

COMPACTABILIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE MISTURAS SOLO ARENOSO-ESCÓRIA DE ACIARIA-CINZA VOLANTE

Fernando Henrique Neiva Pereira Ferreira¹; Klaus Henrique de Paula Rodrigues²; Renata Carolina Zanetti Lofrano³; Heraldo Nunes Pitanga⁴; Taciano Oliveira da Silva⁵; Mateus Henrique Ribeiro Rodrigues⁶

Resumo – Os processos industriais geram grandes volumes de resíduos sólidos, constituindo um motivo de preocupação para a sociedade diante da necessidade de promover uma disposição ambientalmente adequada destes resíduos. A incorporação de resíduos sólidos industriais em solos destinados a obras civis pode ser uma forma de diminuir os danos ambientais causados por esses materiais, alinhando-se com os objetivos para o desenvolvimento sustentável. Esta pesquisa avaliou a possibilidade de aproveitamento de escória de aciaria e cinza volante, subprodutos siderúrgicos, visando conferir a um solo arenoso características adequadas de compactabilidade e resistência que realcem o potencial de aproveitamento dessas misturas em obras de pavimentação. As misturas investigadas foram definidas por meio de um planejamento experimental (método Simplex-Centróide). Os parâmetros de compactação das misturas foram obtidos por meio de ensaios de compactação na energia do Proctor Intermediário. Ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) foram realizados sobre corpos de prova do solo e das misturas moldados na umidade ótima, estas últimas aos 7 dias de cura. Com a incorporação dos resíduos ao solo, observou-se uma tendência de redução do teor de umidade ótimo (menor demanda de água de compactação) e de aumento do peso específico aparente seco máximo. Constatou-se uma tendência de incremento da RCS para as misturas solo-resíduos siderúrgicos, apontando para o seu potencial de emprego em camadas estruturais de pavimentos asfálticos. A perspectiva de usar os resíduos em obras de terra enfatiza o potencial sustentável da proposta.

Abstract – Industrial processes generate large volumes of solid waste, which is a cause for concern for society given the need to promote environmentally appropriate disposal of this waste. Incorporating solid industrial waste into soils for civil works could reduce the environmental damage caused by these materials, in line with sustainable development objectives. This research evaluated the possibility of using steel mill slag and fly ash, by-products of the steel industry, to give a sandy soil suitable characteristics of compactability and resistance to enhance the potential for using these mixtures in paving works. The mixtures investigated were defined using an experimental design (Simplex-Centroid method). The compaction parameters of the mixtures were obtained through compaction tests at Intermediate Proctor energy. Unconfined Compressive Strength (UCS) tests were carried out on specimens of soil and mixtures molded at the optimum moisture content, the latter at 7 days of curing. As the waste was incorporated into the soil, there was a tendency for the optimum moisture content to decrease (lower demand for compaction water) and for the maximum dry unit weight to increase. There was a tendency for the UCS of the soil-steel waste mixtures to increase, pointing to their potential for use in structural layers of asphalt pavements. The prospect of using the waste in earthworks emphasizes the sustainable potential of the proposal.

Palavras-Chave – Resíduos siderúrgicos; escória de aciaria; cinza volante; misturas solo-resíduos; compactação; resistência à compressão.

¹ Mestre, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, fernando.h.ferreira@ufv.br

² Prof. Dr., Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, klaus@ufv.br

³ Profa. Dra., Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil, renataczlofrano@gmail.com

⁴ Prof. Dr., Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, heraldopitanga@ufff.br

⁵ Prof. Dr., Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, taciano.silva@ufv.br

⁶ Mestre, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, mateus.ribeiro@ufv.br

1. INTRODUÇÃO

As indústrias siderúrgicas possuem grande impacto na economia global, todavia as mesmas são responsáveis pela geração de um elevado volume de resíduos em sua cadeia produtiva. Os resíduos siderúrgicos diretos correspondiam no Brasil a, aproximadamente, 622 kg/tonelada de aço bruto produzido em 2020 de acordo com dados do Instituto Aço Brasil (IAB, 2020). Segundo essa mesma fonte, desse total, 40% correspondiam à escória de alto forno, 25% à escória de aciaria, 6% aos pós e finos (incluindo a cinza volante de alto forno), 4% às lamas e 25% a outros resíduos.

O Brasil é um dos maiores produtores de aço bruto do mundo, produzindo, em 2021, aproximadamente, 36,1 milhões de toneladas desse material, correspondendo a 2% da produção mundial e a 55,8% da produção da América Latina. Aproximadamente, 30% dessa produção foram gerados no Estado de Minas Gerais, o que o torna o maior produtor de aço bruto do país, seguido pelo Estado do Rio de Janeiro com 28,5 % (IAB, 2022).

Este cenário de geração de resíduos siderúrgicos em quantidades tão significativas aponta para a necessidade de viabilização de seu aproveitamento, a princípio porque constituem um indesejável, mas inevitável passivo ambiental para as indústrias do setor siderúrgico (Naidu et al., 2020; Palod et al., 2017), sendo a Engenharia Civil um dos ramos das atividades econômicas nos quais o seu aproveitamento em grande escala, sob a forma de material de construção, pode se tornar possível (Penteado et al., 2019).

Dentro da Engenharia Civil, uma possibilidade efetiva de aproveitamento desses resíduos em grande escala corresponde ao seu emprego potencial em obras de pavimentação. Em tais obras, seu emprego pode ocorrer, por exemplo, em aterros, camadas estruturais de pavimentos constituídos por solos compactados e na estabilização química de solos de baixa capacidade de suporte, ou seja, solos com deficiências quanto às propriedades de resistência e rigidez, onde essa técnica é geralmente realizada com o emprego de cimento e cal (Diniz et al., 2017).

2. OBJETIVO

O objetivo principal desta pesquisa foi o de avaliar a possibilidade de reutilização de resíduos siderúrgicos (escória de aciaria e cinza volante) na cadeia da construção civil, através de sua incorporação a um solo predominantemente arenoso, visando a melhoria de suas propriedades de compactação e resistência à compressão para fins de aplicação em obras de pavimentação.

3. METODOLOGIA

3.1 Materiais

O solo empregado nesta pesquisa foi coletado segundo o procedimento PRO 003 (DNER, 1994) em uma jazida de empréstimo localizada no município de Viçosa-MG. A coleta deste solo se deu em um horizonte de solo saprolítico de coloração amarelo-acinzentada, e amostras deste solo foram preparadas para os ensaios geotécnicos de laboratório de acordo com a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Os ensaios realizados para fins de caracterização geotécnica do solo foram: i) análise granulométrica conjunta, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016b); ii) limite de liquidez (LL), segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016c); iii) limite de plasticidade (LP), segundo a NBR 7180 (ABNT, 2016d); e iv) massa específica dos grãos do solo (ρ_s), segundo a NBR 6458 (ABNT, 2016e). O ensaio de compactação do solo foi realizado segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2016f), na energia do Proctor Intermediário, a fim de determinar o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima.

A amostra de escória de aciaria elétrica primária (EAEP) foi fornecida por uma unidade siderúrgica localizada no município de Jeceaba-MG. A coleta da amostra de EAEP foi realizada

conforme a norma técnica NBR 10007 (ABNT, 2004), em seu estado original (escória bruta). A amostra de EAEP foi obtida de locais de estocagem recente, sendo que o tempo máximo entre sua geração e disposição foi de 72 horas, sem qualquer processo de cura do material antes dos ensaios.

A preparação das amostras de EAEP para os ensaios de caracterização foi realizada através da moagem do material bruto no aparelho de abrasão *Los Angeles* para reduzir a sua granulometria em partículas de diâmetros menores que 0,6 mm (peneira #30), de acordo com o procedimento PRO 199 (DNER, 1996). O objetivo dessa redução granulométrica foi de aumentar a superfície específica da EAEP e alcançar um valor próximo a 0,18 m²/g, semelhante ao proposto por Sheen, Le e Lam (2021). Em seguida, foi realizada a preparação das amostras para os ensaios de laboratório de acordo com a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a). Os finos de EAEP foram, então, armazenados em tonéis plásticos (bombonas) devidamente vedados.

A caracterização física das amostras de EAEP foi realizada por meio dos seguintes ensaios: i) finura por peneiramento, segundo a NBR 11579 (ABNT, 2012a); ii) superfície específica pelo método *Blaine*, conforme a NBR 16372 (ABNT, 2015); iii) massa específica dos sólidos, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017); e iv) distribuição granulométrica, de acordo com a ISO 13320 (ISO, 2020), por difração a laser após peneiramento na peneira de 0,6 mm.

A amostra de cinza volante (CV) foi fornecida por uma empresa que atua no beneficiamento e comercialização de cinzas pozolânicas, material proveniente da queima do carvão mineral, situada no município de Capivari de Baixo-SC. Trata-se de material similar às cinzas volantes geradas nos processos siderúrgicos. A preparação das amostras para os ensaios de laboratório seguiu as orientações da norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Para caracterizar fisicamente a amostra de CV, foram realizados os seguintes ensaios: i) índice de finura por peneiramento na peneira de 75 µm, conforme a norma técnica NBR 11579 (ABNT, 2012); ii) superfície específica pelo método de *Blaine*, conforme a NBR 16372 (ABNT, 2015); iii) massa específica dos sólidos, segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017); e iv) distribuição granulométrica determinada por difração à laser, conforme a norma ISO 13320 (ISO, 2020).

3.2 Métodos

As misturas solo-EAEP-CV investigadas no programa experimental foram definidas através do método estatístico de planejamento experimental em rede Simplex-Centróide (Scheffé, 1963). O *software* estatístico Minitab 18 foi empregado para esse procedimento. Três componentes foram usadas para formar as misturas experimentais (solo, EAEP e CV), constituindo sistemas ternários. Para a elaboração do diagrama triangular do método Simplex-Centróide, foi necessário definir os valores máximos e mínimos (variáveis de entrada) que cada componente pode assumir nas misturas (percentagem em relação à massa seca da mistura final). Com base na consulta à literatura (Jha; Sivapullaiah, 2015; Manso et al., 2013; Pitanga et al., 2016; Yildirim; Prezzi, 2017), foram adotados os seguintes valores para os componentes das misturas: 5 a 20% de EAEP; 2 a 20% de CV; 80 a 95% de solo.

O número de misturas experimentais que foram geradas pelo método foi dado pela equação (1), em que “q” é o número de componentes, sendo gerados 7 pontos no interior de um triângulo equilátero (M1 a M7), o qual constitui um espaço denominado de rede Simplex-Centróide. Tal como o solo, as misturas solo-EAEP-CV foram submetidas ao ensaio de compactação Proctor Intermediário visando a determinação dos respectivos parâmetros de ótimo (γ_{dmax} e w_{ot}). Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS) foram realizados sobre corpos de prova moldados nas respectivas umidades ótimas de compactação, segundo a norma NBR 12025 (ABNT, 2012b). Para as misturas solo-EAEP-CV, tais ensaios foram realizados após um período de 7 dias de cura. A cura dos corpos de prova foi realizada em câmara úmida, sob condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, e sob condição selada (envolvidos por plástico filme). O RCS de cada material correspondeu à média aritmética de 3 determinações, admitindo-se um coeficiente de variação máximo de 10%

$$2^q - 1$$

$$(1)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos materiais

Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica e de compactação (Proctor Intermediário) do solo são apresentados na Tabela 1. Adicionalmente, são apresentadas as classificações geotécnicas do solo segundo os sistemas TRB (AASHTO, 2021), USC (ASTM, 2020) e MCT (DNIT, 2023). Particularmente para as classificações TRB e MCT, relacionadas a projetos rodoviários, o solo é considerado, respectivamente, como regular para fins de fundação (subleito) de obras viárias e não recomendado tecnicamente para fins de utilização como material de construção nessas obras. A curva granulométrica do solo é apresentada na Figura 1.

Tabela 1. Caracterização e classificação geotécnicas do solo

Parâmetro	Valor
% 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)	17,75
W _{ot} (%)	13,90
TRB	A-2-6 (1)
USC	SC
MCT	NA'

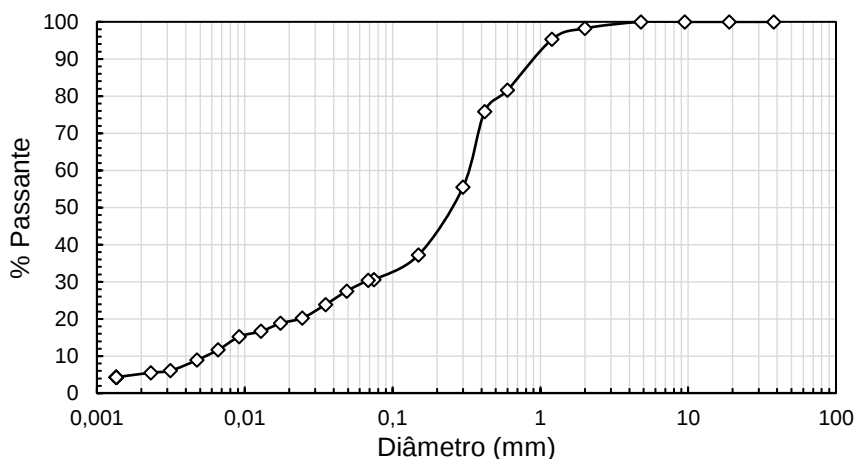
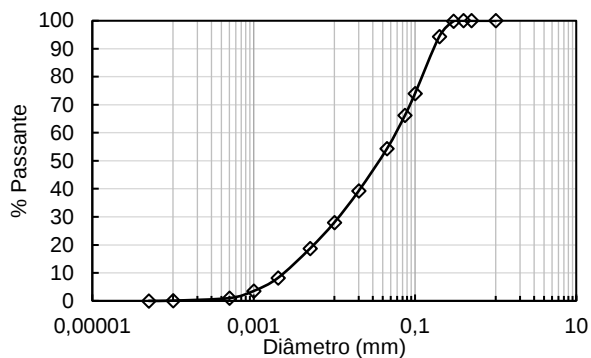


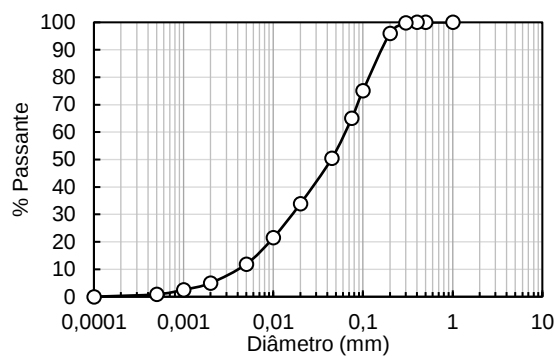
Figura 1. Curva granulométrica do solo

A amostra de EAEP moída apresentou índice de finura por peneiramento de 24,88%, um valor alto para materiais cimentícios (Lopes et al., 2021). A superfície específica pelo método *Blaine* foi de 0,20 m²/g, próximo ao valor requerido para cimento *Portland*, o qual deve ser superior a 0,24 m²/g (Diniz et al., 2017). O resultado do ensaio de massa específica dos sólidos foi de 3,7 g/cm³. Quanto à granulometria, a curva granulométrica da EAEP moída é apresentada na Figura 2a. Salienta-se que a baixa expansibilidade da amostra de EAEP moída misturada com solos, após compactação e cura das misturas, foi evidenciada nas pesquisas de Rodrigues (2022) e Ferreira (2023). Nessas pesquisas, a expansão CBR se mostrou, em geral, abaixo de 0,5%, viabilizando o emprego da EAEP na composição de camadas estruturais de pavimentos asfálticos.

A amostra de CV apresentou índice de finura por peneiramento de 23,71%, superfície específica de 0,18 m²/g e massa específica dos sólidos de 2,08 g/cm³. A Figura 2b apresenta a distribuição granulométrica da CV.



(a)



(b)

Figura 2. Curvas granulométricas dos resíduos siderúrgicos: (a) EAEP; (b) CV.

4.2 Rede Simplex-Centróide

A Figura 3 apresenta a rede Simplex-Centróide resultante do planejamento experimental das misturas solo-resíduos gerada no software Minitab 18. A Tabela 2 apresenta as respectivas percentagens dos componentes de cada uma das 7 misturas solo-EAEP-CV investigadas.

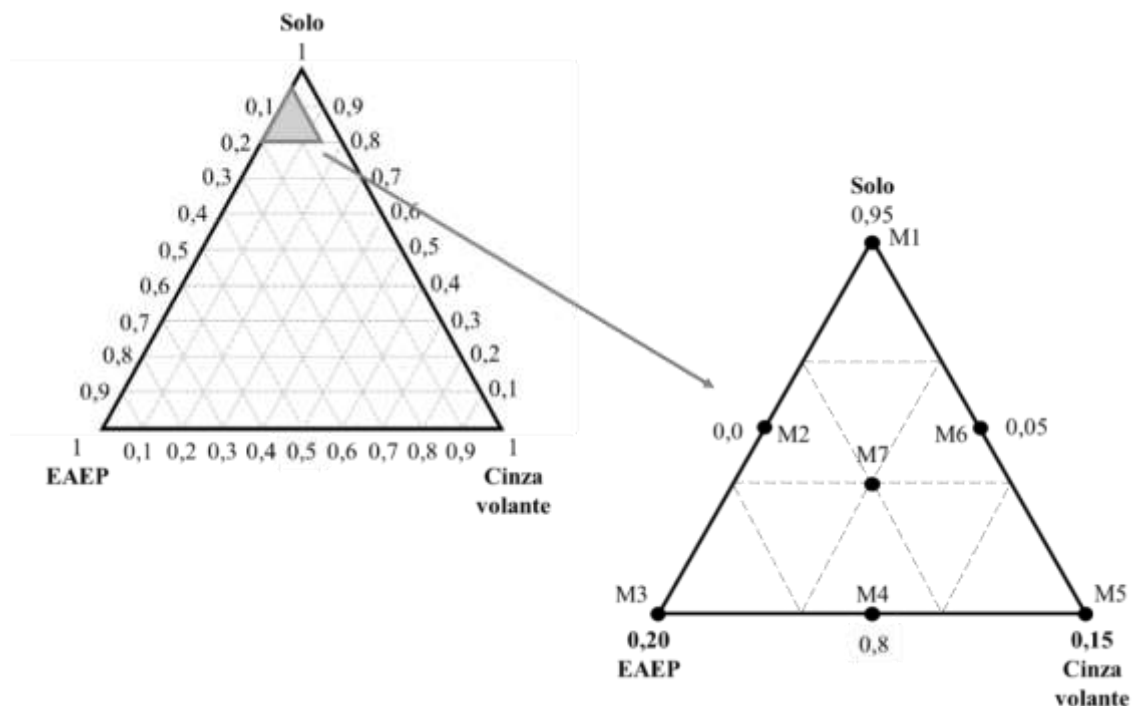


Figura 3. Rede Simplex-Centróide resultante do planejamento experimental das misturas solo-EAEP-CV

Tabela 2. Misturas solo-resíduos definidas no planejamento experimental.

Mistura	Solo (%) [*]	EAEP (%) [*]	CV (%) [*]
M1	95	5	0
M2	87,5	12,5	0
M3	80	20	0
M4	80	12,5	7,5
M5	80	5	15
M6	87,5	5	7,5
M7	85	10	5

*Percentagens em relação à massa seca final da mistura

4.3 Resultados dos ensaios de compactação

A Figura 4 apresenta as curvas de compactação dos materiais investigados. A Tabela 3 apresenta os parâmetros dos pontos ótimos [peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) e teor de umidade ótimo (w_{ot})], obtidos através das curvas de compactação das misturas analisadas e compactadas na energia do Proctor Intermediário. Os valores referentes ao solo puro, denominado como M0 – 100/0/0, também são apresentados.

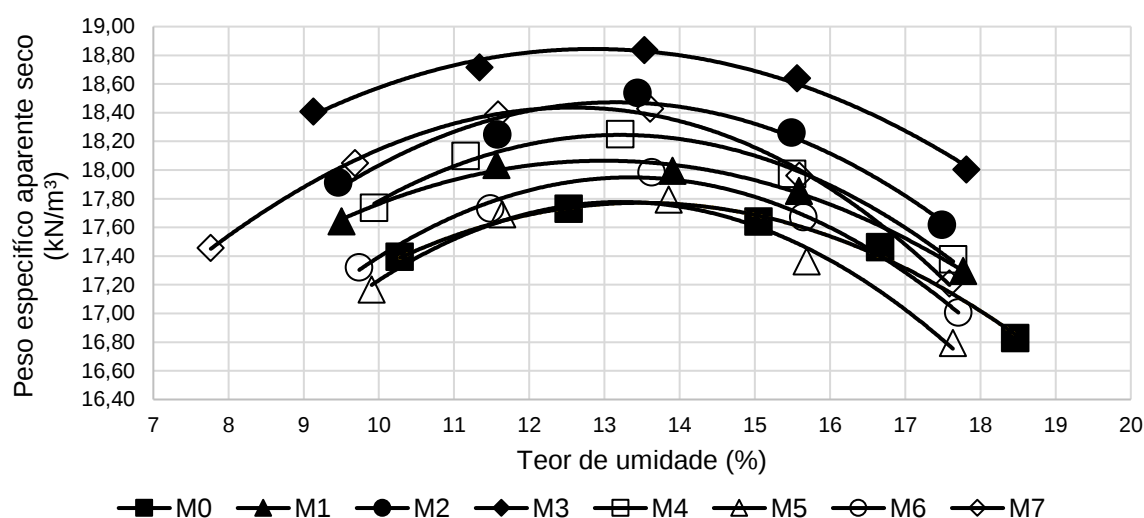


Figura 4. Curvas de compactação do solo e das misturas solo-resíduos (energia do Proctor Intermediário)

Tabela 3. Parâmetros de ótimo do solo e das misturas solo-EAEP-CV

Misturas	Parâmetros de ótimo	
	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
M0 - 100/0/0	13,9	17,75
M1 - 95/5/0	13,0	18,07
M2 - 87,5/12,5/0	13,7	18,47
M3 - 80/20/0	13,4	18,83
M4 - 80/12,5/7,5	13,1	18,26
M5 - 80/5/15	12,9	17,82
M6 - 87,5/5/7,5	13,5	17,95
M7 - 85/10/5	12,6	18,45

M: Mistura – solo (%) / EAEP (%) / CV (%)

Observou-se que houve redução do teor de umidade ótimo em todas as misturas em relação ao solo puro. Observou-se que, com o aumento do teor de resíduos, sobretudo com o teor de EAEP, o teor de umidade ótimo diminuiu, tendência também observada por outros autores (Aldeeky; Al Hattamleh, 2017; Gunarti; Raharja, 2020; Sebbar et al., 2020; Zumrawi; Babikir, 2017), reduzindo a demanda da quantidade de água necessária para promover a compactação, em campo, do material na condição de densificação considerada ideal.

Um aumento nos teores de resíduos nas misturas gerou acréscimos nos valores de peso específico aparente seco máximo, sobretudo com a adição de EAEP. Isso se deve ao fato de que a massa específica real da EAEP é maior do que a do solo, o que resulta em uma estrutura mais densa, que pode influenciar de maneira favorável nas propriedades mecânicas das amostras de solo, gerando seu incremento, conforme constatado em várias pesquisas (Al-Amoudi et al., 2017; Aldeeky; Al Hattamleh, 2017; Brand et al., 2020; Oluwasola et al., 2020; Sebbar et al., 2020).

Portanto, à luz das características de compactabilidade das misturas solo-resíduos pesquisadas, a incorporação dos resíduos (EAEP e CV) ao solo arenoso gerou um produto de engenharia com menor demanda hídrica para atingir a condição ideal de compactação, conferindo maior sustentabilidade ao processo (menor consumo de água), e com maior grau de densificação, o que pode repercutir em incremento das propriedades mecânicas do material compactado (rigidez e resistência, por exemplo).

4.4 Resultados dos ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS)

Na Figura 5, são apresentados os resultados dos ensaios de RCS para o solo puro e para as misturas solo-EAEP-CV, estas últimas após 7 dias de cura selada. Para todas as misturas investigadas, constatou-se um incremento da RCS comparativamente ao solo puro. Foi verificado que o maior acréscimo no valor de RCS em relação ao valor obtido para o solo ocorreu na mistura M3, ultrapassando, aos 7 dias de cura selada, o valor mínimo de RCS prescrito pela norma T 220 (AASHTO, 2018) para as camadas estruturais de base e sub-base (690 kPa). As misturas M2, M3, M4 e M7 mostraram-se aptas para compor a camada estrutural de reforço de subleito [RCS>345 kPa, conforme Gautreau, Zhang e Wu (2010)].

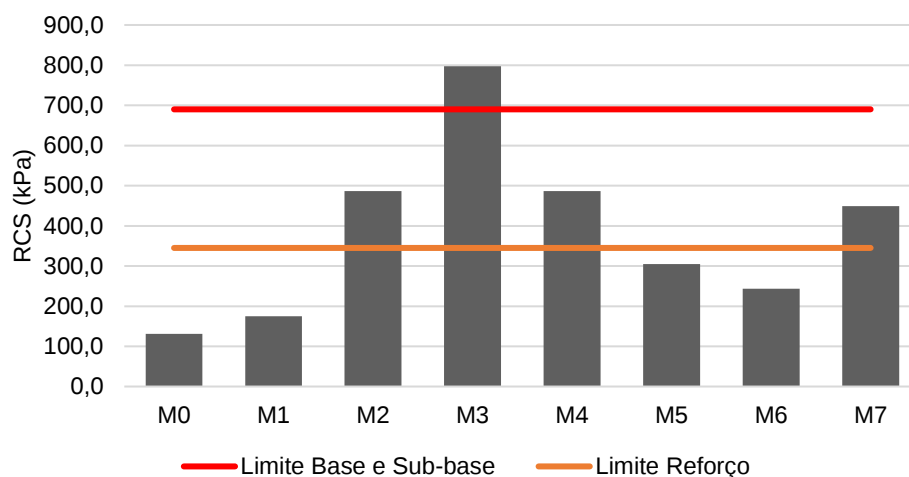


Figura 5. Resultados de RCS dos materiais investigados

O acréscimo da RCS com a adição dos resíduos siderúrgicos ao solo pode ser atribuído aos seguintes fatores: (i) à estabilização física (granulométrica) do solo pelas partículas de resíduos e à reação dos compostos CaO e Ca(OH)_2 presentes nos resíduos (predominantemente na EAEP) com a fração argila presente no solo (Brand et al., 2020), ainda que em pequena quantidade; (ii) à formação de compostos cimentícios, como o C-S-H (silicato de cálcio hidratado), C-A-H (aluminato de cálcio hidratado) e C-A-S-H (alumino-silicato de cálcio hidratado), o que confere às misturas solo-resíduos maior resistência mecânica quando se combinam com hidróxido de cálcio (Firoozi, 2017; Ismail; Awad; Mwafy, 2019; Yoobanpot et al., 2020); (iii) ao aumento do peso específico aparente seco máximo e à diminuição do teor de umidade ótimo (Oluwasola et al., 2020); (iv) às reações pozolânicas estimuladas pela presença de CV para a formação de compostos cimentícios (Bose, 2012; Deepak et al., 2021; Sridharan; Prashanth; Sivapullaiah, 1997); (v) aos fenômenos de floculação e aglomeração, devidos ao processo de troca catiônica entre o solo e a EAEP (Firoozi, 2017; Gunarti; Raharja, 2020); (vi) à morfologia e à rugosidade das partículas dos resíduos, visto que, quanto mais rugosas e irregulares forem tais partículas, maior será o ângulo de atrito e, portanto, maior a resistência mecânica (Lim; Cheah; Ramli, 2019; Simatupang, 2021).

5. CONCLUSÕES

A adição de escória de aciaria elétrica primária (EAEP) e cinza volante (CV) ao solo arenoso produziu misturas geotecnicamente mais eficientes quanto às características de compactação e de resistência à compressão. Os dados de compactação mostraram que a incorporação dos resíduos siderúrgicos ao solo reduziu o teor de umidade ótimo e aumentou o peso específico aparente seco máximo, implicando, respectivamente, numa expectativa de redução do consumo de água envolvida no processo de compactação em campo e de melhoria das propriedades mecânicas do material compactado. Particularmente para as propriedades mecânicas, representadas pela resistência à compressão, constatou-se uma superioridade das misturas solo-resíduos compactadas comparativamente ao solo, apontando para o potencial de emprego destas em diferentes camadas estruturais de pavimentos asfálticos (base, sub-base e reforço de subleito). A pesquisa confirma as constatações experimentais de outros trabalhos que apontam para a perspectiva de melhoria das propriedades de engenharia de solos estabilizados por EAEP e CV, reforçando as viabilidades técnica e ambiental relacionadas ao emprego destes resíduos siderúrgicos em obras de terra.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFV e à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) pelo suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AL-AMOUDI, O. S. B.; AL-HOMIDY, A. A.; MASLEHUDDIN, M.; SALEH, T. A. (2017). *Method and Mechanisms of Soil Stabilization Using Electric Arc Furnace Dust*. Scientific Reports, 7, n. 1, p. 46676, 2017/04/28.
- ALDEEKY, H.; AL HATTAMLEH, O. (2017). *Experimental study on the utilization of fine steel slag on stabilizing high plastic subgrade soil*. Advances in Civil Engineering, 11p. <https://doi.org/10.1155/2017/9230279>.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (2018). *AASHTO T 220-66: Determination of the Strength of Soil-Lime mixtures*. Washington.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS (2021). *AASHTO M145-91: Standard specification for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes*. Washington DC, 10 pages.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2020). *ASTM D2487-17e1. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. ASTM International, 10 pages.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2012a). *ABNT NBR 11579: Cimento Portland – determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2012b). *ABNT NBR 12025: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015). *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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016a). *ABNT NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016b). *ABNT NBR 7181: Solo - análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016c). *ABNT NBR 6459: Solo - determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016d). *ABNT NBR 7180: Solo - determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016e). *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, 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016f). *ABNT NBR 7182: Solo - ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). *ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2024). *ABNT NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro.
- BOSE, B. (2012). *Geo-engineering properties of expansive soil stabilized with fly ash*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 17, n. 1, p. 1339-1353.
- BRAND, A. S.; SINGHVI, P.; FANIJO, E. O.; TUTUMLUER, E. (2020). *Stabilization of a Clayey Soil with Ladle Metallurgy Furnace Slag Fines*. Materials, 13, n. 19, p. 4251.
- DEEPAK, M.S.; ROHINI, S.; HARINI, B.S.; ANANTHI, G.B.G. (2021). *Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil*. Materials Today: Proceedings, v. 37, Part 2, p. 2014-2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.497>.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1994). *DNER PRO 003/94: Coleta de Amostras Deformadas de Solos*. Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1996). *DNER PRO 199/96: Redução de amostras de campo de agregados para ensaio de laboratório*. Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (2023). *DNIT 259/2023 - CLA: Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação*. Brasília, 8p.
- 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, v.29 (9), 7p. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943- 5533.0001969.
- FERREIRA, F. H. N. P. (2023). *Dosagem estatística de misturas solo-resíduos siderúrgicos visando a aplicação em camadas estruturais de pavimentos asfálticos*. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, 85f.
- FIROOZI, A.A.; GUNEY OLGUN, C.; FIROOZI, A.A.; BAGHINI, M.S. (2017). *Fundamentos da estabilização do solo*. Geo-Engenharia 8, 26 <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>.
- GAUTREAU, G. P.; ZHANG, Z.; WU, Z. (2010). *Accelerated loading evaluation of subbase layers in pavement performance*. Louisiana Transportation Research Center.
- GUNARTI, A. S. S.; RAHARJA, I. (2020). *Mechanical Properties Improvement of Clays Using Silica Sand Waste and Dust Sand Foundry Waste*. IOP Publishing. 012002.
- INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). (2020). *Relatório de Sustentabilidade*. Rio de Janeiro - RJ: Instituto Aço Brasil. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>, 2020. Acesso em: 05 jan. de 2023.
- INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). (2022). *Anuário Estatístico*. Rio de Janeiro-RJ: Instituto Aço Brasil, 88p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2020). *ISO 13320:20040: Particles size analysis-laser diffraction methods*. Ed.1, n.9, 51p.
- ISMAIL, A. I. M.; AWAD, S. A.; MWAIFY, M. A. G. (2019). *The Utilization of Electric Arc Furnace Slag in Soil Improvement*. Geotechnical and Geological Engineering, 37, n. 1, p. 401-411, 2019/01/01

- JHA, A. K. E SIVAPULLAIAH, P.V. (2015). *Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil*. Engineering Geology, v. 198, p. 53-64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.08.020>
- LIM, J. S.; CHEAH, C. B.; RAMLI, M. B. (2019). *The setting behavior, mechanical properties and drying shrinkage of ternary blended concrete containing granite quarry dust and processed steel slag aggregate*. Construction and Building Materials, 215, p. 447-461, 2019/08/10/
- LOPES, M. M. S.; ALVARENGA, R. C. S. S.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L.; CARVALHO, A. F.; CARDOSO, F. P.; MENDES, B. C. (2019). *Influence of the incorporation of granite waste on the hiding power and abrasion resistance of soil pigment-based paints*. Construction and Building Materials, v. 205, pp. 463-474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.046>.
- MANSO, J. M.; ORTEGA-LOPEZ, V.; POLANCO, J. A.; SETIÉN, J. (2013). *The use of ladle furnace slag in soil stabilization*. Construction and Building Materials, v. 40, pp. 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.079>.
- NAIDU, T.S; SHERIDAN, C.M.; DYK, L.D. (2020). *Basic oxygen furnace slag: Review of current and potential uses*. Minerals Engineering, v. 149, 18p. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106234>.
- OLUWASOLA, E.; AFOLAYAN, A.; POPOOPA, M.; AFOLABI, A. (2020). *Effect of Steel Slag on Engineering Properties of Lateritic Soil*. American Journal of Engineering Research, 9, n. 6, p. 20-27.
- PALOD, R.; DEO, S.; RAMTEKKAR, G. (2017). *Review and Suggestions on use of Steel Slag in Concrete and its Potential use as Cementitious Component Combined with GGBS*. International Journal of Civil Engineering and Technology, v.8, pp.1026-1035.
- PENTEADO, C. S. G.; EVANGELISTA, B. L.; FERREIRA, G. C. D. S.; BORGES, P. H. A.; LINTZ, R. C. C. (2019). *Use of electric arc furnace slag for producing concrete paving blocks*. Ambiente Construído, v.19(2), pp.21-32. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000200305>.
- PITANGA, H. N.; SILVA, T. O.; SANTOS, A. L.; SILVA, A. C. B.; LIMA, D. C. (2016). *Classificação MCT de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante compactadas visando a aplicação em estradas florestais*. Revista Arvore, v.40(5), pp. 911–919. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622016000500015>.
- RODRIGUES, K. H. P. (2022). *Utilização de resíduos industriais na estabilização de solos tropicais para aplicação em pavimentação*. Tese (doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, 230f.
- SCHEFFÉ, H. (1963). *The Simplex-Centroid Design for Experiments with Mixtures*. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), Volume 25, Issue 2, July, Pages 235–251, <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1963.tb00506.x>
- SEBBAR, N.; LAHMILI, A.; BAH, L.; OUADIF, L. (2020). *Treatment of clay soils with steel slag in road engineering*. EDP Sciences. 02017.
- SIMATUPANG, M. (2021). *Effectiveness of lowering saturation on residual shear strength of sand stabilized with fly-ash*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 622, p. 012003, 2021/01/08
- SRIDHARAN, A.; PRASHANTH, J. P.; SIVAPULLAIAH, P. V. (1997). *Effect of fly ash on the unconfined compressive strength of black cotton soil*. 1, n. 3, p. 169-175.
- YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. (2017). *Experimental evaluation of EAF ladle steel slag as a geo-fill material: Mineralogical, physical & mechanical properties*. Construction and Building Materials, v.154, pp.23-33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.149>.
- YOOBANPOT, N.; JAMSAWANG, P.; POORAHONG, H.; JONGPRADIST, P.; LIKITLERSUANG, S. (2020). *Multiscale laboratory investigation of the mechanical and microstructural properties of dredged sediments stabilized with cement and fly ash*. Engineering Geology, 267, p. 105491, 2020/03/20.
- ZUMRAWI, M. M.; BABIKIR, A. A.-A. A. (2017). *Laboratory Study of Steel Slag Used for Stabilizing Expansive Soil*. Asian Engineering Review, v.4(1), pp.1-6. <https://doi.org/10.20448/journal.508.20>.