

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/414

## Influência Do Teor De Umidade Na Redução Da Deformação Permanente No Solo Argiloso 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.

Taciano Oliveira da Silva

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

Heraldo Nunes Pitanga

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

Juliana Rodrigues Silva

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

**RESUMO:** O presente trabalho investigou a influência do teor de umidade em misturas solo-escória no que tange a redução de deformações permanentes no subleito; além de verificar a aplicabilidade da teoria de *Shakedown*. Para isso, utilizaram-se amostras de solo e de escória de aciaria elétrica primária (EAEP), na proporção 80% de solo e 20% de EAEP, baseado na metodologia de planejamento experimental em rede simplex-centróide. Foram confeccionados 36 corpos de prova na energia Proctor normal, sendo 18 no teor de umidade ótimo e 18 no teor de umidade 1% abaixo do teor ótimo, em seguida, foram submetidos à cura selada em câmara úmida por 28 e 56 dias. Procedeu-se à realização dos testes triaxiais de cargas repetidas para a avaliação dos resultados de deformação permanente. Observou-se que a diminuição no teor de umidade gerou uma redução expressiva no acúmulo da deformação permanente. O prolongamento do tempo de cura, no entanto, não se mostrou eficaz nesse aspecto. Além disso, notou-se que muitos corpos de prova compactados no teor de umidade ótimo, mesmo submetidos ao processo de cura em câmara úmida, não atingiram o *Shakedown*, ao passo que para a condição compactada 1% abaixo do teor ótimo somente o corpo de prova submetido ao maior estado de tensões não atingiu o *Shakedown*.

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

**ABSTRACT:** This study investigates the influence of moisture content in soil-slag mixtures on the reduction of permanent deformations in the subgrade and evaluates the applicability of the Shakedown theory. Samples of soil and electric arc furnace slag (EAES) were used in a ratio of 80% soil to 20% EAEP, based on the experimental design methodology using a simplex- centroid network. Thirty-six specimens were prepared using standard Proctor energy, 18 at optimum moisture content and 18 at 1% below optimum moisture content. They were then sealed and cured for 28 and 56 days in a humid chamber. Triaxial tests with repeated loads were performed to evaluate the results of permanent deformation. It was found that the decrease in moisture content led to a significant reduction in the accumulation of permanent deformation, while the extended curing time did not prove effective in this respect. It was also found that many specimens compacted at optimum moisture content did not achieve shakedown even after moist curing. In contrast, for the specimens that were compacted at 1% below the optimum moisture content, only the specimen that was subjected to the highest stress level did not achieve Shakedown.

**KEYWORDS:** Soil stabilization. Electric arc furnace slag. Moisture content. Permanent deformation. *Shakedown* theory.

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional mundial aliado ao desenvolvimento socioeconômico e à crescente urbanização fez surgir a necessidade de investimentos em infraestrutura urbana, sobretudo nas regiões metropolitanas onde o tráfego se tornou considerável. De acordo com a CNT (2022) concluiu-se que 55,5% da extensão total das rodovias pavimentadas apresentam algum tipo de problema, seja no pavimento, na sinalização ou na geometria da via. Dentre as patologias citadas na pesquisa rodoviária da CNT (2022) destacam-se o desgaste do pavimento, as trincas e os afundamentos por trilha de rodas.

O solo de subleito é um possível responsável para o desenvolvimento do afundamento nas trilhas de rodas, sendo que sua capacidade de suporte influencia diretamente na condição estrutural de um pavimento (Huang, 2004). Uma melhoria das propriedades de engenharia do solo do subleito pode aumentar significativamente a vida útil de uma rodovia. A solução mais utilizada para alcançar essa finalidade é a estabilização de solos que pode ser química ou granulométrica (Rodrigues, 2022). Nesse contexto, uma opção de material de baixo custo para uso em pavimentação que vem ganhando destaque são as escórias de aciaria (Terrones-Saeta et al., 2021).

Outro fator que merece destaque no que tange às alterações das propriedades geotécnicas de um 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 um valor limite, a partir do qual houve um decréscimo no valor da resistência mecânica. Além das alterações supracitadas, 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, mas por não ser recuperável, pode se tornar expressiva quando um número elevado de repetições de carga é aplicado (Silva 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 essa teoria, o comportamento de um material pode ser agrupado em três categorias nomeadas como *Shakedown* plástico, fluência plástica e colapso incremental (Wang; Zhuang, 2021). Estudos têm sido realizados com o propósito de avaliar a aplicabilidade da Teoria de *Shakedown* em materiais reciclados, atuando como materiais das camadas estruturais de um pavimento, submetidos a carregamentos cíclicos (Ghorbani et al., 2021; Mohammadinia et al., 2020; Wang; Zhuang, 2021).

Posto isso, a proposta da presente pesquisa foi avaliar a influência teor de umidade na deformação permanente de um solo argiloso estabilizado com escória de aciaria elétrica primária e, concomitantemente, analisar a aplicabilidade da Teoria de *Shakedown*.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

#### 2.1.1 Amostra de Solo Argiloso

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma amostra de solo residual proveniente de jazidas de empréstimo localizadas no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil. A preparação dessa amostra 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. A amostra de solos foi classificada segundo a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), de acordo com a CLA 259 (DNER, 2023), e segundo os sistemas de classificação de solos TRB (*Transportation Research Board*), conforme a M 145-91 (AASHTO, 2017), e USC (*Unified Soil Classification*), conforme a D2487 (ASTM, 2017).

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

Parâmetro	Resultado
% argila ( $\phi < 0,002$ mm)	61
% silte ( $0,002$ mm $< \phi < 0,06$ mm)	14
% areia ( $0,06$ mm $< \phi < 2$ mm)	25
% pedregulho ( $2$ mm $< \phi < 60$ mm)	0
LL (%)	78
LP (%)	43
IP (%)	35
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,869
$\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	13,95
$w_{ot}$ (%)	31,03
TRB	A-7-5 (20)
USC	MH
MCT	LG'

### 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, 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/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 qual deve ser superior a 0,24 m<sup>2</sup>/g (Diniz et al., 2017). A curva granulométrica da amostra de EAEP moída é apresentada na Figura 1.



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os resultados de deformação permanente da amostra de solo, em mm, em função do número de aplicações de carga.

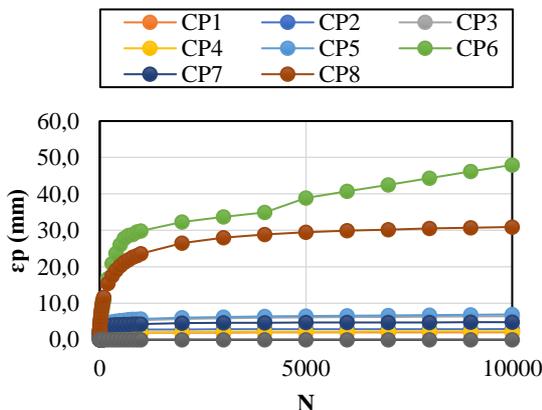


Figura 2 - Deformação permanente da amostra de solo em função do número de aplicação de cargas.

Observou-se que a amostra de solo S1, em sua condição natural, apresentou valores de deformação permanente elevados. Destacam-se os corpos de prova CP6 e CP8, cujos valores de  $\epsilon_p$  ultrapassaram 30 mm, correspondente a 30% de deformação axial.

A Figura 3 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.

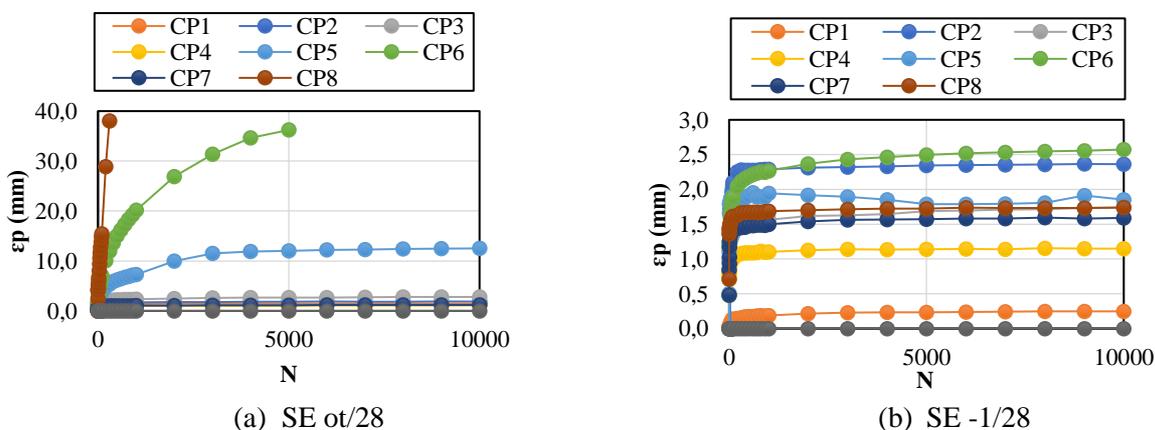


Figura 3 - Deformação permanente das misturas SE ot/28 e SE -1/28 em função do número de aplicação de cargas.

A adição de EAEP considerando 28 dias de cura e o teor de umidade ótimo alterou de forma distinta os corpos de prova CP5, CP6 e CP8 do restante dos outros corpos de prova. Os CP5, CP6 e CP8, que representam razão de tensões mais elevadas apresentaram maiores deformações quando comparados aos mesmos CPs de solo puro o que pode ser explicado pela perda de coesão devido a adição de EAEP que é um material granular e sem coesão. Já para os outros corpos de prova, que representam menores razões de tensões, a diminuição da deformação permanente pode ser explicada pela alteração da granulometria da mistura solo-escória. Esses resultados estão de acordo com a literatura técnica, pois uma maior razão de tensões implica em tornar a tensão desvio mais relevante, e nesse caso a coesão dos materiais tem grande influencia nas deformações, enquanto que para menores razões de tensões, a tensão confinante passa a ser relevante, principalmente para materiais granulares, que aumentam de rigidez com o aumento da tensão confinante (Medina e Motta, 2015).

Em relação aos corpos de prova ensaiados no teor de umidade ótimo observou-se que aqueles submetidos às tensões menores não apresentaram valores elevados de deformação permanente. Quando, no entanto, as tensões aplicadas atingiram valores mais elevados, tornou-se possível observar o rápido acúmulo de deformação.

Destacaram-se os corpos de prova CP6 e CP8, cujos valores de  $\epsilon_p$  ultrapassaram a marca de 30 mm, evidenciando a condição fluência plástica e colapso incremental, respectivamente, levando à interrupção do ensaio em um número de aplicações de carga iguais a 5000 e 300, nesta ordem. Em relação ao CP8 observou-se o rápido acúmulo de deformação permanente já no início do ensaio, atingindo o valor de 38,01 mm antes de o ensaio ser paralisado. Ressalta-se que não foi possível proceder ao ensaio do CP9, submetido aos pares de tensão correspondentes a 120 kPa de tensão confinante e 360 kPa de tensão desvio. Para as misturas SE ot/28 o fenômeno do *Shakedown* não pode ser observado para valores elevados de tensões.

Em relação à mistura SE -1/28 verificou-se que nenhum corpo de prova ultrapassou a marca de 3 mm de deformação, exceção se faz para o CP9 que não suportou o ensaio com as tensões de 120 kPa de confinamento e 360 kPa de tensão desvio. Além disso, com exceção do CP5 que apresentou uma oscilação anormal, todos os corpos de prova atingiram o *Shakedown*, inclusive aqueles submetidos às tensões mais elevadas.

A Figura 4 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.

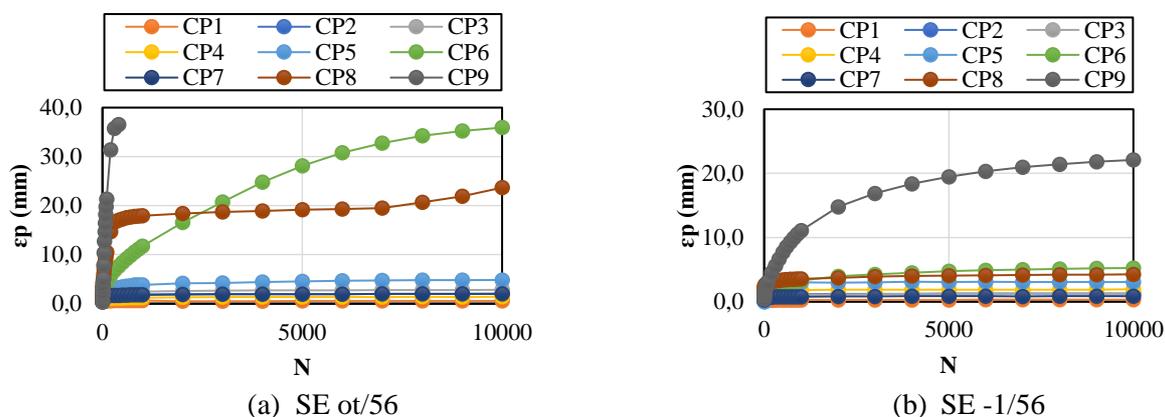


Figura 4 - Deformação permanente das misturas SE ot/56 e SE -1/56 em função do número de aplicação de cargas.

Com relação à mistura SE ot/56, pôde-se observar que não houve nenhuma redução significativa nos valores de deformação permanente quando comparado à mistura SE ot/28, ou seja, o prolongamento no tempo de cura em câmara úmida não produziu nenhuma variação considerável. Destaca-se, no entanto, que para a cura de 56 dias, foi possível proceder à finalização do ensaio do CP6 e CP8, ainda que esses apresentassem a condição de fluência plástica, o que pode ser constatado pelo progressivo aumento de deformação permanente após múltiplas aplicações de carga mesmo este estando com baixa taxa de acréscimo de deformação permanente. Pôde-se observar, inclusive, que foi possível ensaiar o CP9, cujos pares de tensão foram 120 x 360 kPa, embora o ensaio não tenha sido concluído ( $N = 400$ ) por ter-se atingido o colapso incremental e, conseqüentemente, o limite máximo de  $\epsilon_p$  do equipamento.

O comportamento da mistura SE -1/56 foi semelhante ao comportamento da mistura SE -1/28, ou seja, novamente não foram observadas variações expressivas com o aumento do tempo de cura. Ressalta-se, no entanto, que neste caso ocorreram valores de deformação permanente até cerca de 5,50 mm e que o CP9 apresentou valores elevados de  $\epsilon_p$  (da ordem de 22 mm), evidenciando a ocorrência de fluência plástica, condição esta que também foi observada para o CP6.

Comparando-se as duas misturas submetidas ao processo de cura por 56 dias, notou-se que, de modo análogo à condição de cura com 28 dias, há uma diminuição expressiva no valor da deformação permanente quando o teor de umidade é reduzido. Para o teor de umidade ótimo, o CP6 e o CP8 apresentaram a condição de fluência plástica e o CP9 evidenciou o colapso incremental, ou seja, para tensões mais elevadas não foi possível atestar a condição de *Shakedown*, tampouco finalizar o ensaio do CP9 (paralisação do ensaio em

N=400). Na condição de 1% abaixo do teor de umidade ótimo, entretanto, o que se observou foi o acomodamento plástico de todos os corpos de prova, exceção se faz para o CP9 que, embora tenha apresentado fluência plástica suportou o ensaio em sua totalidade (N=10.000).

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. 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.

#### 4 CONCLUSÕES

Com esta pesquisa foi possível observar que o prolongamento no tempo de cura de 28 para 56 dias não resultou em alterações significativas em nenhuma das misturas solo-EAEP analisadas. Entretanto, ao proceder à diminuição em apenas 1% do teor de umidade ótimo, o que se observou foi uma redução expressiva nos valores de deformação permanente, sendo esse o fator que mais influenciou nos valores de  $\epsilon_p$ , dentre os fatores analisados nesta pesquisa. Posto isso, observou-se que há uma tendência de redução dos valores de deformação permanente com a diminuição do teor de umidade, estando em consonância com a literatura técnica.

Além disso, 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

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO M 145-91: Standard Specification for Classification of Soils and Soil Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes Washington, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2487-17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Pensilvânia ASTM International, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11579. Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (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.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-CLA 259: Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação. Rio de Janeiro, 2023.
- 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, Y. H. Pavement analysis and design. 2004. 0136552757.
- 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.
- MEDINA, J. d.; MOTTA, L. M. G. d. Mecânica dos pavimentos. Editora Interciência, 2015. 8571933669.
- RODRIGUES, K. H. d. P. Utilização de Resíduos Industriais na Estabilização de Solos Tropicais para Aplicação em Pavimentação. Orientador: SILVA, T. O. d. 2022. 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. Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil. *Transportation Geotechnics*, 26, p. 100443, 2021/01/01/ 2021.
- 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. *Construction and Building Materials*, 311, p. 125325, 2021/12/13/ 2021.
- WEI, X.; LIU, H.; KU, T. 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, 2020/10/01 2020.