



Análise da incorporação de escória de alto forno em misturas álcali-ativadas de terra compactada

Aline Ferreira Gisoato ^a; Karina Trevisan Latosinski ^b

^a Aluna de Graduação em Engenharia Civil, aline.gisoato@ufms.br

^b Professora Orientadora, Doutora, karina.latosinski@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

Buscando compreender o comportamento da Escória de Alto-Forno (EAF) em misturas destinadas à produção de elementos de terra compactada, este estudo foi desenvolvido a partir da dosagem de terra, EAF e hidróxido de sódio, considerando aplicações em paredes de taipa de pilão ou BTC. A investigação envolveu a caracterização dos materiais, a elaboração de corpos de prova e a análise do desempenho mecânico, absorção e acompanhamento visual das amostras. A EAF utilizada, proveniente da indústria siderúrgica de Corumbá/MS, foi incorporada com o teor de 10%, enquanto o ativador alcalino (NaOH) foi aplicado na concentração de 3%. Os corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 5 × 10 cm, foram avaliados aos 7 e 21 dias quanto à resistência à compressão e monitorados visualmente após cura ambiente. Os resultados demonstraram que a adição da escória, combinada ao ativador alcalino, proporcionou ganhos expressivos no desempenho das misturas: aos sete dias, enquanto o solo natural apresentou resistência média de 0,20 MPa, as formulações com EAF atingiram até 2,94 MPa. Embora tenham sido observadas eflorescências de baixa intensidade na superfície dos corpos de prova, os resultados gerais indicam a viabilidade técnica do uso da escória como resíduo regional para otimização de sistemas construtivos em terra compactada.

Palavras-chave: Escória de Alto-Forno, Taipa de Pilão, Solos, Eflorescência, Ativação Alcalina.

ABSTRACT

In order to understand the behavior of Blast Furnace Slag (BFS) in mixtures intended for the production of compacted earth elements, this study was developed using proportions of raw soil, BFS, and sodium hydroxide, considering applications in rammed-earth walls. The investigation involved material characterization, specimen preparation, and the analysis of mechanical and visual performance. The BFS used, originating from a steelmaking plant in Corumbá, MS, was incorporated at a 10% content, while the alkaline activator (NaOH) was applied at a concentration of 3%, based on previously studied values. Cylindrical specimens with dimensions of 5 × 10 cm were evaluated at 7 and 21 days for compressive strength and monitored visually after curing at 30 °C. The results showed that the addition of slag, combined with the alkaline activator, significantly improved the performance of the mixtures: at seven days, while natural soil exhibited an average strength of 0.20 MPa, the formulations containing BFS reached up to 2.94 MPa. Although low-intensity efflorescence was observed on the specimen surfaces, the overall results indicate the technical viability of using slag as a regional input to enhance compacted earth construction systems.

Keywords: Blast Furnace Slag, Rammed Earth, Soils, Efflorescence, Alkali Activation.

1. Introdução

Técnicas construtivas com terra têm se popularizado como alternativas potencialmente mais sustentáveis, já que aproveitam um recurso natural disponível e, por vezes, exigem pouca ou nenhuma quantidade de estabilizantes químicos. Tradicionalmente, os ligantes mais empregados nesse contexto são a cal e o cimento Portland, utilizados para conferir maior resistência mecânica e estabilidade frente aos agentes ambientais (Houben; Guillaud, 2014). No entanto, pesquisas recentes têm ampliado o repertório de ligantes, incorporando o uso de escória de alto forno, cinzas volantes, metacaulim ativados por soluções fortemente alcalinas que apresentam potencial para melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade enquanto reduzem a pegada ambiental associada à produção de cimento convencional (Proviss; Van Deventer, 2014). Nesse contexto, a terra na construção civil se apresenta como um material de baixo impacto ambiental e os ligantes necessários podem ser aprimorados, seja no tipo ou na quantidade, para maior redução das emissões de CO₂.

A construção civil é conhecida como um dos setores que mais contribuem para as emissões globais de dióxido de carbono, devido principalmente à produção de materiais intensivos em energia, tal como o cimento Portland. Estimativas internacionais indicam que o setor da construção é responsável por aproximadamente 37% das emissões energéticas globais de CO₂, considerando tanto processos industriais quanto consumo energético operacional dos edifícios (IEA, 2022). A produção de cimento, isoladamente, responde por cerca de 7% a 8% das emissões antropogênicas mundiais, devido à calcinação do calcário e ao elevado consumo térmico nos fornos de clínquer (Scrivener; John; Gartner, 2018). Além disso, costumeiramente os processos construtivos envolvem transporte de materiais, uso de equipamentos pesados e grande demanda por aço e outros insumos de alta pegada de carbono, ampliando seu impacto ambiental (Allwood et al., 2012). Desse modo, é necessária uma transição para a aplicação de materiais menos impactantes, como ligantes de baixa emissão e técnicas construtivas baseadas em recursos locais, a fim de mitigar a contribuição da construção civil para o aquecimento global (Proviss, 2018).

Buscando reduzir o uso do cimento Portland, estudos indicam que ativadores fortemente alcalinos - principalmente hidróxido de sódio, hidróxido de potássio e silicato de sódio - podem promover

ganhos significativos de resistência mecânica em misturas ricas em aluminossilicatos, originando ligantes especiais, conforme o conceito de ligantes geopoliméricos inicialmente proposto por Davidovits (Davidovits, 2020). Nesses casos, a literatura demonstra que a escória de alto forno (EAF), tem sido utilizada como um precursor em substituição parcial do cimento Portland, já que é uma fonte de cálcio, silício e alumínio, obtendo-se melhorias na resistência à compressão, no desenvolvimento da hidratação e na durabilidade dos compósitos (Shi; Jiménez; Palomo, 2011; Proviss; Van Deventer, 2014; Puertas; Fernández-Jiménez, 2003).

Logo, o presente estudo busca analisar o efeito da incorporação de EAF em misturas de solo arenoso ativadas com solução de hidróxido de sódio, no âmbito de técnicas construtivas com terra compactada. Assim, foram avaliadas a compressão simples, a absorção de água e o efeito de formação de eflorescências, considerando a influência de 3 granulometrias distintas de escória na performance final das misturas.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Solo

O solo é a camada superficial da crosta terrestre resultante da decomposição e transformação das rochas, associada à incorporação de matéria orgânica proveniente de plantas, animais e micro-organismos. Trata-se de um sistema natural dinâmico composto por minerais — como areia, silte e argila —, matéria orgânica, água, ar e uma diversidade de organismos vivos que interagem continuamente (Brady; Weil, 2013).

No município de Campo Grande (MS), predominam Latossolos Vermelhos, acompanhados por Neossolos Quartzarênicos, Argissolos e áreas com Cambissolos, refletindo as formas de relevo e o contexto geológico do Planalto de Maracaju e da região do Cerrado (Embrapa, 2024; Prefeitura de Campo Grande, 2023). Os latossolos apresentam perfis profundos, elevada drenagem e acidez natural, além de baixa fertilidade, exigindo correção e adubação para uso agrícola intensivo. Já os Neossolos Quartzarênicos são arenosos, rasos e pobres em matéria orgânica, com baixa retenção hídrica e maior suscetibilidade à erosão (Embrapa, 2022).

Assim, é necessário compreender os mecanismos químicos, físicos e mecânicos envolvidos neste material para relacionar o seu uso na construção de edificações. O solo que apresenta baixos teores de argila - condição favorável à compactação -, pode conter reduzida presença de argilominerais limitando os mecanismos de álcali-ativação devido à menor disponibilidade de aluminossilicatos no solo em estado natural (LATOSINSKI, 2025). Embora essa condição represente uma restrição, ela não inviabiliza o processo, incentivando a incorporação de outras fontes reativas precursoras, tais como EAF (DE FILIPPIS, PRUD'HOMME, MEILLE, 2024), cinza volante (KOSARIMOVAHH ED, TOUFIGH, 2020), sílica ativa (MEEK, BECKETT, ELCHALAKANI, 2020), metacaulim (WANG et al., 2021).

2.2. Escória de Alto Forno

A escória de alto forno (EAF) é um subproduto da indústria siderúrgica basicamente formada pela mistura de minério de ferro, calcário e coque em altas temperaturas. Quando resfriada rapidamente, pode ser caracterizada pela formação de uma fase vítreia, potencialmente reativa, resíduo da produção de ferro-gusa. Gerada em grandes volumes, é predominantemente incorporada à fabricação do cimento, mas pode ter aplicações diversas, apresentando elevado potencial de aproveitamento na formulação de novos materiais (PIMENTEL, 2017).

Provis (2014) destaca que a EAF apresenta elevada reatividade em meios de alcalinidade moderada quando comparada a outros precursores comumente empregados em sistemas álcali-ativados, como a cinza volante e o metacaulim. Essa característica confere ao material maior versatilidade e adequada capacidade de reação em temperatura ambiente. Em soluções de silicato ou de hidróxido de sódio ou potássio, os produtos formados a partir da ativação da EAF são predominantemente géis do tipo C-A-S-H, isto é, aluminossilicatos de cálcio hidratados. Conforme observado por Marvila, Azevedo e Vieira (2021), esse gel apresenta estrutura semelhante ao C-S-H resultante da hidratação do cimento Portland, porém com menor teor de cálcio, maior substituição de alumínio e grau superior de polimerização, o que influencia positivamente as propriedades mecânicas e a durabilidade dos compósitos produzidos.

A EAF exerce papel importante para a reatividade das misturas, sobretudo em sistemas cimentícios, geopoliméricos ou demais ativações alcalinas. De

modo geral, ela funciona como fonte químico-mineral capaz de participar das reações que incrementam a resistência e a durabilidade do material. Em meio alcalino, a escória reage com o Ca(OH)₂ — proveniente da hidratação de cimento ou cal — promovendo a formação de compostos cimentícios adicionais, os quais contribuem para o aumento da resistência mecânica, a redução da porosidade e a melhoria da durabilidade (MARVILA; AZEVEDO; VIEIRA, 2021).

O estado do Mato Grosso do Sul destaca-se na produção nacional de minério de ferro, sendo superado apenas pelos estados de Minas Gerais e Pará (JESUS, 2011). Em particular, a região do Morro de Urucum, em Corumbá/MS — situada a 425 km de Campo Grande, onde esta pesquisa foi conduzida — concentra a atividade de extração de minério no MS. Como não há uma destinação adequada para o resíduo dessa produção, formam-se grandes volumes de escória no pátio da siderúrgica local, Figura 1.

Figura 1 - Coleta na siderúrgica Votorantim em Corumbá/MS. Fonte: Autor



2.3. Ativação alcalina

A ativação alcalina envolve a interação entre materiais ricos em aluminossilicatos (precursores) e soluções altamente alcalinas (ativadores), capazes de gerar pela reação química produtos de natureza cimentícia. Precursores como metacaulim, cinzas volantes e escória de alto-forno possuem estruturas amorfas que, em contato com hidróxidos ou silicatos alcalinos, liberam íons de silício e alumínio para formação de géis (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). A ação de ativadores tais como NaOH ou silicato de sódio promove a dissolução inicial desses componentes e desencadeia processos de

polimerização que resultam na formação de géis hidratados, conforme o teor de cálcio presente na matriz. O ligante obtido tende a apresentar elevada resistência mecânica, baixa porosidade e maior durabilidade, configurando-se como uma alternativa tecnicamente viável comparada aos aglomerantes convencionais. Entretanto, o ajuste das concentrações dos ativadores é complexo, e diversas questões podem contribuir para a formação de eflorescências, podendo inclusive causar degradação das amostras (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

2.3.1. Formação de eflorescências

As eflorescências correspondem a depósitos cristalinos esbranquiçados formados na superfície dos materiais devido à migração e subsequente precipitação de sais solúveis, processo que depende da presença simultânea de umidade e gradientes de pressão hidrostática que favorecem o transporte dessas soluções através da matriz porosa (IBIAPINO; BRITO; RIBEIRO, 2017). Embora geralmente possam ser removidas e não comprometam diretamente a integridade do elemento, tais manifestações alteram o aspecto visual e, quando associadas a sais mais agressivos, podem intensificar processos de deterioração à medida que a solução salina permanece nos poros do material (FERNANDES, 2010). A literatura aponta que não há relação universal entre eflorescência e propriedades mecânicas, uma vez que o fenômeno depende significativamente da composição química dos precursores, da concentração dos ativadores e das condições de cura adotadas (LONGHI et al., 2020; ZHANG; PROVIS; MA et al., 2018; CHEN et al., 2020).

3. MÉTODOS

3.1. Materiais

3.1.1. Caracterização precursores: solo e EAF

O solo empregado foi coletado em uma jazida comercial localizada no município de Campo Grande/MS, em fevereiro de 2024. Após a secagem em estufa, o material foi armazenado em local protegido. Sua caracterização, apresentada no Quadro 1, atende parcialmente aos requisitos essenciais para utilização em paredes de taipa de pilão, conforme especificado na ABNT NBR 17014:2022.

Quadro 1 - Caracterização do solo. Fonte: Laboratório de transportes UFMS (LATRAN)

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

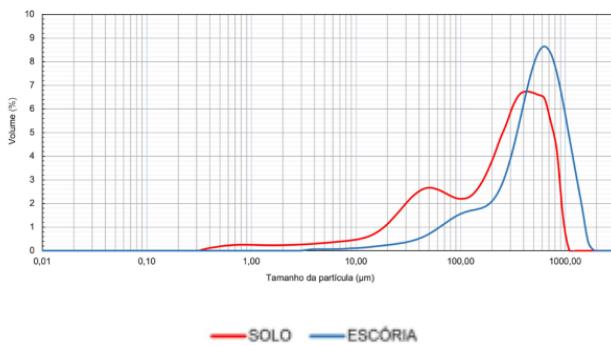
A escória utilizada foi coletada com aspecto granular diretamente do pátio da siderúrgica uma semana após a produção. Para utilização nas misturas, em laboratório a EAF passou pelo processo de moagem em moinho de bolas por ciclos de 3h e posterior peneiramento (Figura 2) e estocagem vedada.

Figura 2 - Esquerda, aspecto granular da escória coletada; Direita, aspecto após a cominuição no moinho. Fonte: Autor



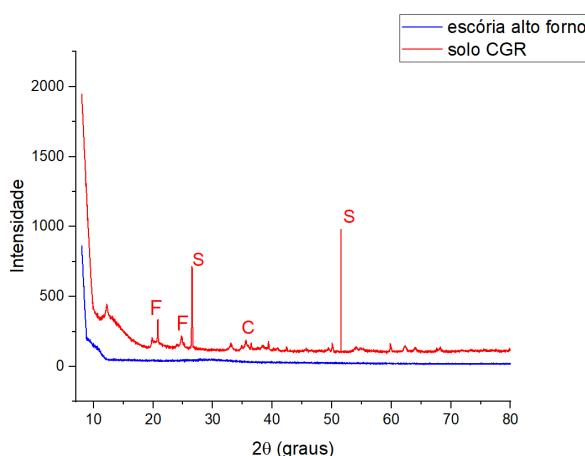
Em uma primeira etapa, foi utilizada a peneira 0,71mm, sendo obtida a distribuição granulométrica apresentada na Figura 3. Os dois materiais foram analisados quanto ao tamanho de partícula por difração de raios laser em solução aquosa no equipamento Malvern 3000+, cuja análise de partículas varia entre 0,1 a 1000 µm. Posteriormente, foram selecionadas as porções passantes nas peneiras 0,075 mm e 0,053 mm - conforme ABNT NBR 7181:2018.

Figura 3 - Distribuição do tamanho de partículas do solo e da escória de alto forno por difração à laser. Fonte: Autor



Ambos os materiais foram caracterizados por difração de Raios X, pelo Difratômetro de Raios X D2 Phaser da Bruker, computador integrado e software *Difracplus EVA*, radiação Cu α com varredura angular 2 θ , tensão 30kV e corrente 10mA. Com as informações disponibilizadas pelo equipamento e com o uso dos softwares *XpertHighScore* e *Origin*, o difratograma é apresentado na Figura 4. Conforme fichas catalográficas, foram identificados os picos cristalinos no solo correspondentes à caulinita (F) e quartzo (S), já na EAF não foram identificadas fases cristalinas, comprovando sua característica amorfa e, portanto, a capacidade reativa do resíduo.

Figura 4 - Difratograma do solo e amostra de escória. Fonte: Autor.



3.1.2. Ativador

O ativador empregado foi hidróxido de sódio em lascas, com pureza comercial de 96–99%. Antes da mistura com os componentes sólidos, o hidróxido de sódio foi previamente dissolvido em água. Desta forma, permitindo que a solução atingisse temperatura próxima à do ambiente, de modo a evitar interferências térmicas no processo de incorporação.

3.2. Composição da mistura e moldagem dos corpos de prova (CP)

A composição do traço foi definida a partir da melhor avaliação mecânica correspondente a uma malha experimental maior, cujos teores de EAF e NaOH e água variaram gradativamente (GISOATO, LATOSINSKI E YUBA, 2024). A composição escolhida utiliza 10% de EAF e 3% de hidróxido de sódio em função da massa seca do solo, Tabela 1. O teor de umidade das misturas foi ajustado por meio do método expedito “teste da bola”, a fim de garantir trabalhabilidade compatível com as técnicas da taipa de pilão e bloco de terra comprimida (BTC).

Tabela 1 – Porcionamento dos materiais utilizados. Fonte: Autor

Amostra	Solo (%)	NaOH (%)	EAF (%)	Água (%)
N3E10	100	3	10	6,5

Para avaliação da resistência à compressão simples, foram moldados seis CPs cilíndricos (5×10cm) para cada granulometria de EAF utilizada nesta pesquisa: 0,71, 0,075, 0,053 mm, mantendo-se o mesmo teor de umidade. Já para a avaliação da absorção de água, foram moldados três CPs para cada granulometria. Cada CP foi moldado com compactação em três camadas sucessivas, cada uma submetida a 26 golpes (Figura 4), procedimento semelhante ao ensaio de compactação Proctor Normal, conforme estabelecido pela norma NBR 7182:2016.

Figura 4 - Compactador metálico manual. Fonte: Autor



A desmoldagem dos corpos de prova foi realizada imediatamente após a conclusão do processo de compactação. Na sequência, os CPs foram submetidos à cura ambiente sendo armazenados em recinto fechado, sem controle específico de temperatura e umidade relativa, mas garantindo a não ocorrência de variações ambientais significativas durante o período inicial de cura.

3.2. Avaliação do desempenho mecânico da mistura, absorção por imersão e inspeção de eflorescências

Aos 7 e 21 dias de cura, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial em prensa hidráulica universal normalizada, operando com velocidade de carregamento de 0,05 kN/s. Para cada idade, três amostras foram rompidas, permitindo a obtenção de valores médios representativos do comportamento mecânico das misturas.

Para o ensaio de absorção de água, os CPs foram curados por 7 dias em temperatura ambiente e posteriormente submetidos à estufa à 100 °C até a estabilidade de massa, conforme ABNT NBR 1355:2012. Após esse procedimento, as amostras foram pesadas antes e depois da imersão total em água por 24h - Figura 5.

Figura 5 - Esquerda, ensaio de resistência à compressão; Direita, ensaio de absorção de água. Fonte: Autor

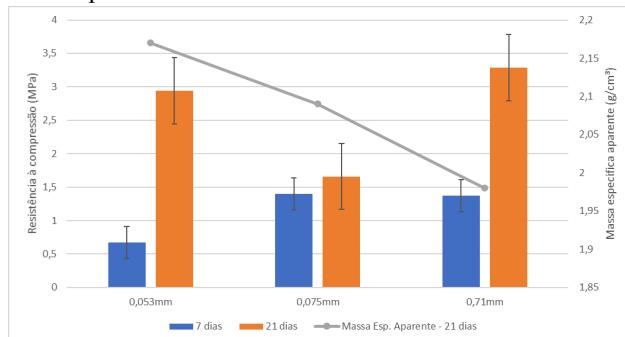


Considerando a frequente formação de eflorescências em misturas álcali-ativadas, foi realizado o monitoramento visual das amostras com registo fotográfico feito por dispositivo móvel aos 7 e 21 dias para as granulometrias 0,053 e 0,075mm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados de resistência à compressão simples e a massa específica aparente são apresentados na Figura 6. Demonstra-se que o traço feito com EAF passante pela peneira 0,075mm apresenta maior variação de ganho de resistência entre 7 e 21 dias, comprovando maior reatividade da partícula de menor dimensão.

Figura 6 - Análise dos valores de resistência à compressão obtidos entre 7 e 21 dias. Fonte: Autor



Vale ressaltar que os valores de 21 dias são todos superiores à 1,3 MPa estabelecido pela ABNT NBR 17014:2022 como valor mínimo para aplicações em taipa de pilão e próximos ao limite inferior médio de 2 MPa apresentado pela ABNT NBR 8492:2013 para blocos. O maior tamanho de partícula representa a maior resistência levantando a possibilidade de uma menor velocidade de reação de ativação e, portanto, menor formação de eflorescência produzida capaz de enfraquecer a matriz. Infere-se a possibilidade de que os grãos maiores de EAF tenham papel de preenchimento (*efeito filler*), o que ainda sugere a necessidade de complementação dos estudos.

A Tabela 2 indica os valores percentuais obtidos com as 3 granulometrias analisadas. Observou-se que as amostras com importante aumento na massa específica aparente correspondem ao menor índice de absorção.

Tabela 2 - Percentual de absorção conforme traço avaliado. Fonte: Autor

Granulometria	A _{NBR 1355} (%)			A _{médio} (%)
	71mm	0,075mm	0,053mm	
71mm	9,89	9,99	9,99	9,96
0,075mm	8,80	9,13	10,65	9,53
0,053mm	7,56	5,14	10,57	7,76

O ensaio de absorção de água tem como objetivo quantificar a capacidade do material em incorporar e reter água em sua rede porosa, parâmetro diretamente associado ao desempenho e à durabilidade frente à ação da umidade em estruturas compactadas. Considerando a análise dos resultados, em relação ao BTC, a ABNT NBR 8491:2012 estabelece que valores típicos de absorção devem ser inferiores a 22%, servindo como referência para a avaliação da viabilidade técnica do material em aplicações estruturais e de vedação expostas à umidade. O resultado do índice de absorção mostrou que ambos os traços permaneceram dentro da recomendação.

Quanto às eflorescências, é possível visualizar a maior formação no traço de menor granulometria, tanto aos 7 dias (Figura 7), quanto aos 21 dias (Figura 8). Possivelmente essa formação se dá pela rápida reação química ocorrida entre a menor partícula de EAF e os demais componentes, o que na partícula de maior dimensão ocorre mais lentamente.

Figura 7 - Análise visual da formação de eflorescência dos corpos de prova com 7 dias. Fonte: Autor



7 dias - 0,053mm

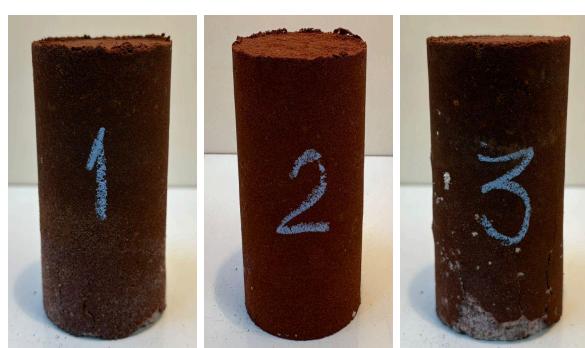


7 dias - 0,075mm

Figura 8 - Análise visual da formação de eflorescência dos corpos de prova com 21 dias. Fonte: Autor



21 dias - 0,053mm



21 dias - 0,075mm

Após o rompimento dos CPs da menor granulometria, destacou-se a presença de pontos brancos em uma pequena parte externa da circunferência (Figura 9). Sendo assim, o aumento da formação de eflorescências deve ser continuamente monitorado, de modo a permitir a avaliação de sua evolução e a identificação de estratégias adequadas para mitigar os impactos associados ao fenômeno, tal como envelopamento das amostras ou variação nas condições de cura.

Figura 9 - Análise visual da formação de eflorescência após rompimento. Fonte: Autor



Estudos demonstram que a granulometria da escória exerce influência direta sobre sua reatividade, uma vez que partículas mais finas apresentam maior área superficial disponível para as reações iniciais de dissolução da fase amorfa. Consequentemente, misturas produzidas com escórias de maior finura tendem a gerar maior quantidade de géis hidratados e apresentar melhores desempenhos mecânicos (GUO et al., 2019; RUAN et al., 2019; HUANG et al., 2019). Assim como os autores, os resultados obtidos acompanham a mesma tendência.

5. CONCLUSÃO

A viabilidade de incorporação de escória de alto forno em matrizes de terra compactada demonstrada neste estudo reforça a relevância de pesquisas que integrem ciência e tecnologia para aprimorar o emprego de recursos locais. Os resultados obtidos para a resistência mecânica foram satisfatórios, evidenciando o potencial do material para emprego em técnicas construtivas em terra estabilizada. Embora os materiais avaliados sejam provenientes do Estado do Mato Grosso do Sul, insumos com características similares podem ser encontrados em outras regiões do país, o que amplia a aplicabilidade dos resultados.

Demonstrou-se que, apesar da etapa de cominuição da EAF ser um fator significativo na incorporação de energia considerando os impactos ambientais, no que se refere a resposta reativa desse resíduo o aumento da área específica tem vital importância à reação química da ativação alcalina. Infere-se que, caso o estudo avaliasse períodos mais longos de cura esse ponto se tornaria mais claro.

Quanto à formação de eflorescências, o monitoramento das amostras em diferentes idades permitiu observar que a formação de eflorescências é mais intensa nas fases iniciais, com tendência de estabilização. Os métodos de análise visual permitem apenas uma representação parcial dos fenômenos envolvidos.

Assim, espera-se que esta pesquisa contribua para a expansão de sistemas construtivos em taipa de pilão/BTC e, futuramente, para o desenvolvimento de alternativas menos impactantes ao cimento Portland na produção de elementos de terra crua.

4. AGRADECIMENTOS

Expresso minha gratidão a Deus pelo amparo constante durante toda esta trajetória. Agradeço profundamente à minha família, cujo apoio emocional, compreensão e motivação foram essenciais para que eu pudesse superar cada etapa deste percurso. Manifesto também meu reconhecimento à minha orientadora, Karina Trevisan Latosinski, pela orientação competente, pelas discussões enriquecedoras e pela disponibilidade em compartilhar conhecimento. Estendo meus agradecimentos aos colegas e amigos que contribuíram com palavras de encorajamento, trocas de experiências e colaboração, em especial à equipe de Infraestrutura da Superintendência da Polícia Rodoviária Federal do Mato Grosso do Sul (PRF/MS), pelo apoio, incentivo e compreensão ao longo deste processo. A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLWOOD, J. M. et al. **Sustainable Materials: With Both Eyes Open**. Cambridge: UIT Cambridge, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17014:2022: **Taipa de pilão - requisitos, procedimentos e controle**. Brasil, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181:2018: **Análise granulométrica**. Brasil, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8492:2013: **Tijolo de solo-cimento - análise dimensional, determinação de resistência à compressão e da absorção de água - método de ensaio**. Brasil, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 1355:2012: **Solo - cimento - ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - método de ensaio**. Brasil, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8491:2013: **Tijolo de solo-cimento - requisitos**. Brasil, ABNT.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications.** 5. ed. Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 2020.

DE FILIPPIS, U.; PRUD'HOMME, E.; MEILLE, S. **Micromechanical study of raw earth stabilization using instrumented indentation.** Materialia, v. 34, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2024.102060>.

ESCALANTE-GARCÍA, J. I. et al. **Hydration products and reaction kinetics of alkali-activated blast furnace slag.** Journal of the American Ceramic Society, v. 102, p. 2777–2790, 2003.

FERNANDES, P. **Estudo sobre a influência do massará no processo de formação de salitre em rebocos na região de Teresina - PI. 2010.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/12704>. Acesso em: abr. 2024.

GISOATO, A.F.; YUBA, A.N.; LATOSINSKI, K.T. **Eflorescências em solo álcali-ativado: metodologia para avaliação.** In: Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído, 20., 2024, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC, 2024.

GUO, H. et al. **The effect of fineness on the hydration activity index of ground granulated blast furnace slag.** Materials, v. 12, n. 18, p. 2984, 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31540153/>. Acesso em: nov. 2025

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Earth Construction: A Comprehensive Guide.** 2. ed. London: Intermediate Technology Publications, 2014.

HUANG, C.-H. et al. **Effect of slag particle size on fracture toughness of concrete.** Applied Sciences, v. 9, n. 4, p. 805, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/4/805>. Acesso em: nov. 2025.

IBIAPINO, R.; BRITO, W.; RIBEIRO, I. **Avaliação da formação de eflorescências em blocos cerâmicos.** In: XIII Congresso Internacional sobre

Patologia e Reabilitação de Estruturas. Crato/CE, 2017.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **2022 Global Status Report for Buildings and Construction.** Paris: IEA, 2022.

JESUS, C. A. G. **Ferro/aço. Agência Nacional de Mineração.** 2011. Disponível em: https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?idbancoarquivoarquivo=3974. Acesso em: mar. 2024.

LATOSINSKI, K.T. **Ativadores alcalinos e a taipa de pilão: Aplicação em solo arenoso,** 2025. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/37023>. Acesso em: dez. 2025.

LONGHI, M. A.; RODRÍGUEZ, E. D.; WALKLEY, B. et al. **Metakaolin-based geopolymers: Relation between formulation, physicochemical properties and efflorescence formation.** Composites Part B: Engineering, v. 182, 2020.

MARVILA, T. S.; AZEVEDO, A. R. G.; VIEIRA, C. M. F. **Alkali-activated binders: mechanisms, properties and applications.** Journal of Building Engineering, v. 33, p. 101–116, 2021.

MAURÍLIO GOMES PIMENTEL et al. **Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil.** Disponível em: https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2017/civil/48_cdedafpdrivsuncc.pdf. Acesso em: dez. 2025.

MEEK, A.; BECKETT, C. T. S.; ELCHALAKANI, M. **Alternative stabilized rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: Durability with and without water repellent.** Constructions and Building Materials, v. 265, p.120629, 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122045>. Acesso em: dez. 2025.

PROVIS, J. L. **Alkali-activated materials. Cement and Concrete Research,** v. 114, p. 40–48, 2018.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (Eds.). **Alkali-Activated Materials: State-of-the-Art Report.** RILEM TC 224-AAM. Dordrecht: Springer, 2014.

PUERTAS, F.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. **Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes.** Cement and Concrete Composites, v. 25, p. 287–292, 2003.

RUAN, S. et al. **Effects of fineness and chemical composition of blast furnace slag on properties of alkali-activated binder.** Journal of Materials Research and Technology, v. 8, n. 4, p. 4091–4102, 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31640292/>. Acesso em: nov. 2025.

SCRIVENER, K.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. **Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry.** Cement and Concrete Research, v. 114, p. 2–26, 2018.

SHI, C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. **New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement.** Cement and Concrete Research, v. 41, p. 750–763, 2011.

WANG, S.; XUE, Q.; MA, W.; ZHAO, K.; WU, Z. **Experimental study on mechanical properties of fiber-reinforced and geopolymers-stabilized clay soil,** Construction and Building Materials, v. 272, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121914>. Acesso em: dez. 2025.

ZHANG, Z.; PROVIS, J. L.; MA, X. et al. **Efflorescence and subflorescence induced microstructural and mechanical evolution in fly ash-based geopolymers.** Cement and Concrete Composites, v. 92, p. 165–177, 2018.

ZHOU, S. et al. **Relationship between moisture transportation, efflorescence and structure degradation in fly ash/slag geopolymers.** Materials, v. 13, 2020.