CINZA DE CAVACO DE EUCALIPTO NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS APLICADOS NA PAVIMENTAÇÃO

Eucalyptus chip ash for soil stabilization in pavement applications

Mateus Justino da Silva
CEFET-MG | Belo Horizonte, Minas Gerais | mateus@cefetmg.br

Janaina Aguiar Park
CEFET-MG e IFMG | Belo Horizonte e Santa Luzia, Minas Gerais | janaina.park@ifmg.edu.br

Gustavo Filemon Costa Lima
UFOP | Ouro Preto, Minas Gerais | gustavo.lima@ufop.edu.br

Augusto Cesar da Silva Bezerra
CEFET-MG | Belo Horizonte, Minas Gerais | augustobezerra@cefetmg.br

Resumo

A cinza de cavaco de eucalipto (CCE) é um resíduo industrial pouco atrativo como material cimentício suplementar devido a sua baixa atividade pozolânica e elevado teor de cálcio. No entanto, seu uso pode ser vantajoso como substituto da cal ou do cimento no tratamento de solos finos. Nesse contexto, este trabalho avaliou a influência da adição de CCE em solos com baixa capacidade de suporte para aplicação em camadas de pavimentos. Misturas de argila-CCE e silte-CCE foram produzidas em diferentes teores e submetidas a diferentes ensaios de interesse na pavimentação. Os resultados mostraram que a CCE apresenta propriedades cimentícias, com teor ótimo de 15% e melhoria progressiva da capacidade de suporte dos solos ao longo do tempo. O aproveitamento da CCE para tratamento de solos representa uma alternativa viável para uma pavimentação mais econômica e sustentável, reduzindo a extração de recursos naturais e a deposição da CCE em aterros.

Palavras-chave: Cinza de cavaco de eucalipto; pavimentação; reaproveitamento de resíduos; tratamento de solos.

ABSTRACT

Eucalyptus chip ash (ECA) is an industrial byproduct with limited appeal as a supplementary cementitious material due to its low pozzolanic activity and high calcium content. However, it can be advantageous as a lime or cement substitute in the treatment of fine soils. This study aimed to evaluate the influence of adding ECA to soils with low bearing capacity for use in pavement layers. Mixtures of clay and ECA, and silt and ECA, were produced in different proportions and subjected to various tests relevant to paving. The results demonstrated that ECA exhibits cementitious properties, with an optimal content of 15%, leading to a progressive enhancement in the soil's bearing capacity over time. Using ECA for soil treatment represents a viable alternative for more economical and sustainable paving, reducing the extraction of natural resources and the disposal of ECA in landfills

Keywords: Eucalyptus Chip Ash; Pavement; Waste Reuse; Soil Treatment.

1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos solos nas proximidades das rodovias podem não apresentar os parâmetros necessários para uso na pavimentação. As propriedades desses solos podem ser melhoradas com adição de um agente cimentante como a cal ou o cimento Portland. No entanto, estes materiais elevam o custo da obra, além de consumirem grande quantidade de energia e matéria-prima para serem produzidos (Vincevica-Gaile *et al.,* 2021). Nesse contexto, o uso de cinzas de biomassa vem despontando interesse como alternativa para uma melhoria econômica das propriedades de materiais da construção e para destinação sustentável para esses resíduos (Bonfim; De Paula, 2021). Em geral, essas cinzas são enviadas para aterros sanitários ou descartadas na natureza sem qualquer controle (Rajamma *et al.,* 2009).

Estudos com diferentes cinzas para estabilização de solos foram apresentados recentemente como cinzas de casca de arroz (Almeida et al., 2020), cinzas de bagaço de cana de açúcar (Lima *et al.,* 2022), cinzas volantes (Lekha; Sarang; Shankar, 2015; Mishra *et al.,* 2022; Vasconcelos *et al.,* 2019), cinzas de coque (Silveira; Guimarães; Castro, 2019) e cinzas de eucalipto (Silva *et al.,* 2020). Normalmente, a finura e composição química das cinzas conferem-lhes reatividade, podendo ser potencialmente empregadas como pozolanas, materiais cimentícios ou preenchimento. As principais dificuldades apresentadas são a possibilidade de contaminação (Silveira; Guimarães; Castro, 2019) e a grande variação das características físicas e químicas, podendo apresentar elevadas variações da origem, tecnologia usada para produzir bioenergia e a forma de coletar o material (Medina i 2017).

A CCE é um resíduo caracterizado por seu alto teor de cálcio e baixo teor de silício. Esta composição faz que esse material apresente baixa atividade pozolânica, o que o torna pouco atrativo como material cimentício suplementar (Resende *et al.,* 2014). No entanto, os elevados teores de cálcio, faz desse material um interessante substituto da cal na estabilização química de solos finos (Silva, 2017). A CCE apresenta o cálcio na forma de óxido, que é altamente reativo com a água, formando hidróxido de cálcio. O hidróxido de cálcio na presença de água pode reagir com o dióxido de carbono formando a carbonato de cálcio e promovendo a aglomeração de partícula. A aglomeração de partículas na geologia é chamada de cimentação e é um dos mecanismos responsáveis pela formação de rochas sedimentares. Diante deste contexto, esta pesquisa estudou a viabilidade técnica do reaproveitamento de CCE na estabilização de solos finos, visando economia e sustentabilidade no desenvolvimento de infraestrutura de transportes. Foram avaliadas as melhorias na capacidade de suporte da adição de CCE em solo argiloso e em solo siltoso, além da análise da microestrutura das misturas, a fim de verificar a ocorrência de cimentação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

A Tabela 1 apresenta os parâmetros geotécnicos e a classificação dos solos utilizados segundo o sistema da *Highway Research Board* (HRB) e o Sistema Unificado de Classificados de Solos (SUCS). Argila e silte foram escolhidos por representarem os solos tipicamente encontrados com baixa capacidade de suporte. Estes foram coletados em jazidas de Belo Horizonte/MG e a CCE em caldeira de planta industrial. A composição química por fluorescência de raios X (FRX) da argila, silte e CCE são apresentados na **Tabela 2**. Os resultados confirmam o alto teor de cálcio da CCE com 72,24% de CaO (óxido de cálcio). Argila e silte apresentaram como principais componentes os óxidos de silício (SiO_2), de alumínio (Al_2O_3) e de ferro (Fe_2O_3). Para umidificação das misturas foi utilizada água fornecida pela rede de abastecimento.

Tabela 1:: Parâmetros geotécnicos da argila e silte

Solo	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Densidade real (g/cm³)	Classificação	
				HRB	SUCS
Argila	56	29	2,019	A-7-6	CH - argila de alta plasticidade
Silte	36	31	2,211	A-4	ML - silte

Tabela 2:: Composição química por FRX

Material	SiO_2	Al_2O_3	$Fe2O_3$	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	K_2O	MnO	Outros
CCE	0,72	2,00	6,12	72,24	2,76	1,14	2,76	7,56	0,92	3,78
Argila	36,54	38,77	20,03	0,06	-	1,52	-	2,04	0,06	0,98
Silte	53,28	25,69	13,58	-	-	1,61	-	5,40	0,11	0,33

2.2 MÉTODOS

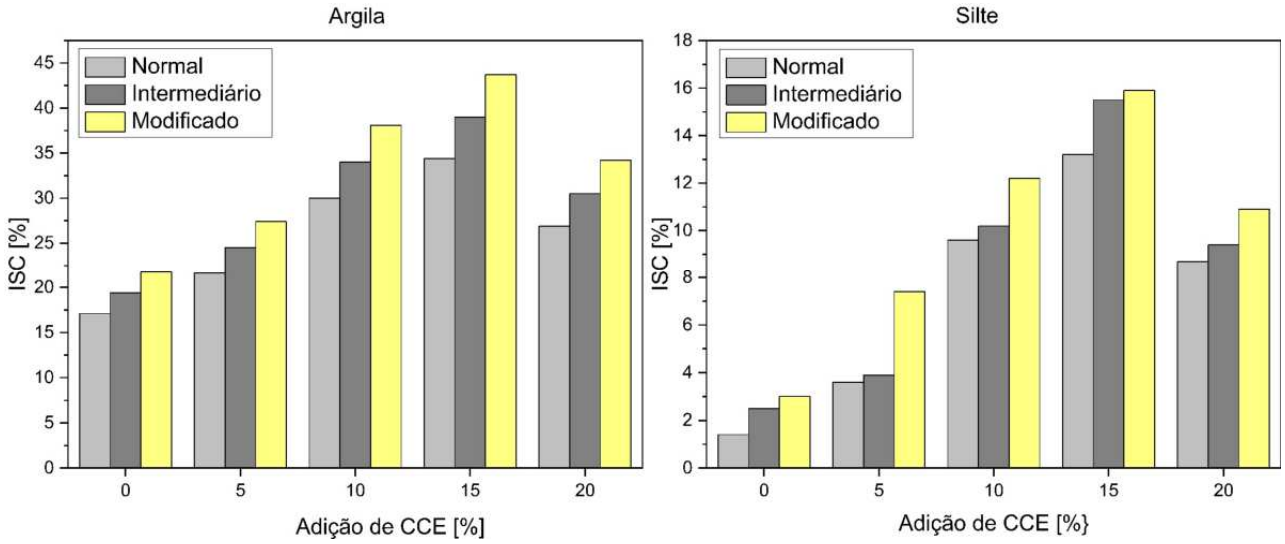
As misturas argila-CCE e silte-CCE foram realizadas com substituição em massa de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de argila/silte por CCE. A capacidade de suporte dessas misturas foi avaliada por meio do Índice de Suporte Califórnia (ISC), seguindo as normas NBR 7182 (ABNT, 2016a) e NBR 9895 (ABNT, 2016b) e utilizando 6 corpos de prova para cada traço. Para avaliação do efeito cimentante da CCE foram realizados ensaios de ensaio de resistência à flexão, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de raios X (DRX). O ensaio de resistência à flexão seguiu as instruções da NBR 13279 (ABNT, 2005), utilizando 6 corpos de prova prismáticos de 20mm x 60mm x 16mm para cada traço, com umidade ótima e energia do Proctor Normal. O ISC e o ensaio de resistência à flexão foram realizados em equipamento universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL30000. A MEV foi realizada em equipamento da marca Hitashi Modelo TM 3000 com pressão variável de bancada com magnificação de 15x até 30.000x com zoom digital 2x e 4x, com tensão de aceleração de 15 kV e detector BSE (*backscattered elétrons*). A DRX foi realizada em equipamento da Marca Shimadzu, Modelo XRD-7000, com tubo de raios X de Cobre (Cu), tensão de aceleração de 40 kV, corrente de 30 mA, com modo contínuo de varredura variando 2θ de 5 a 90º e velocidade de 2º/min. Para análise dos difratrogramas foi utilizada a versão demonstrativa do *software Match*! e o banco de dados *Crystallography Open Database Inorganic*, revisão 173445 (COD-Inorg REV173445 2016.01.04).

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 INDICE DE SUPORTE CALIFORNIA

A Figura 1 apresenta os resultados de ISC das misturas de argila e silte com CCE. Pode-se observar que a adição de CCE aumentou a capacidade de suporte dos solos, com teor ótimo de 15% de CCE tanto para a argila quanto para o silte. A diferença de ISC entre as três energias de compactação seguiu um comportamento análogo, com aumento absoluto variando de 2 a 4% entre as diferentes energias. Para a argila, a adição de apenas 5% de CCE promoveu melhoria no ISC suficiente para permitir seu uso como sub-base (ISC > 20%) (DNIT, 2010). Para o teor ótimo de 15% de CCE, a argila atingiu o dobro do ISC nas três energias de compactação. Apesar de não ter atingido o ISC mínimo para sub-base, o silte apresentou melhoria da capacidade de suporte ainda mais significativa para 15% de CCE, aproximadamente oito vezes maior na energia normal (saindo de 1,4% para 13,2%), cinco vezes maior na energia intermediária (de 2,5% para 15,5%) e quatro vezes maior na energia modificada (de 3% para 15,9%). Silva et al. (2020) avaliou a incorporação de CCE em solo residual de argila arenosa e obteve comportamento parecido, com aumento do ISC para 10% de adição de CCE.

Figura 1: ISC das misturas argila-CCE e silte-CCE



Os resultados de expansão (Tabela 3) não apresentam uma tendência clara. Para a argila, todas as misturas apresentaram expansão muito abaixo do limite normativo para bases (≤0,5%) e sub-bases (≤1,0%) (DNIT, 2010, 2022). Para o silte, todas as misturas apresentaram resultado em torno de 3%, consideravelmente acima do limite para bases (≤0,5%) e sub-bases (≤1,0%).

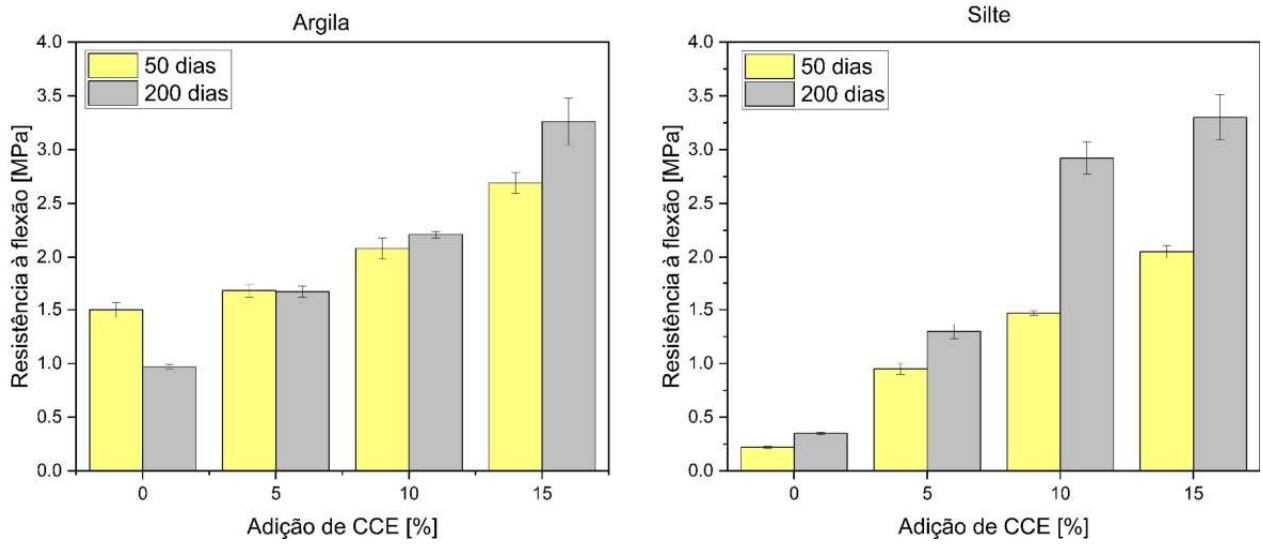
Tabela 3:: Expansão das misturas argila-CCE e silte-CCE, em porcentagem

Teor de CCE	Argila			Silte		
	Normal	Intermediário	Modificado	Normal	Intermediário	Modificado
0%	0,03	0,02	0,02	2,98	3,89	3,38
5%	0,02	0,03	0,03	2,77	2,84	3,49
10%	0,01	0,02	0,01	3,27	3,26	3,42
15%	0,02	0,01	0,02	2,98	2,98	3,12
20%	0,01	0,01	0,03	3,00	3,24	3,11

3.2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Na Figura 2 são apresentados os resultados de resistência à flexão aos 50 e 200 dias de idade. Em ambos os solos, percebe-se uma tendência de aumento da resistência com o aumento do teor de CCE e com o prolongamento do período de cura, exceção da argila que sofreu redução da resistência aos 200 dias. Assim como nos resultados de ISC, o aumento de resistência alcançado pelo silte foi mais expressivo. Ao comparar os solos com as misturas com 15% de CCE, as misturas de argila tiveram cerca de 2 a 3 vezes de aumento da resistência, enquanto as misturas de silte tiveram cerca de 9 vezes de aumento, indicando cimentação da CCE nas misturas.

Figura 2: Resistência à flexão aos 50 dias e aos 200 dias de idade



3.3 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

A Figura 3 apresenta imagens MEV da argila e do silte com 0% e 15% de adição de CCE. Observa-se que a superfície da argila (Figura 3a) apresenta certa irregularidade e presença de vazios. O silte (Figura 3d) apresenta pouca adesão entre os grãos, sendo visíveis grãos individualizados. Em ambos os solos, o adensamento não se deu de forma completa, com apresentação de fissuras na matriz. O aumento do teor de CCE provocou a redução dos vazios, resultando em uma estrutura mais densa. Além disso, parece que a adição de CCE melhorou a adesão entre as partículas do silte (Figura 3e). A fibra apresenta estrutura alveolar no sentido do comprimento da fibra, com aspecto de tubos (Figura 3c). Acredita-se que esta estrutura, devido aos alvéolos, apresenta comportamento flexível que pode reduzir significativamente a propagação de trincas na matriz. Percebe-se que a fibra possui uma boa interface com a argila (Figura 3c) e com o silte (Figura 3e) compactados, sendo possível observar poucos espaços vazios na interface.

Os DRXs realizados aos 300 dias de idade (Figura 4) permitiram identificar picos de cristalinidade de quartzo, caulinita e gibsita em todas as amostras. Nas misturas com adição de CCE foram encontrados picos de cristalinidade de calcita. Essa formação da calcita ocorreu devido ao contato do CaO com o ar atmosférico e água, indicando a ocorrência de uma reação de carbonatação, e sugerindo, portanto, cimentação originada desse processo.

Figura 3: MEV das misturas: a) argila pura; b) argila com 15% de CCE; c) detalhe da interface argila e CCE; d) silte puro; e) silte com 15% de CCE; f) detalhe da interface silte e CCE.

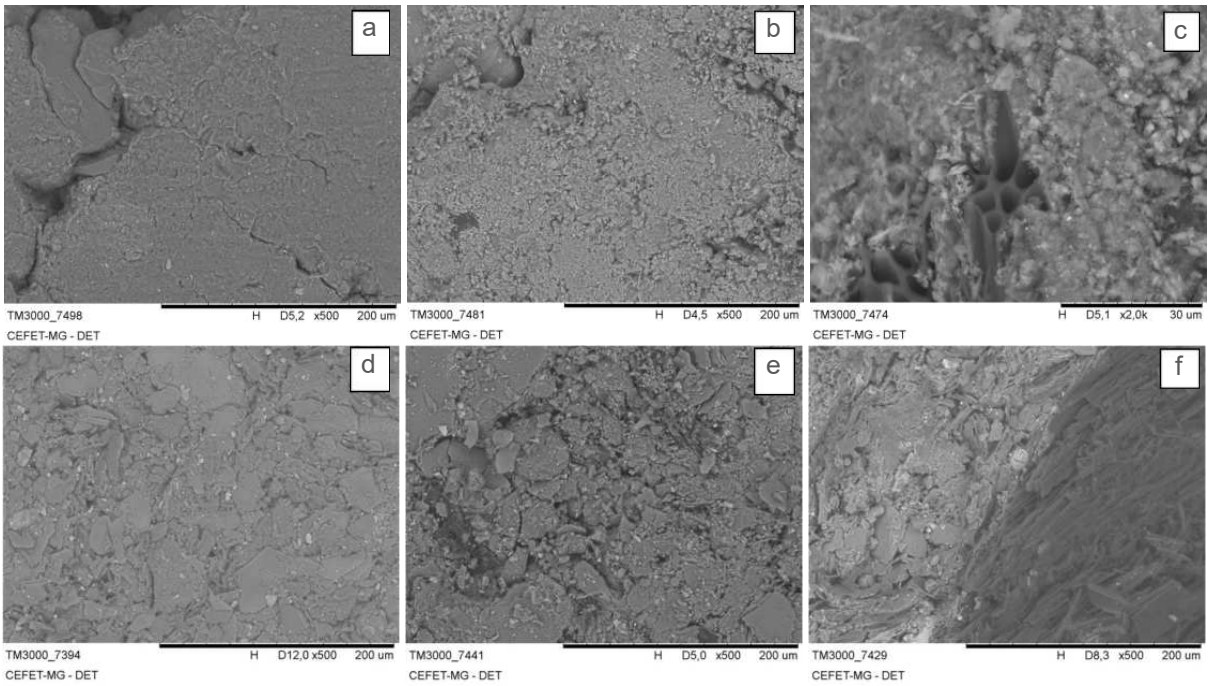
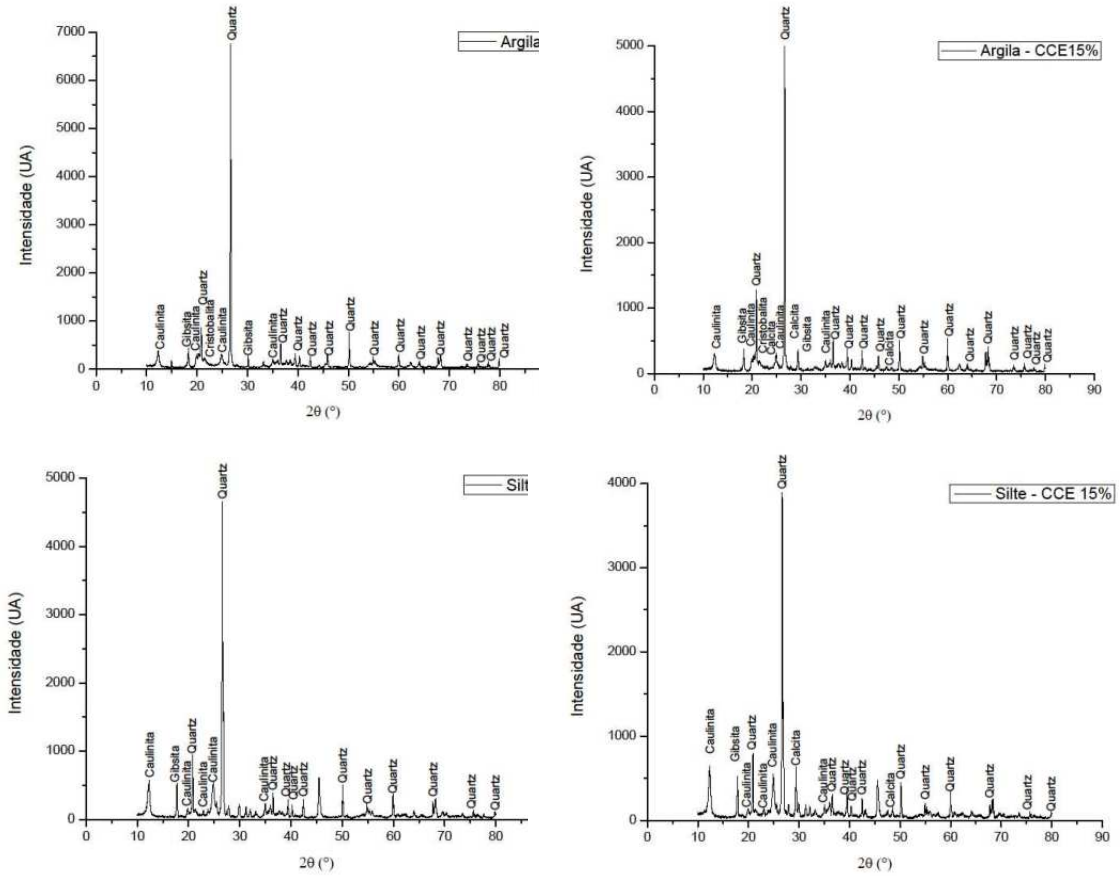


Figura 4: DRX aos 300 dias de idade.



4 CONCLUSÕES

A adição de CCE na argila e no silte foi positiva para o comportamento mecânico dos solos. O ISC e a resistência à flexão aumentaram para as adições de CCE tanto para a argila quanto para o silte, sendo mais relevante para o silte. Por microscopia foi possível observar que a adição de CCE reduziu o índice de vazios,

deixando a estrutura mais densa. As fibras de CCE tiveram boa interface com os solos testados e podem contribuir para reduzir a propagação de fissuras, aumentando a resistência à tração das misturas testadas. O incremento da resistência à flexão ao longo do tempo, aliado aos resultados de DRX, indica a ocorrência de cimentação decorrente da reação de carbonatação do CaO em contato com o ar atmosférico. O presente trabalho conclui que a adição de CCE para a estabilização de solos é viável tecnicamente. Solos considerados inadequados para pavimentação, como argila e silte, podem se tornar viáveis com a utilização de adição de CCE. O aproveitamento das CCE na pavimentação pode contribuir para obtenção de pavimentos mais econômicos, redução da extração de recursos naturais e dos volumes de CCE destinados a aterros.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por seu apoio para participação no evento e com infraestrutura de equipamentos [Convênio: PCE-00405-24, APQ-01425-22 e RED-00191-23], e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo de produtividade em pesquisa [Convênio: PQ 316846/2023-6], bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 13279** - Argamassa para assentamento e revestimentos de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. [s.l: s.n.]. Disponível em: < www.abnt.org.br >. Acesso em: 20 jan. 2025.

ABNT. **NBR 7182** - Solo - Ensaio de compactação. [s.l: s.n.]. Disponível em: < www.abnt.org.br >. Acesso em: 20 jan. 2025.

ABNT. **NBR 9895** - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.abnt.org.br>.

ALMEIDA, J. et al. Avaliação da substituição de altos teores de cimento Portland por cinza de casca de arroz quando aplicados à pavimentação. **Holos Environment**, v. 20, n. 4, p. 476–495, 2020. DOI: https://doi.org/10.14295/holos.v20i4.12398

BONFIM, W. B.; DE PAULA, H. M. Characterization of different biomass ashes as supplementary cementitious material to produce coating mortar. **Journal of Cleaner Production**, v. 291, 1 abr. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125869

DNIT. **Norma DNIT 139/2010** - Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: < https://www.gov.br/dnit >. Acesso em: 20 jan. 2025.

DNIT. **Norma DNIT 141/2022** - Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Brasília: [s.n.]. Disponível em: < https://www.gov.br/dnit >. Acesso em: 20 jan. 2025.

LEKHA, B. M.; SARANG, G.; SHANKAR, A. U. R. Effect of Electrolyte Lignin and Fly Ash in Stabilizing Black Cotton Soil. **Transportation Infrastructure Geotechnology**, v. 2, n. 2, p. 87–101, 1 jun. 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/s40515-015-0020-0

LIMA, R. P. DE et al. Stabilization of laterial soil using sugar cane and hydrated calculation. **Revista Matéria**, v. 27, n. 1, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/S1517-707620220001.1343

MEDINA, J. M. et al. Characterisation and valorisation of biomass waste as a possible addition in eco-cement design. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 50, n. 5, 1 out. 2017. DOI: https://doi.org/10.1617/s11527-017-1076-9

MISHRA, J. et al. Sustainable Fly Ash Based Geopolymer Binders: A Review on Compressive Strength and Microstructure Properties. **Sustainability** (Switzerland). MDPI, 1 nov. 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/su142215062

RAJAMMA, R. et al. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. **Journal of Hazardous Materials**, v. 172, n. 2–3, p. 1049–1060, 30 dez. 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109

RESENDE, D. S. et al. **Eucalyptus chip ashes in cementitious composites**. Materials Science Forum. Anais...Trans Tech Publications Ltd, 2014. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.775-776.205

SILVA, I. DE S. et al. **Influência da Adição de Cinza de Cavaco de Eucalipto na Capacidade de Suporte de Solo Residual para Aplicação em Camadas de Pavimentos**. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Anais...Campinas - SP: set. 2020. Disponível em: < https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/influencia-da-adicao-de-cinza-de-cavaco-de-eucalipto-na-capacidade-de-suporte-de?lang=pt-br >. Acesso em: 20 jan. 2025.

SILVA, M. J. **Reforço de solos utilizados em base e sub-base de infraestrutura de pavimentos rodoviários com cinza com alto teor de cálcio**. Tese de doutorado - Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2017. Disponível em: < http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/8492 >. Acesso em: 20 jan. 2025.

SILVEIRA, V. L.; GUIMARÃES, A. C. R.; CASTRO, C. D. Estudo da aplicação da cinza de caldeira a coque nas camadas de base e sub-base de pavimentos. **Transportes**, v. 27, n. 2, p. 194–208, 31 ago. 2019. DOI: https://doi.org/10.14295/transportes.v27i2.1690

VASCONCELOS, S. D. et al. Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica na construção de pavimentos. **Transportes**, v. 27, n. 2, p. 73–88, 31 ago. 2019. DOI: https://doi.org/10.14295/transportes.v27i2.1592

VINCEVICA-GAILE, Z. et al. Towards sustainable soil stabilization in peatlands: Secondary raw materials as an alternative. **Sustainability (**Switzerland). MDPI, 2 jun. 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/su13126726