

# Efeito da Variação Do Teor De Umidade Na Deformação Permanente No Solo Arenoso Estabilizado Com Escória De Aciaria Elétrica Primária

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:** O objetivo da presente pesquisa é investigar a maneira com a qual o teor de umidade provoca variações nas deformações permanentes de misturas solo-escória de aciaria elétrica primária, além de examinar a aplicabilidade da Teoria de *Shakedown*. Para isso, uma amostra de solo arenoso da região de Viçosa-MG e uma amostra de escória de aciaria elétrica primária (EAEP) de uma empresa em Jeceaba/MG foram utilizadas. A proporção ideal foi obtida utilizando-se a função desejabilidade no software Minitab 18, resultando em uma mistura composta por 80% de solo e 20% de EAEP. Os corpos de prova foram compactados na energia Proctor normal, nos teores de umidade ótimo e 1% abaixo do teor ótimo. Posteriormente, foram submetidos ao processo de cura em câmara úmida por 28 e 56 dias. Em seguida, foram submetidos a testes triaxiais de cargas repetidas para avaliação da deformação permanente. Com isso, observou-se que a diminuição do teor de umidade provoca uma significativa redução no acúmulo de deformações permanentes. Notou-se também que alguns corpos de prova estabilizados no teor de umidade ótimo apresentaram colapso incremental antes mesmo do término do ensaio sendo que muitos deles não atingiram a condição de *Shakedown*. Já nas amostras ensaiadas com teor de umidade abaixo do teor ótimo, apenas um corpo de prova não atingiu o *Shakedown*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilização de solos. Teor de umidade. Deformação permanente. Teoria de *Shakedown*.

**ABSTRACT:** The objective of the present research is to investigate how moisture content causes variations in the permanent deformations of primary electric arc furnace slag-soil mixtures, in addition to examining the applicability of Shakedown Theory. For this purpose, a sample of sandy soil from the Viçosa/MG region and a sample of electric arc furnace slag (EAEP) from a company in Jeceaba/MG were used. The ideal proportion was determined using the desirability function of the Minitab 18 software. The result was a mixture of 80% soil and 20% EAEP. The specimens were compacted at normal Proctor energy, at optimum moisture content and 1% below optimum moisture content and then cured in a moist chamber for 28 and 56 days. They were then subjected to repeated triaxial load tests to evaluate permanent deformation. It was found that a reduction in moisture content led to a significant reduction in permanent deformations. It was also found that some specimens stabilized at optimum moisture content exhibited incremental collapse before the end of the test, with many of them failing to reach the Shakedown condition. Of the samples tested at a moisture content below optimum, only one specimen did not reach the Shakedown.

**KEYWORDS:** Soil stabilization. Moisture content. Permanent deformation. Shakedown Theory.

## 1 INTRODUÇÃO

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. Estudos têm sido realizados visando a utilização de resíduos siderúrgicos, como escória de aciaria, na estabilização de solos, a qual é uma técnica ecologicamente correta e econômica para o descarte de resíduos sólidos (Rezaei-Hosseinabadi et al., 2022; Rodrigues, 2022).

É notório que a adição de aditivos estabilizantes ao solo provoca mudanças relevantes em seu comportamento mecânico e alterações das propriedades geotécnicas. Apesar da relevância dos agentes estabilizadores, outro fator que merece destaque no que tange às melhorias das propriedades geotécnicas do solo é o teor de umidade. Wei; Liu e Ku (2020) estudaram os efeitos do teor de umidade na resistência à compressão não confinada de areias argilosas estabilizadas com cimento. Os resultados mostraram que a resistência mecânica das misturas cimentadas aumentou com o teor de umidade até que um valor limite, a partir do qual houve um decréscimo no valor da resistência mecânica.

Além disso, o efeito do teor de umidade tem sido estudado para avaliar os impactos na deformação permanente do solo. O problema da deformação permanente nos subleitos tem se agravado e apesar de sua parcela ser pequena quando da aplicação de um determinado carregamento, por não ser recuperável, pode se tornar expressiva quando um número elevado de repetições de carga é aplicado (Silva et al., 2021). Lima, Motta e Aragão (2021) investigaram os efeitos de diferentes teores de umidade (abaixo do teor de umidade ótimo, na umidade ótima e acima do teor de umidade ótimo) no comportamento plástico de quatro solos finos tropicais de diferentes classificações através da deformação permanente ( $\epsilon_p$ ). Os resultados indicaram que a deformação permanente aumenta com o teor de umidade e que o teor de umidade no ramo seco resulta em  $\epsilon_{ps}$  menores que àquelas no teor de umidade ótimo, ou seja, a rigidez diminuiu e a deformação permanente aumentou à medida que o teor de umidade aumentou para os solos finos tropicais analisados.

Em relação à resposta geral do material de subleito sob carregamentos cíclicos, observa-se que sua avaliação é comumente realizada 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).

Posto isso, a proposta da presente pesquisa foi avaliar a influência teor de umidade na deformação permanente de um solo arenoso estabilizado com escória de aciaria elétrica primária e, conjuntamente, avaliar 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 da amostra de solo arenoso 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
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,657
$\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,57
w <sub>ot</sub> (%)	15,00
TRB	A-2-6 (1)
USC	SC
MCT	NA'

### 2.1.2 Amostra de EAEP

Para esta pesquisa foram coletadas amostras de escória de aciaria elétrica primária (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, 1996), 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/cm<sup>3</sup>. A superfície específica pelo método de Blaine foi de 0,20 m<sup>2</sup>/g, valor próximo ao requerido para cimento Portland, o 55 qual deve ser superior a 0,24 m<sup>2</sup>/g (Diniz et al., 2017). A curva granulométrica da amostra de EAEP moída e da amostra de solo arenoso é apresentada na Figura 1.

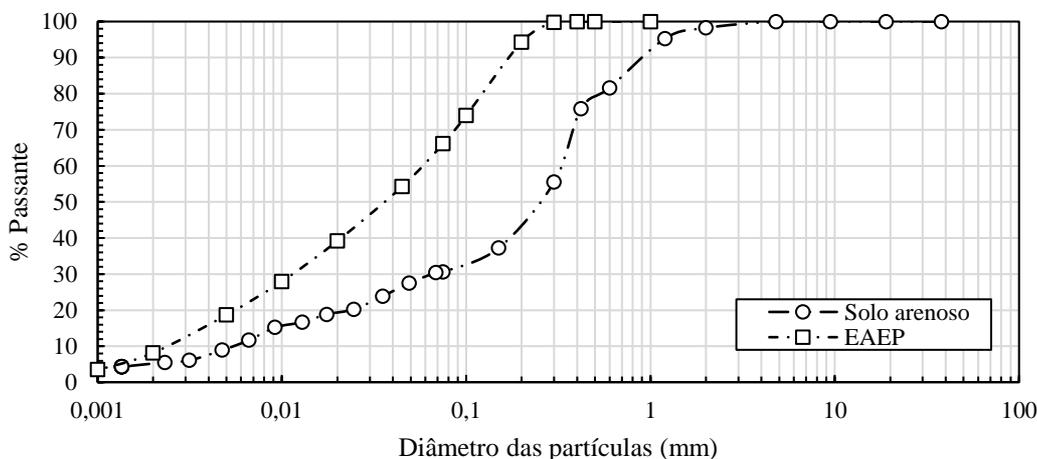


Figura 1 – Curva granulométrica da amostra de EAEP moída e do solo arenoso.

## 2.2 Métodos

Foram realizados ensaios de compactação na energia Proctor Normal para determinar os parâmetros ideais de compactação, conforme especificado na norma NBR 7182 (ABNT, 2020). Com o propósito de analisar o comportamento em relação à deformação permanente, foram produzidos nove corpos de prova para cada mistura listada na Tabela 2, no teor de umidade ótimo e 1% abaixo do teor ótimo. O procedimento não incluiu duplicatas e o desvio máximo de umidade aceitável nesta pesquisa foi de 0,50%. Esses corpos de prova foram confeccionados em moldes cilíndricos, com um diâmetro de 50 mm e uma altura de 100 mm, e foram submetidos a um processo de cura selada em filme de PVC dentro de uma câmara úmida por 28 e 56 dias.

Tabela 2 – Misturas de solo arenoso-EAEP

Misturas	SE -1/28	SE -1/56	SE ot/28	SE ot/56
Teor de umidade	-1%	-1%	ótimo	ótimo
Tempo de cura	28 dias	56 dias	28 dias	56 dias

O ensaio de deformação permanente dos corpos de prova das amostras de solo no estado natural e das misturas solo-EAEP foram realizados conforme a norma técnica IE 179 (DNIT, 2018). O ensaio foi realizado em um equipamento de compressão triaxial que aplica ciclos de cargas em nove corpos de prova, cada um sendo submetido à 10.000 ciclos de cargas. A Tabela 3 apresenta os estados de tensões atuantes em cada um dos nove corpos de prova para cada condição analisada nesta pesquisa. Os ciclos de carregamentos foram realizados na frequência de 2 Hz, sendo 0,1 segundo para a aplicação de carga e 0,4 segundo sem a aplicação do carregamento.

Tabela 3 - Tensões atuantes nos corpos de prova.

Corpo de prova	Tensão Confinante ( $\sigma_3$ ) x	Razão de tensões $\sigma_1/\sigma_3$
	Tensão Desvio ( $\sigma_d$ ) (kPa)	
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 das misturas SE ot /28 e SE -1 /28, em mm, em função do número de aplicações de carga.

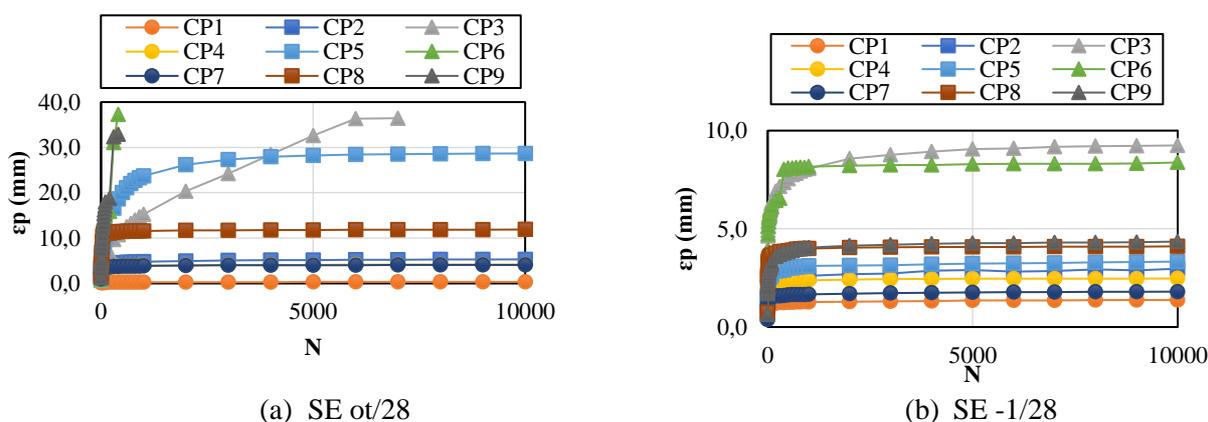


Figura 2 - Deformação permanente das misturas SE ot/28 e SE -1/28 em função do número de aplicação de cargas.

Analisando-se a Figura 2 foi possível observar que no teor de umidade ótimo o CP3, CP6 e CP9 não resistiram ao ensaio, ou seja, apresentaram a condição de colapso incremental. Em poucas aplicações de carga o material apresentou uma diminuição de deformação elástica e aumento da deformação plástica, levando à interrupção do ensaio. Notou-se que nesta condição, 5 corpos de prova ultrapassaram 10 mm de deformação; além disso, os corpos de prova submetidos a razão  $\sigma_1/\sigma_3$  igual a 4 apresentaram  $\epsilon_p$  da ordem de 40 mm, em suma, 40% de deformação axial.

Em relação à mistura SE -1 /28 verificou-se que nenhum corpo de prova ultrapassou 10 mm de deformação, além disso, todos os corpos de prova atingiram a condição de *Shakedown*, inclusive aqueles submetidos às tensões mais elevadas. Ressalta-se que para o CP6, CP8 e CP9 as deformações permanentes iniciais foram expressivas e seguiu-se o acomodamento plástico após determinado número de aplicações de carga, caracterizando uma curva típica AB segundo Lima (2020), ou seja, após uma quantidade expressiva de deformações plásticas, a mistura atingiu o *Shakedown*. Em suma, o material apresenta comportamento do tipo *Shakedown* plástico, porém com maior magnitude inicial de acúmulo de deformação permanente.

Acerca dos demais corpos de prova, verificou-se compatibilidade com a curva “A” segundo Lima (2020), houve um acúmulo de resposta plástica para um número finito de aplicações de cargas até que a resposta se tornou “completamente” resiliente, com acréscimo da deformação plástica próximo ao zero matemático, atingindo um estado de equilíbrio.

A Figura 3 apresenta os resultados de deformação permanente das misturas SE ot /56 e SE -1 /56, em mm, em função do número de aplicações de carga.

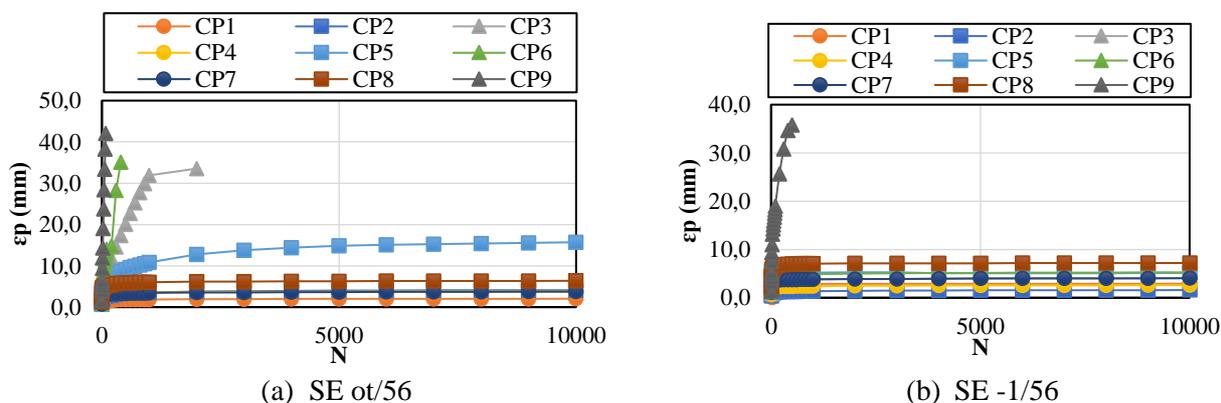


Figura 3 - Deformação permanente das misturas SE ot/56 e SE -1/56 em função do número de aplicação de cargas.

Em relação aos corpos de prova SE ot /56, observou-se uma redução pouco expressiva quando comparada aos corpos de prova com cura de 28 dias. De modo geral, os valores da deformação permanente reduziram-se, com exceção do CP1. A Figura 3 mostra que todos os corpos de prova cuja razão entre as tensões ( $\sigma_1/\sigma_3$ ) utilizada foi igual a 4, ou seja, CP3, CP6 e CP9 atingiram o colapso incremental, alcançando valores elevados de  $\epsilon_p$  em poucos ciclos de carga. Para os demais corpos de prova observou-se o acomodamento plástico (*Shakedown*), 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  $N=800$ .

O comportamento da mistura SE -1 /56 foi semelhante ao comportamento das misturas SE -1/28, ressaltando-se, no entanto, que neste caso ocorreram valores de deformação permanente até cerca de 36 mm (CP9) para um valor de número de aplicações de carga igual a 500, evidenciando a condição de colapso incremental.

Comparando-se os valores de  $\epsilon_p$  para o teor de umidade ótimo e para o teor de umidade 1% abaixo do teor de umidade ótimo, o que se verificou foi que o prolongamento do tempo de cura em câmara úmida não promoveu reduções na deformação permanente, mas, de modo geral, tornou os corpos de prova mais susceptíveis a resistir às razões de carregamento mais elevadas. Destaca-se que, à exceção do CP9 na condição SE -1/56, todos os corpos de prova ensaiados no teor de umidade 1% abaixo do teor ótimo atingiram o

*Shakedown*. Notou-se que a redução do teor de umidade foi o fator que mais influenciou na diminuição da deformação permanente para as condições estudadas nesta pesquisa. A Tabela 4 compara os valores de  $\epsilon_p$  para alguns corpos de prova ensaiados nesta pesquisa para um número de aplicações de carga igual a 10.000.

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

Corpo de prova	$\epsilon_p$ SE ot /28 (mm)	$\epsilon_p$ SE -1 /28 (mm)	$\epsilon_p$ SE ot /56 (mm)	$\epsilon_p$ SE -1 /56 (mm)
CP2	5,27	2,97	4,10	1,61
CP4	4,14	2,47	3,78	2,60
CP5	28,66	3,33	15,71	5,13
CP7	4,04	1,80	3,74	4,05
CP8	11,87	4,11	6,38	7,20

De acordo com a literatura técnica, a rigidez dos materiais é afetada pelo teor de umidade, sendo, em diversos estudos, o fator mais influente no que tange às alterações de comportamento geotécnico do material (Lima et al., 2021, Silva et al., 2021). Embora a água seja um elemento importante com relação à compactação do material, a lubrificação das partículas pode reduzir o atrito e o intertravamento entre elas, ou seja, é de se esperar que corpos de prova compactados abaixo do teor de umidade ótimo apresentem um ganho de rigidez e, conseqüentemente, uma diminuição na deformação permanente, conforme foi demonstrado nesta pesquisa.

#### 4 CONCLUSÕES

Com esta pesquisa foi possível observar que a extensão do tempo de cura de 28 para 56 dias não provocou mudanças substanciais em nenhuma das misturas solo-EAEP examinadas. No entanto, ao reduzir o teor de umidade ótimo em apenas 1%, notou-se uma diminuição considerável na deformação permanente, sendo este o fator mais influente nos valores de  $\epsilon_p$ , dentre os fatores analisados neste estudo. Dessa forma, observou-se uma tendência de redução nos índices de deformação permanente com a diminuição do teor de umidade, o que está em concordância com a literatura técnica (Silva et al., 2021; Nguyen e Indraratna, 2023).

Adicionalmente, notou-se que as amostras de solo estabilizadas com EAEP demonstraram também um acomodamento plástico (*Shakedown*), o qual foi alcançado para quase todos os corpos de prova na condição 1% abaixo do teor de umidade ótimo, mesmo para aqueles submetidos à elevados pares de tensões.

#### 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 (2016a). NBR 6457. *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017b). 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 (2017a). NBR 6459. *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016b). NBR 7180. *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 7182. *Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). NBR 11579. *Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu$ 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 (2017c). NBR 16605. *Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.
- CNT, Confederação nacional do transporte (2022). *Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas*. Brasília. Disponível em: <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022>>. Acesso em mar. 2024.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1996). PRO 199. *Redução de amostra de campo de agregado para ensaio de laboratório*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). IE 179. *Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Diniz, D. H.; Carvalho, J. M. F. D.; Mendes, J. C.; Peixoto, R. A. F (2017). *Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29, n. 9, p. 04017118
- IAB (2020). *Relatório de sustentabilidade*. Instituto Aço Brasil.
- Lima, C (2020). *Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Lima, C. D. A.; Motta, L. M. G.; Aragão, F. T. S (2021). A permanent deformation predictive model for fine tropical soils considering the effects of the compaction moisture content on material selection. *Transportation Geotechnics*, 28, p. 100534, 2021/05/01/ 2021.
- Nguyen, T. T.; Indraratna, B (2023). Influence of varying water content on permanent deformation of mud-fouled ballast. *Transportation Geotechnics*, 38, p. 100919, 2023/01/01/ 2023.
- Rezaei-Hosseinabadi, M. J.; Bayat, M.; Nadi, B.; Rahimi, A (2022). Sustainable utilisation of steel slag as granular column for ground improvement in geotechnical projects. *Case Studies in Construction Materials*, 17, p. e01333.
- Rodrigues, K. H. D. P (2022). *Utilização de Resíduos Industriais na Estabilização de Solos Tropicais para Aplicação em Pavimentação*. Orientador: SILVA, T. O. d. 231 f. (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.
- Silva, M. F. D.; Ribeiro, M. M. P.; Furlan, A. P.; Fabbri, G. T. P (2021). Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil. *Transportation Geotechnics*, 26, p. 100443.
- Wang, K.; Zhuang, Y (2021). Characterizing the permanent deformation Response-Behavior of subgrade material under cyclic loading based on the shakedown theory. *Construction and Building Materials*, 311, p. 125325.
- Wei, X.; Liu, H.; Ku, T (2020). Microscale analysis to characterize effects of water content on the strength of cement-stabilized sand-clay mixtures. *Acta Geotechnica*, 15, n. 10, p. 2905-2923.