

Aplicação da escória de alto forno em misturas de terra compactada no contexto do Estado do Mato Grosso do Sul/BR

Application of blast furnace slag in compacted earth mixtures in the context of the State of Mato Grosso do Sul/BR

Aline Ferreira Gisoato, Graduanda, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

aline.gisoato@ufms.br

Karina Trevisan Latosinski, Mestre, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

karina.latosinski@ufms.br

Andrea Naguissa Yuba, Doutora, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

naguissa.yuba@ufms.br

Resumo

Buscando compreender os efeitos da inserção de escória de alto forno em misturas álcali-ativadas de terra compactada para fins construtivos (taipa de pilão), o presente trabalho objetiva avaliar amostras quanto à resistência mecânica e a formação de eflorescências. O estudo se justifica pela extração de minério de ferro no Mato Grosso do Sul e produção do resíduo siderúrgico na região, além de oportunizar alternativas ao uso do cimento Portland, que sabidamente possui alto impacto ambiental. Com isso, foram identificadas as proporções significativas para composição combinada de solo local, escória e ativadores alcalinos indicando a viabilidade de aplicação dessa solução.

Palavras-chave: Taipa de pilão; Escória de Alto Forno; Ativação Alcalina

Abstract

In order to understand the effects of adding blast furnace slag to alkali-activated compacted earth mixtures for construction purposes (rammed earth), this study aims to evaluate samples in terms of mechanical strength and the formation of efflorescence. The study is justified by the extraction of iron ore in Mato Grosso do Sul and the production of steel waste in the region, as well as providing alternatives to the use of Portland cement, which is known to have a high environmental impact. As a result, significant proportions were identified for the combined composition of local soil, slag and alkaline activators, indicating the feasibility of applying this solution.

Keywords: *Rammed earth; Blast Furnace Slag; Alkaline Activation*

1. Introdução

O emprego da terra na construção é apresentado pela abundância do material e necessidade do homem em se fixar em locais, sendo, portanto, aplicada em diversas partes do mundo [1]. A terra crua se torna potencialmente sustentável, já que muitas vezes exige pouca ou nenhuma quantidade de estabilizadores. Nesse aspecto, os geopolímeros tem se apresentado como boas alternativas ao uso do cimento Portland empregando principalmente precursores ricos em aluminossilicatos, tal como a escória de alto forno, e ativadores altamente alcalinos em um processo de polimerização [2].

A escória de alto forno (EAF) é um subproduto da produção siderúrgica que se apresenta na forma de uma substância vítrea, obtida pelo resfriamento rápido do minério de ferro com calcário e coque sob altas temperaturas. Destaca-se que a EAF é um resíduo deste processo e produzido em grandes quantidades, portanto o seu uso corrobora com a diminuição do impacto ambiental de destinação desse resíduo aproveitando o seu potencial reativo. O Estado do Mato Grosso do Sul possui uma posição de destaque na produção de minério de ferro brasileira, atrás apenas da produção dos estados de Minas Gerais e Pará [3], porém com dificuldades de escoamento dessa produção [4]. Em especial, há considerável extração na região do Morro de Urucum em Corumbá/MS, distante 425 Km da capital, Campo Grande (local de realização dessa pesquisa).

O uso da EAF associado ao cimento Portland já é uma prática usual e pesquisas atestam a melhora da resistência à compressão, do processo de hidratação e da durabilidade do concreto considerando a qualidade da escória [5]. Logo, essa pesquisa busca avaliar o efeito da adição da escória de alto forno extraída de Corumbá/MS, combinada com ativadores alcalinos sobre a resistência mecânica em misturas com solo arenoso típico do município de Campo Grande/MS. Com vistas à aplicação em taipa de pilão, buscou-se analisar também a formação de eflorescências nas amostras estudadas.

2. Procedimentos metodológicos

2.1. Caracterização dos materiais: solo e escória de alto forno

O solo utilizado foi coletado em jazida comercial do município de Campo Grande/MS em fevereiro do ano de 2024 e armazenado, após secagem em estufa, em local protegido. A caracterização do material consta no quadro 1 e cumpre os requisitos básicos para a aplicação em paredes de taipa de pilão conforme ABNT NBR 17014:2022 [6].

Quadro 1: Caracterização do latossolo vermelho de Campo Grande/MS.

Latossolo Vermelho - Campo Grande/MS		
Descrição	Resultado	Referência
Massa específica dos grãos do solo	2,741 g/cm ³	ABNT NBR 6458/2017
Classificação granulométrica	Areia 83,64 %; Silte 4,36 %; Argila 12,00 %	ABNT NBR 6502/1995
Limite de Liquidez	18%	ABNT NBR 6459/2017
Limite de Plasticidade	não plástico	ABNT NBR 7180/2016

Fonte: LATRAN, Laboratório de transportes UFMS.

O solo e a escória de alto forno foram caracterizados por difração de raios x. O equipamento utilizado foi o Difratômetro de Raios X D2 Phaser da Bruker, com computador integrado e software *Diffraclus* EVA. A radiação empregada é Cu α com varredura angular 2 θ , tensão

30kV e corrente 10mA. Partindo das informações disponibilizadas pelo equipamento e uso dos softwares *XPertHighScore* e *Origin*, o difratograma é apresentado na figura 1. Conforme fichas catalográficas, no solo foram identificados os picos cristalinos de Hematita - Fe_2O_3 (F) entre 20 e 30 (2) e Quartzo - SiO_2 (S), além de Calcita - CaCO_3 (C). Na amostra de escória não foram identificadas fases cristalinas, comprovando sua característica amorfa e, portanto, a capacidade reativa do resíduo.

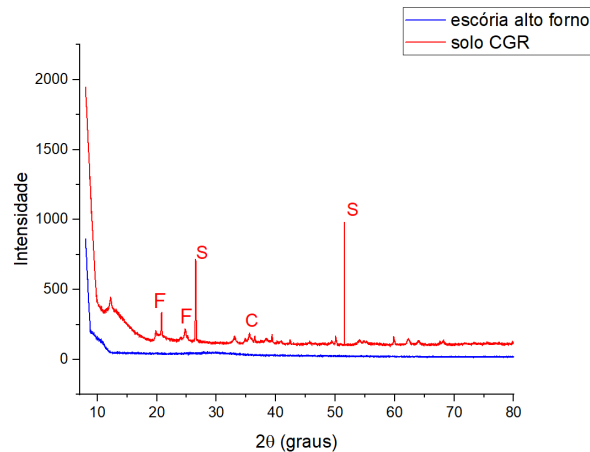


Figura 1: Difratograma do solo e amostra de escória. Fonte: Autores.

Os dois materiais foram analisados quanto ao tamanho de partícula por difração de raios laser em solução aquosa no equipamento Malvern 3000+, cuja análise de partículas varia entre 0,1 a 1000 μm . A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica dos materiais envolvidos, indicando um valor médio de superfície específica para a escória de 0,0346 m^2/g e para o solo de 0,343 m^2/g .

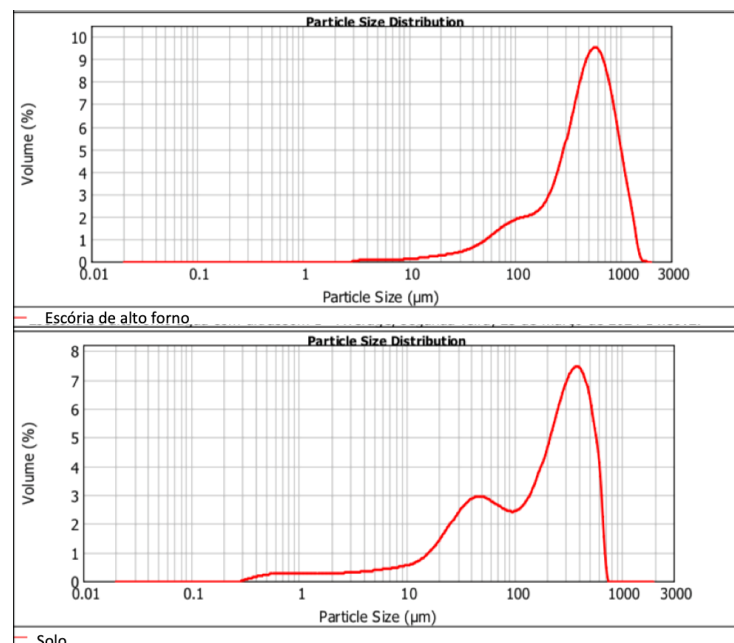


Figura 2: Distribuição do tamanho de partículas do solo e EAF por difração à laser. Fonte: Autores.

A escória utilizada foi coletada com aspecto granular diretamente na siderúrgica do município de Corumbá/MS e posteriormente separada conforme a coloração do resíduo (verde – utilizada neste estudo –, cinza e rosa), ponderando seus níveis de acidez. Segundo a siderúrgica, o material coletado ficou disposto a céu aberto, como na figura 3, por menos de uma semana. Usando o moinho de bolas, o material foi moído por aproximadamente em 2 horas, e peneirado. Somente foi utilizada a porção passante na peneira 0,07 mm - conforme NBR 7181 (ABNT, 2018).



Figura 3: Coleta; Aspecto granular da escória coletada; Aspecto após a cominuição no moinho. Fonte: Autores

2.2. Composição da mistura e moldagem dos corpos de prova

A composição dos traços foi elaborada com base nos teores encontrados na literatura e adaptados à realidade desse estudo, chegando-se aos percentuais de 3, 5, 7, 10, 15 e 25%. O ativador utilizado foi hidróxido de sódio em lascas, 96-99% de pureza de uso comercial. As dosagens foram estabelecidas em função da massa do solo, Tabela 1. Todas as misturas foram feitas manualmente e, previamente, o hidróxido de sódio foi dissolvido em água para que a temperatura da solução ficasse próxima à temperatura ambiente ao ser misturada com os materiais secos. O teor de umidade foi ajustado conforme o teste de bola da mistura.

Tabela 1: Proporcionamento dos materiais utilizados.

Amostra	Solo (%)	Hidro. Sódio (%)	Escória (%)	Água (%)
Referência	100	-	-	5,7
SE10	100	-	10	7,9
SE7	100	-	7	7,9
SE5	100	-	5	5,0
SN10	100	10	-	8,0
SN3E10	100	3	10	6,4
SN3E7	100	3	7	6,4
SN3E5	100	3	5	6,4
SN5E25	100	5	25	6,9
SN5E15	100	5	15	7,9
SN5E10	100	5	10	6,4
SN5E5	100	5	5	6,4

Fonte: Autores

Para cada traço, foram elaborados, no mínimo, 9 corpos de prova (CP) em molde cilíndrico de tamanho 5x10cm, usualmente aplicado na avaliação de argamassas. Para garantir a uniformidade e o grau de compactação, cada CP foi compactado com 3 camadas de terra e cada uma delas recebeu 26 golpes, semelhante ao ensaio normal de Proctor, conforme NBR 7182:2016.

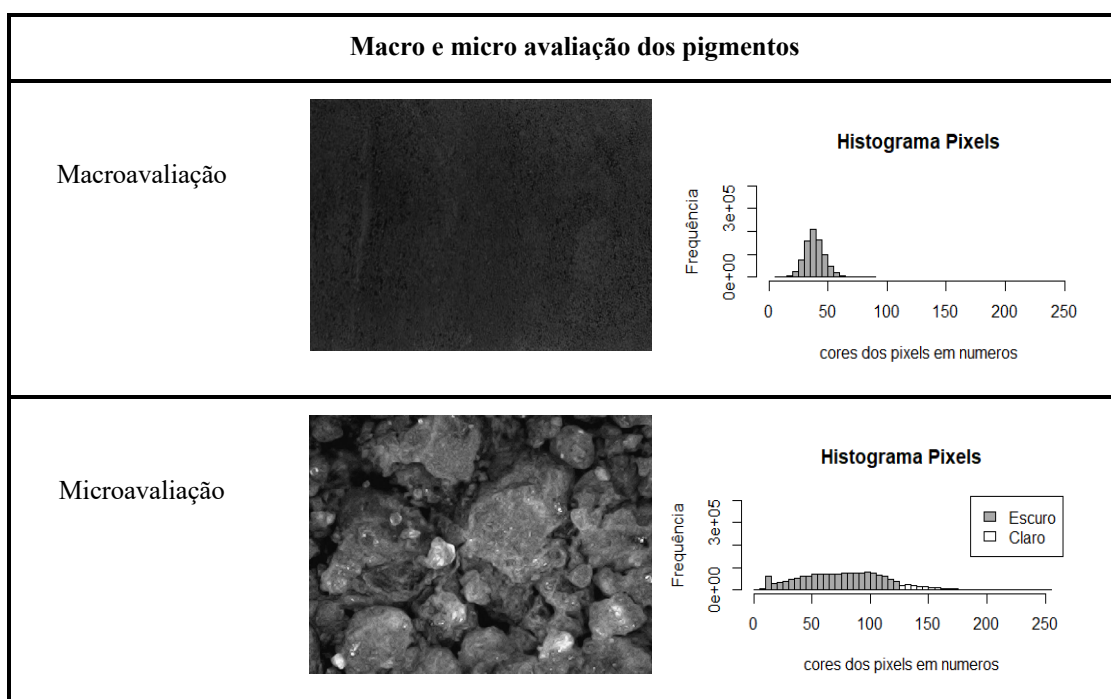
A desmoldagem dos CPs ocorreu após a finalização da compactação, e posteriormente as amostras foram acomodadas em ambiente com temperatura regulada em 30°C - temperatura aproximada à temperatura média do município de Campo Grande/MS. As condições de umidade não foram controladas, porém o ambiente de estocagem é fechado, sem aberturas externas.

2.3. Avaliação do desempenho mecânico da mistura e formação de eflorescências

Nas idades de 7 e 21 dias, os CPs foram avaliados quanto à resistência à compressão axial em prensa hidráulica normatizada, com velocidade de 0,05 KN/s. Foram rompidas 3 amostras por idade e, a partir dos resultados encontrados, avaliações estatísticas considerando a variância foram realizadas para validar as relações entre o teor de resíduo/ativador utilizado.

Todos os CPs foram fotografados com o Microscópio Zoom 1600x Cam 2.0 Mp Profissional Digital Usb e com dispositivo móvel para análise quanto a formação de eflorescências no *software* RStudio. A partir da criação de um código R, todas as imagens passaram pela análise do software resultando na quantidade de pixels brancos e pretos presentes, tanto na avaliação micro quanto macro. De forma prática: cada célula dessa imagem é um pixel, sendo atribuído 0 para preto e 255 para branco, extraindo apenas a quantidade numérica de cada um, como exemplificado no Quadro 2.

Quadro 2: Quantificação de manchas brancas nas amostras avaliadas.



Fonte: Autores.

3. Resultados e discussões

3.1. Resistência mecânica

Aos 21 dias, os CPs obtiveram massa específica entre 1,66 e 2,03 g/cm³, estando a maior parte das amostras compatível com a NBR 17014 (ABNT, 2022) que indica aplicação maior ou igual a 1,750g/m³. Após a avaliação estatística, os dados com relação ao desempenho mecânico foram agrupados na Figura 5, destacando-se a significativa progressão de resistência das amostras SN3E5 e SN5E10 aos 7 dias.

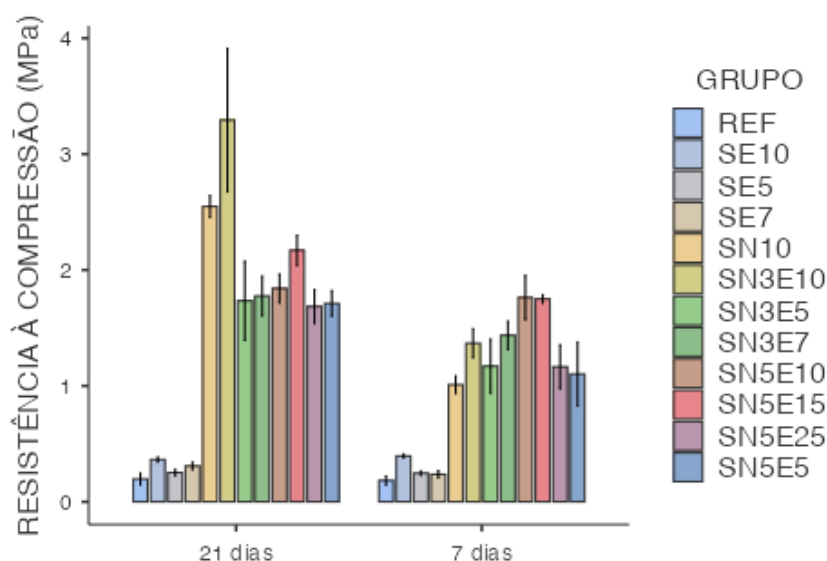


Figura 4: Evolução da resistência à compressão simples nas amostras avaliadas. Fonte: Autores.

Como esperado, observou-se que apenas a inserção de EAF não gerou ganho de resistência expressivo nas misturas (SE10 e SE5), mas quando combinada com o ativador alcalino, principalmente com baixa concentração, 3%, possibilitou uma resistência maior que o limite mínimo indicado pela NBR 17014 (2022), que é de 1,3MPa. Esse valor não foi alcançado apenas nas misturas REF, SE10, SE7, SE5 até os 21 dias.

3.2. Formação de eflorescências

A quantificação dos pixels brancos nas imagens, relacionada à formação de eflorescências, é apresentada na Tabela 2. Tal avaliação só foi possível devido ao alto contraste entre a coloração do solo utilizado e a formação esbranquiçada dos sais.

A análise visual macro e micro oferecem duas perspectivas: enquanto a análise macro se concentra nos aspectos gerais e amplos, a análise micro examina os detalhes mais específicos, aproximando-se do interior das amostras. A partir dessas abordagens, identificou-se que a amostra SN5E10, mostrou maior comprometimento com eflorescências nas duas escalas de avaliações, mas tal correlação não foi observada em todas as misturas, indicando que a saída dos sais pode não ocorrer em locais diferentes dos registrados pela imagem microscópica. Ainda, não foi identificado que a maior formação de eflorescência corresponde a valores baixos de resistência, pois nesse caso a amostra esteve entre as 4 maiores resistências avaliadas no estudo.

Tabela 2:Quantificação dos pixels nas imagens.

Amostra	Quantidade de pixel branco (255) macro - micro	Percentuais (%) macro - micro
Referência	0 - 139983	0 - 8,99
SE10	24 - 206838	0,003 - 13,30
SE7	0 - 60942	0 - 3,91
SE5	18 - 107901	0,003 - 7,00
SN3E10	21 - 395541	0,003 - 25,40
SN3E5	6 - 601179	0,001 - 38,60
SN5E25	273 - 233124	0,036 - 18,50
SN5E15	117 - 427935	0,014 - 27,50
SN5E10	453 - 817161	0,068 - 52,50
SN5E5	135 - 302973	0,020 - 19,50

Fonte: Autores.

Entretanto, o traço SN3E10 obteve maior resistência à compressão e a segunda mais baixa taxa de formação de sais entre as misturas combinadas de EAF e hidróxido de sódio, mostrando-se um potencial de aplicação nas paredes de terra. Não houve relação direta entre o aumento de resistência e a incorporação de EAF, haja vista a adição com 25% ter mais baixa resistência que a com 15% em relação a 5% de ativador. Com isso, na amostra avaliada, a relação mais promissora EAF/ativador está próxima de 3,5. Para trabalhos futuros é importante uma avaliação da composição química de todos os componentes para compreender melhor se esse efeito é químico ou físico. Ainda, o aumento das eflorescências pode ser acompanhado em outras idades ajustando tal metodologia para acompanhamento em data iniciais.

4. Considerações finais

O corrente desconhecimento sobre a possibilidade de aplicação da terra crua como material de construção destaca a importância de pesquisas que envolvam ciência e tecnologia na aplicação dos materiais envolvidos, otimizando as condições de aplicação dos recursos locais. No caso da incorporação do resíduo EAF, os testes realizados neste trabalho indicaram bom desempenho de alguns traços com ativadores alcalinos utilizados em baixas proporções (logo, baixo custo e menor impacto ambiental) e, portanto, possíveis de serem aplicados na execução prática.

Foram avaliados insumos e um resíduo disponíveis no Mato Grosso do Sul, mas que podem ser encontrados também em outros estados brasileiros com características semelhantes e, com isso, espera-se que os resultados dessa pesquisa possam viabilizar um maior número de investigações relacionados às construções de terra, em especial a taipa de pilão. Nesse trabalho, apesar de não ter sido incorporada uma avaliação relacionada aos impactos de transporte do resíduo testado, verificou-se a viabilidade de sua aplicação relacionada à substituição do cimento Portland na construção civil.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Referências

- [1] MINKE, G. Manual de construção com terra: uma arquitetura sustentável; tradução Jorge Simões. - 1. ed. - São Paulo, 2015.
- [2] DAVIDOVITS, J. Geopolyme chemistry and sustainable development. The Poly(sialato) terminology: a very useful and simple model fot the promotion and understanding of green-chemistry. Proceedings of 2005 Geopolymer Conference, 9-15p.
- [3] JESUS, C. Ferro/aço. Agência Nacional de Mineração, 2011. Disponível em: https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?idbancoarquivoarquivo=3974. Acesso em: mar 2024.
- [4] BRITO, N. de M. Desenvolvimento econômico e mineração: uma abordagem da atividade em Corumbá, MS. Entre Lugar, n 2(4), Dourados/MS, 2011. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/entre-lugar/article/view/2198>. Acesso em: mar 2024.
- [5] CABRERA-MADRID, J. A.; ECALANTE-GARCÍA, J. I., CASTRO-BORGES, P. Resistência à compressão de concreto com escória de alto forno. Revisão do estado da arte. Revista Alconpat, v. 6, n. 1, jan, Yucatán, 2016.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17014. Taipa de pilão: requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro, 2022.