevados. Destaca-se que os corpos de prova CP6 e CP9, cuja razão σ_1/σ_3 é 4, não foram ensaiados por terem se rompido ainda no procedimento inicial do ensaio. Os corpos de prova CP5 e o CP8, submetidos à razão σ_1/σ_3 igual a 3, atingiram o colapso incremental. Para os corpos de prova cuja tensão confinante é de 40 kPa (CP1, CP2 e CP3), observou-se que com o aumento da tensão desvio os valores de ϵ_p aumentaram de maneira significativa, ultrapassando a marca dos 30 mm para o caso em que a tensão confinante foi de 40 kPa e a tensão desvio de 120 kPa. Verificou-se que para o CP1, CP2, CP4 e CP7 houve um acomodamento plástico, ou seja, constatou-se a tendência à estabilização da deformação permanente com o número de ciclos de carregamento.

De acordo com Lima (2020), pôde-se observar que o CP1 apresentou um comportamento característico da curva “A”, ou seja, houve um acúmulo de resposta plástica para um número finito de aplicações de cargas até que a resposta se torna “completamente” resiliente, com acréscimo da deformação plástica próximo ao zero matemático, atingindo um estado de equilíbrio. Ainda de acordo com Lima (2020), o comportamento do CP2, CP4 e CP7 pode ser identificado pela curva “AB”, já que, embora tenha ocorrido um acomodamento plástico a partir de um determinado número de aplicações de carga, o que se verificou foram deformações permanentes iniciais significativas, ou seja, somente após uma quantidade expressiva de deformações plásticas que o material atingiu o *Shakedown*. Para o CP3, CP5 e CP8 observou-se o colapso incremental, ou seja, um aumento sucessivo da deformação plástica a cada aplicação de carga, sendo definido pela curva “C”.

A Figura 3 apresenta os resultados de deformação permanente das misturas SE ot/28 e SE ot/56, em mm, em função do número de aplicações de carga.

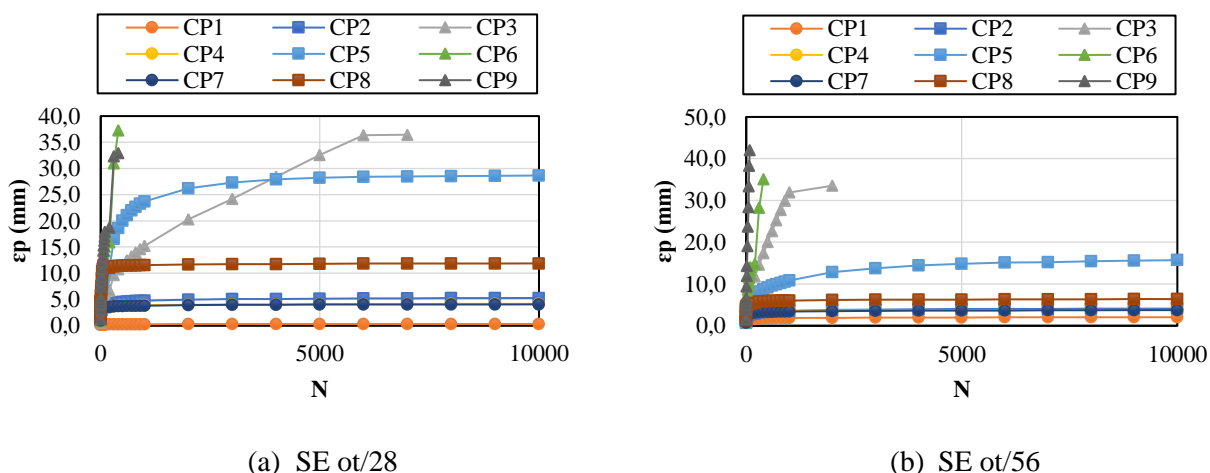


Figura 3 - Deformação permanente das misturas SE ot/28 e SE ot/56 em função do número de aplicação de cargas.

Em relação aos corpos de prova na condição SE ot/28, pôde-se observar que, de modo geral, a tendência apresentada foi uma notável redução nos valores de deformação permanente quando comparados à amostra de solo na condição natural. Além disso, todos os corpos de prova apresentaram resistência suficiente para serem ensaiados, embora aqueles submetidos às maiores razões de carregamento tenham atingido o colapso incremental antes da finalização do ensaio.

Destaca-se que apesar de alguns corpos de prova não terem suportado um número de aplicação de carga $N=10000$, o que se observou é que a estabilização e o tempo de cura de 28 dias tornaram os corpos de provas mais susceptíveis à resistir o ensaio, destacando-se o CP3 que foi de $N=80$ para $N=7000$, o CP5 que foi de $N=200$ para $N=10000$, o CP6 que não suportou o ensaio na condição natural, mas resistiu até $N=400$ na condição ot/28, o CP8 que foi de $N=50$ para $N=10000$ e o CP9 que, de modo análogo ao CP6, não havia resistido ao ensaio na condição natural, mas suportou até $N=400$ para a condição ot/28. Em relação aos corpos de prova submetidos à razão σ_1/σ_3 igual a 4, observou-se que o CP6 e o CP9 atingiram o colapso incremental, curva “C”, já o CP3 apresentou fluência plástica, curva “B”. Para os demais corpos de prova, CP1, CP2, CP4 e CP7 observou-se o *Shakedown*, ou seja, podem ser caracterizados de acordo com a curva “A”, em relação ao CP5 e ao CP8, verificou-se o *Shakedown* após determinado número de aplicações de carga, em suma,

deformações permanentes iniciais significativas seguidas de um acomodamento plástico caracterizando o comportamento da curva tipo “AB”.

Em relação aos corpos de prova SE ot /56, observou-se uma redução ainda maior nos valores de deformação permanente quando comparado com a amostra de solo em sua condição natural, mas pouco expressiva quando comparada aos corpos de prova com cura de 28 dias. A Figura 3 ilustra que todos os corpos de prova cuja razão σ_1/σ_3 é igual a 4, ou seja, CP3, CP6 e CP9 atingiram o colapso incremental, alcançando valores elevados de ϵ_p em poucos ciclos de carga, curva “C”. Para os demais corpos de prova observou-se o acomodamento plástico (*Shakedown*), curva “A”, exceção se faz para o CP5 que embora não tenha apresentado um progressivo aumento da deformação permanente no início do ensaio, revelou um incremento significativo após N=800.

A Tabela 4 apresenta a comparação de alguns resultados de deformação permanente obtidos para as misturas analisadas nesta pesquisa considerando um número de aplicação de carga igual a 10000.

Tabela 4 - Comparação dos valores de deformação permanente entre as misturas analisadas.

Corpo de prova	ϵ_p S natural ot (mm)	ϵ_p SE ot /28 (mm)	ϵ_p SE ot /56 (mm)
CP1	3,42	0,30	2,01
CP2	27,56	5,27	4,10
CP4	12,66	4,14	3,78
CP7	18,46	4,04	3,74

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão em consonância com os estudos realizados utilizando a escória de aciaria como material para estabilização (MOZEJKO; FRANCISCA, 2020; WANG *et al.*, 2020; YU *et al.*, 2021), ou seja, é notável que a adição de escória como agente estabilizador melhora as propriedades mecânicas do solo.

4 CONCLUSÕES

Esta pesquisa revelou que a estabilização das amostras de solo arenoso com EAEP foi eficaz na redução da deformação permanente. Analisando a relação entre tensão e deformação, foi constatado que a estabilização do solo do subleito com EAEP pode aumentar a capacidade de suporte do pavimento. Em relação ao período de cura em câmara úmida, prolongar de 28 para 56 dias não resultou um impacto significativo. Além da redução na deformação permanente, as amostras de solo estabilizadas com EAEP também apresentaram um comportamento de acomodação plástica (*Shakedown*).

Portanto, conclui-se que a estabilização do solo com EAEP pode diminuir a deformação permanente e representa uma alternativa técnica viável. Isso não só melhora as propriedades mecânicas analisadas, mas também permite o uso desses resíduos em projetos de pavimentação, contribuindo a reduzir os impactos ambientais associados a esses materiais.

AGRADECIMENTOS

À UFV por disponibilizar toda estrutura necessária para a realização desse trabalho e aos colegas que colaboram com as atividades de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11579. Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº200). Rio de Janeiro, 2013, 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16372. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015, 11p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16605. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017c, 4p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6457. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a, 8p.
- 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, 2017b, 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6459. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017a, 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7180. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016b, 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018, 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182. Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2020, 9p.
- CNT, Confederação nacional do transporte. Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas. Brasília, 2022. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022>.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – PRO 199. Redução de amostra de campo de agregado para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996b, 5p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – IE 179. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro, 2018, 20p.
- 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*, 29, n. 9, p. 04017118, 2017.
- HUANG, J.; KOGBARA, R. B.; HARIHARAN, N.; MASAD, E. A. et al. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 305, p. 124685, 2021/10/25/ 2021.
- LIMA, C. Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas. 2020. -, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- LINDH, P.; LEMENKOVA, P. Laboratory Experiments on Soil Stabilization to Enhance Strength Parameters for Road Pavement. 24, n. 1, p. 73-82, 2023-02-28 2023.
- LOPES, E. C.; DA SILVA, T. O.; PITANGA, H. N.; PEDROTI, L. G. et al. Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. *International Journal of Pavement Engineering*, p. 1-12, 2021.
- MOZEJKO, C. A.; FRANCISCA, F. M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. 239, p. 117901, 2020/04/10/ 2020.
- TERRONES-SAETA, J. M.; SUÁREZ-MACÍAS, J.; IGLESIAS-GODINO, F. J.; CORPAS-IGLESIAS, F. A. 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, n. 1, 2021.
- WANG, K.; ZHUANG, Y. Characterizing the permanent deformation Response-Behavior of subgrade material under cyclic loading based on the shakedown theory. 311, p. 125325, 2021/12/13/ 2021.
- WANG, S.; LI, X.; REN, K.; LIU, C. Experimental Research on Steel slag Stabilized Soil and its Application in Subgrade Engineering. 38, n. 5, p. 4603-4615, 2020/10/01 2020.
- YU, C.; CUI, C.; WANG, Y.; ZHAO, J. et al. Strength performance and microstructural evolution of carbonated steel slag stabilized soils in the laboratory scale. 295, p. 106410, 2021/12/20/ 2021