

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/658

Análise estrutural de um projeto de pavimento flexível com subleito estabilizado com escória de aciaria elétrica secundária

Mateus Henrique Ribeiro Rodrigues

Doutorando em Engenharia Civil, UFV, Viçosa, Brasil, mateus.ribeiro@ufv.br

Bruna Martins de Melo

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

Klaus Henrique de Paula Rodrigues

Professor, UFV, Viçosa, Brasil, klaus@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 desta pesquisa foi realizar uma análise estrutural avaliando a influência da estabilização química com escória de aciaria elétrica secundária em duas amostras de solos tropicais compondo o subleito de um pavimento flexível. Foram confeccionadas misturas solo-escória com as porcentagens de 5%, 12,5% e 20% de escória. Foram compactados corpos de prova para a realização dos ensaios de CBR e módulo de resiliência. O índice CBR das misturas solo-escória foi determinado e posteriormente foi utilizado para realizar o dimensionamento empírico de um pavimento flexível. Esse pavimento foi submetido a uma análise mecanística no software AEMC considerando os resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência e tendo como pontos de análise o deslocamento vertical no topo do revestimento asfáltico, a deformação horizontal na fibra inferior dessa mesma camada e a deformação vertical no topo do subleito. Apesar dos pavimentos terem sido dimensionados através do método empírico baseado no ensaio de índice CBR, os pavimentos não apresentaram boas respostas quanto a análise mecanística-empírica realizada no AEMC. Entretanto observou-se que houve uma melhora de desempenho do pavimento quando o subleito foi composto pelas misturas solo-escória em comparação com o mesmo pavimento quando o subleito foi composto pelo solo natural.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento flexível, Estabilização de solos, Escória de aciaria elétrica secundária, Análise estrutural, AEMC.

ABSTRACT: The objective of this study was to perform a structural analysis to evaluate the influence of chemical stabilization with ladle furnace slag on two samples of tropical soils composing the subgrade of a flexible pavement. Soil-slag mixtures were prepared with proportions of 5%, 12.5% and 20% slag. Specimens were compacted to perform the CBR and resilient modulus tests. The CBR index of the soil-slag mixtures was determined and subsequently used for the empirical design of a flexible pavement. This pavement was subjected to a mechanistic analysis in the AEMC software, which took into account the resilient modulus results and had as analysis points the vertical displacement at the top of the asphalt layer, the horizontal deformation in the bottom fiber of the same layer, and the vertical deformation at the top of the

subgrade. Although the pavements were designed using the empirical method based on the CBR index test, the pavements did not show good responses to the mechanistic-empirical analysis performed at AEMC. However, it was found that the performance of the pavement improved when the subgrade was composed of soil-slag mixtures compared to the same pavement when the subgrade was composed of natural soil.

KEYWORDS: Flexible pavement, Soil stabilization, Ladle Furnace Slag, Structural analysis, AEMC.

1 INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica brasileira produz mais de 34,4 milhões de toneladas de aço por ano, o que gera aproximadamente 5,5 milhões de toneladas de coprodutos classificados como escória de aciaria (IAB, 2018). Diante do grande volume com que são gerados e dos riscos ambientais relacionados à sua disposição indevida no meio físico (Siddique et al., 2020), os coprodutos siderúrgicos caracterizam-se como um desafio para as empresas do ramo, que buscam alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para a utilização desses materiais (Naidu et al., 2020).

Há diversos estudos que comprovaram a eficiência de escórias de aciaria e cinzas volantes como materiais alternativos para camadas de base e sub-base de pavimentos (Maghool et al., 2019, Rodrigues et al., 2024, Rodrigues et al., 2023, Lopes et al., 2022).

Nos métodos de projeto de pavimentação asfáltica baseados em abordagens mecanístico-empíricas, os principais critérios de falha comumente considerados são o trincamento por fadiga e o afundamento plástico nas trilhas de rodas (Huang, 2004).

A avaliação do trincamento por fadiga em pavimentos asfálticos é fundamentada na deformação horizontal de tração na borda inferior do revestimento asfáltico (Huang, 2004). O desempenho em fadiga de misturas asfálticas pode ser influenciado por diversos fatores, como projeto estrutural inadequado, cargas repetidas pesadas, drenagem de baixa qualidade, variações na temperatura ambiente e endurecimento do ligante asfáltico devido ao envelhecimento em temperaturas intermediárias e baixas (Abd Duraid e Al-Khalid, 2022).

O afundamento plástico nas trilhas de rodas ocorre especificamente em pavimentos asfálticos (Huang, 2004), representando um dos principais problemas enfrentados por esses pavimentos (Du et al., 2018). Essa falha geralmente afeta todas as camadas do pavimento (Domingos e Faxina, 2016, Islam e Tarefder, 2020). A densidade, velocidade e carga dos veículos, juntamente com as condições climáticas, influenciam a ocorrência do afundamento plástico nas trilhas de rodas, sendo que pavimentos construídos sobre solos de baixa capacidade de suporte tendem a ser mais suscetíveis a essa patologia, o que resulta em necessidades frequentes de manutenção (Bildik e Laman, 2020). Portanto, é crucial analisar a deflexão na superfície do revestimento asfáltico e a deformação vertical no topo do subleito para obter informações detalhadas sobre o afundamento plástico nas trilhas de rodas.

De acordo com Islame Tarefder (2020), o módulo de resiliência é o parâmetro mais significativo no dimensionamento de pavimentos asfálticos por meio de métodos mecanístico-empíricos, e está diretamente relacionado a um dos principais mecanismos de falha em pavimentos flexíveis brasileiros, o trincamento por fadiga, conforme destacado por Santos et al. (2020).

Ainda há poucos estudos na literatura que tenham investigado os efeitos da adição de EAES visando a estabilização de solos de baixa capacidade de suporte, realizando uma análise estrutural contendo esse material. Tendo isso em mente o objetivo geral deste estudo foi realizar uma análise estrutural dos efeitos da adição de EAES em solos, misturas essas que foram utilizadas na camada de subleito de um pavimento asfáltico visando realizar uma análise estrutural desse pavimento.

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).

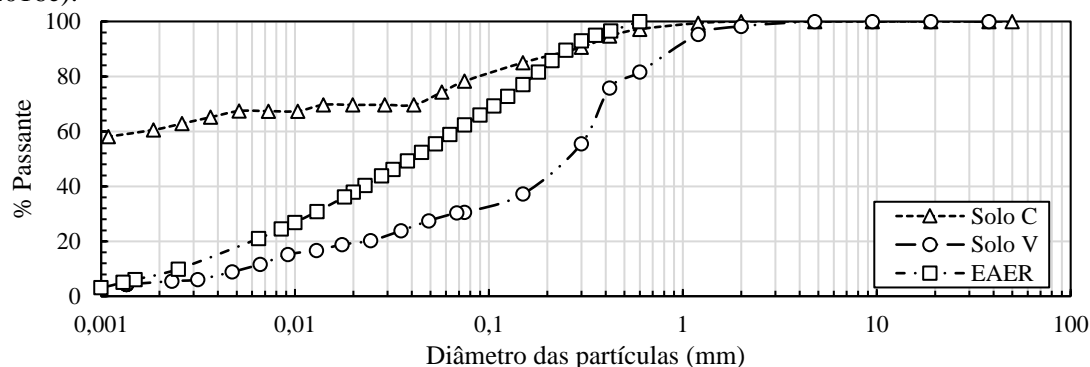


Figura 1: Curva granulométrica dos materiais.

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	LA'	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, 2012) 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.

3 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

3.1. Ensaio de compactação

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

3.2. 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. Os corpos de prova foram confeccionados considerando um período de cura em câmara úmida de 7 dias. 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.

3.3. Pavimento de anteprojeto

Conforme estudos de Carvalho et al. (2020) e Rodrigues et al. (2024) foi adotado como dimensionamento do anteprojeto o método empírico de dimensionamento do DNIT para vida útil de 10 anos submetido às condições:

- Número de operações do eixo padrão de 80 kN: ($N_{projeto}$) de $1,6 \times 10^7$, para USACE (United States Army Corps of Engineers), e $5,0 \times 10^6$, para AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials);
- Estrutura composta por 10 cm de revestimento em concreto asfáltico, função do $N_{projeto}$ da USACE (DNIT, 2006), por materiais de base e sub-base granulares, e subleito constituído dos próprios solos e suas misturas com EAEP.

Para realizar o dimensionamento pelo método empírico do DNIT (2006), as características das camadas de base e sub-base utilizadas na estrutura do pavimento asfáltico de anteprojeto foram adotadas de acordo com os valores mínimos recomendados pelo manual de pavimentação e são apresentadas na Tabela 3, em que k é o coeficiente de equivalência estrutural. As características das amostras de solo utilizadas no subleito foram obtidas através de ensaios de laboratório.

Tabela 3: Características dos materiais das camadas do pavimento de anteprojeto.

Parâmetro	Camada			
	Base	Sub-base	Subleito solo C	Subleito solo V
CBR (%)	80	20	11	8
Expansão (%)	0,5	1	0,93	0,26
Índice de Grupo	0	0	20	1
k	1	1	-	-

As espessuras das camadas do pavimento de anteprojeto, resultado do dimensionamento são apresentadas na Figura 2. Para ambas amostras de solo, as camadas estruturais do pavimento obtiveram as mesmas espessuras.

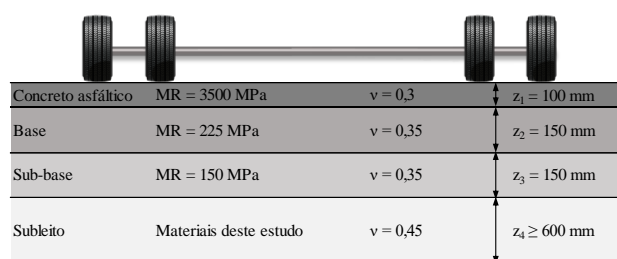


Figura 2: Estrutura do pavimento de anteprojeto.

Os valores de MR e coeficientes de Poisson (ν) utilizados foram obtidos da norma técnica DER-SP (2006), excetuando o subleito, onde foram utilizados os valores de MR obtidos dos ensaios e coeficiente de Poisson de 0,45.

3.4. Análise estrutural

A análise estrutural foi realizada no software AEMC com respostas do tipo tensão-deformação. Foram realizadas três análises visando avaliar os dois critérios de ruptura mais utilizados (trincamento por fadiga e afundamento plástico nas trilhas de rodas): i) deformação vertical do topo do subleito (ϵ_v), análise que demonstra a contribuição desta camada no afundamento plástico por trilha de roda, assim como a capacidade de carga da mesma; ii) deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico (ϵ_t), o qual tem a capacidade de indicar a susceptibilidade ao trincamento por fadiga; iii) deflexão no topo da camada de revestimento asfáltico (U_z), o qual se relaciona com o afundamento plástico de trilhas de roda decorrente da soma das contribuições de todas as camadas (Huang, 2004, Islam e Tarefder, 2020).

Para as realizações das análises supracitadas, apenas o subleito de anteprojeto teve alteração de material. Não foi considerada a aderência entre as camadas do pavimento asfáltico, seguindo recomendações de FrancoeMotta (2020).

Os pontos arbitrados para extrair os valores das análises de deformação e deflexão supracitadas foram o eixo central das rodas (ECR) e o eixo de simetria entre as duas rodas (ESR) do semieixo padrão, verificando sempre o mais crítico.

Seguindo as orientações do Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006), utilizou-se o carregamento do eixo padrão rodoviário (80 kN); distância entre rodas do semieixo de 324 mm; pressão de inflação dos pneus de 560 kPa e raio da área de contato entre pneu e pavimento de 10,79 cm.

Por fim, utilizando as equações e valores de k e n extraídos da norma técnica DER-SP (2006), analisou-se o número de solicitações de eixo padrão que o pavimento flexível adotado teria capacidade de suportar (N_{adm}). Para a determinação do N_{adm} para a deformação horizontal na fibra inferior do revestimento asfáltico, considerou-se os fatores de equivalência carga (FEC) da AASHTO; já nas equações para cálculo do N_{adm} referente à deflexão no topo do revestimento e à deformação vertical no topo do subleito, utilizou-se os FEC da USACE. As equações e coeficientes k e n utilizados para obtenção dos N_{adm} são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros utilizados para a previsão do número N_{adm} .

Local da Análise	Equação	Fonte
Topo do revestimento	$N_{tr} = \sqrt[n]{\frac{10^k}{D}}$	DER-SP (2006)
Fibra inferior do revestimento	$N_{ir} = k \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^n$	DER-SP (2006)
Topo do subleito	$N_{sub} = k \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^n$	DER-SP (2006)

Em que:

N_{tr} : N_{adm} para o topo do revestimento;

N_{ir} : N_{adm} para a fibra inferior do revestimento asfáltico;

N_{sub} = N_{adm} para o topo do subleito;

D : deflexão no topo do revestimento (10^{-2} mm);

ε_t : deformação específica horizontal de tração na fibra inferior do revestimento;

ε_v : deformação específica vertical no topo do subleito;

k e n : coeficientes determinados por regressões, particulares para cada tipo de mistura asfáltica, modificados para refletir o desempenho do material no campo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Ensaios de Compactação e Módulo de resiliência

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 5, a qual também apresenta os valores de MR médio determinados através de ensaios em duplicata para cada amostra de solo e para as misturas solo EAER. Optou-se por se utilizar o valor médio do MR para maior agilidade dos testes de análise estrutural, sendo um valor recomendado também para utilização no MeDiNa conforme Franco e Motta (2020).

Tabela 5: Parâmetros de compactação das amostras de solo e das misturas solo-EAER.

Misturas	Solo C			Solo V		
	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	MR (MPa)	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	MR (MPa)
M0	31,6	13,9	34,75	15,1	17,2	26,24
M1	29,6	14	34,66	15,2	17,4	41,15
M2	28,3	14	54,75	16,4	17,5	43,08
M3	27,7	15,2	65,32	15,3	17,6	46,82

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.

4.2. Análise estrutural

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos no software AEMC para a análise de tensão-deformação, deflexão no topo do revestimento (U_z), deformação horizontal de tração na fibra inferior (ϵ_i) da referida camada, além da deformação específica vertical no topo do subleito (ϵ_v) para o ponto mais crítico entre o ESR e o ECR. O pavimento dimensionado empiricamente pelo método do DNIT (2006) foi constituído por 10 cm de revestimento asfáltico, 15 cm de base e 15 cm de sub-base. Foram destacados em negrito os valores de N_{adm} que ficaram acima dos valores de $N_{projeto}$, de modo que o subleito composto pelas amostras de solo na sua condição pura apresentou os piores desempenhos.

Tabela 6: Valores de N_{adm} para as misturas solo-EAER.

Solo	Mistura	U_z (10^{-2} mm)	Etr (m/m)	Ez (m/m)	Ntr	Nir	Nsub
Solo C	M0	127,24	1,36E-04	4,65E-04	1,60E+05	4,13E+07	4,49E+06
	M1	127,46	1,36E-04	4,66E-04	1,58E+05	4,11E+07	4,46E+06
	M2	93,88	9,95E-05	3,54E-04	9,17E+05	1,24E+08	1,64E+07
	M3	83,67	8,67E-05	3,17E-04	1,78E+06	2,01E+08	2,80E+07
Solo V	M0	154,08	1,61E-04	5,44E-04	5,32E+04	2,29E+07	2,13E+06
	M1	113,52	1,22E-04	4,22E-04	3,08E+05	6,08E+07	7,17E+06
	M2	110,08	1,18E-04	4,10E-04	3,67E+05	6,78E+07	8,17E+06
	M3	104,12	1,12E-04	3,90E-04	5,05E+05	8,31E+07	1,04E+07

Todas as misturas, em ambas as amostras de solo, mostrando uma melhoria em relação ao solo na sua condição pura, apresentando N_{adm} para a deformação horizontal na fibra inferior do revestimento acima do requerido originalmente. Entretanto, analisando a deflexão no topo do revestimento asfáltico e a deformação vertical no topo do subleito, esse pavimento dimensionado pelo método empírico do DNIT não apresentou resultados satisfatórios, o que pode causar danos de afundamento plástico por trilhas de rodas, prejudicando o conforto ao rolamento e a segurança dos usuários da via. Isso mostra a deficiência desse tipo de metodologia, e a necessidade da incorporação de análises mecanicistas no dimensionamento de pavimentos asfálticos.

CONCLUSÃO

Conclui-se, com este estudo, que o valor do Módulo de Resiliência (MR) da amostra de solo na sua condição pura aumenta se este é misturado com EAER. Diante disso, observou-se, através de análises de tensão-deformação, que quando o solo aplicado no subleito é estabilizado com EAER há uma diminuição das deformações sofridas e, por conseguinte, aumento do número de solicitações que o pavimento pode suportar.

Além disso, mesmo seguindo o dimensionamento proposto pelo DNIT, o pavimento não apresentou desempenho satisfatório quando analisado sob a ótica mecanicista, o que aponta para uma limitação do método empírico.

Embora nenhuma condição estudada tenha atingido o valor $N_{projeto}$ nas três análises, os resultados das misturas solo-EAER apresentaram uma melhora de desempenho com o aumento do teor de EAER, o que aponta para um potencial de reaproveitamento desse material no âmbito da engenharia rodoviária, possibilitando uma redução da disposição desse material em

empilhamento drenado, prática que tem sido adotada pelas empresas de mineração.

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

- Abd Duraid, M. e Al-Khalid, H. (2022). Fatigue Characterization of WMA and Modeling Using Artificial Neural Networks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34, 04021467.
- Airfield and Highway Pavements 2017*.
- Akinwumi, I. J. P. P. C. E. (2014). Soil modification by the application of steel slag. 58, 371-377.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 11579. *Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μ m (n^o 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.
- Bildik, S. e Laman, M. (2020). Effect of geogrid reinforcement on soil - structure – pipe interaction in terms of bearing capacity, settlement and stress distribution. *Geotextiles and Geomembranes*, 48, 844-853.
- Carvalho, A. I. S., de Souza Almeida, M. S., Pedreira, W. J. P., et al. (2020). Influência da Densificação do Solo de Subleito no Desempenho de Pavimentos Flexíveis. *Anuário do Instituto de Geociências*, 43, 253-262.
- Departamento de Estradas de Rodagem (2006). IP-DE-P00/001. *Projeto de Pavimentação*. São Paulo.

- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). ME 134. *Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- DNIT. (2006). *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT. (2018). ME 134, Paving - Soils - Resilient Modulus Determination – Testing method. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes.
- Domingos, M. D. I. e Faxina, A. L. (2016). Susceptibility of Asphalt Binders to Rutting: Literature Review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28, 04015134.
- Du, Y., Chen, J., Han, Z., et al. (2018). A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods. *Construction and Building Materials*, 168, 893-905.
- Franco, F. A. C. d. P. e Motta, L. M. G. d. (2020). *Manual para utilização do Método Mecânico-Empírico MeDiNa* Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design*.
- IAB. (2018). Sustainability report. *Instituto Aço Brasil*.
- Islam, M. R. e Tarefder, R. A. (2020). *Pavement Design: Materials, Analysis, and Highways*, McGraw-Hill Education.
- 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. e 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.
- Naidu, T. S., Sheridan, C. M. e van Dyk, L. D. (2020). Basic oxygen furnace slag: Review of current and potential uses. *Minerals Engineering*, 149, 106234.
- 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., Pinheiro, R. J. B., Specht, L. P., et al. (2020). Análise do desempenho de subleitos rodoviários à luz de conceitos da Mecânica dos Pavimentos. 25.
- Sheen, Y.-N., Le, D.-H. e 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*.

XX I Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
X Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
X Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 27 de setembro de 2024 – Balneário Camboriú/SC



Siddique, R., Kunal e Mehta, A. (2020). 11 - Utilization of industrial by-products and natural ashes in mortar and concrete development of sustainable construction materials. *In: Harries, K. A. and Sharma, B. (eds.) Nonconventional and Vernacular Construction Materials (Second Edition)*. Woodhead Publishing.