ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Eflorescências em solo álcali-ativado: ferramentas digitais para avaliação

Efflorescence in alkali-activated soil: evaluation methodology

Aline Ferreira Gisoato
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul | Campo Grande | Brasil | aline.gisoato@ufms.br
Andrea Naguisse Yuba
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul | Campo Grande | Brasil | naguissa@gmail.com
Karina Trevisan Latosinski
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul | Campo Grande | Brasil | karina.latosinski@ufms.br

Resumo

O uso de soluções alcalinas fortemente concentradas para ativação de precursores, em substituição ao cimento Portland, pode provocar a formação de eflorescências nas superfícies. No caso de misturas álcali-ativadas de solo para aplicação em paredes de taipa de pilão ou blocos compactados de terra (BTC), essa patologia pode comprometer visualmente os elementos, principalmente porque não necessitam de outros acabamentos (reboco, pintura, revestimentos). A partir dessa questão, estabeleceu-se como objetivo deste trabalho elaborar um procedimento de avaliação da formação de eflorescências em misturas álcali-ativadas de terra com o auxílio de softwares. As etapas envolveram: definição dos traços avaliados, moldagem de corpos de prova, fotografia das amostras, processamento em diferentes softwares e análise de dados. O procedimento se mostrou eficaz para a quantificação e monitoramento da patologia considerando as dosagens de ativadores.

Palavras-chave: Ativação alcalina. Eflorescência. Arquitetura de terra. *Software*.

Abstract

The use of highly concentrated alkaline solutions to replace Portland cement can lead to the formation of efflorescence on surfaces. In the case of alkali-activated mixtures in soil for application to rammed earth walls or compacted earth blocks (BTC), this pathology can visually compromise the elements, especially since they do not require other finishings (plastering, painting, coatings). The aim of this study was to develop a methodology for assessing the formation of efflorescence in alkali-activated earth mixtures using software. The steps involved: definition of the evaluated composition, molding samples, photographing the pieces, processing them in different software programs and analyzing the data. The procedure was shown to be effective for quantifying and monitoring pathology by activator dosages.

Keywords: Alkaline activation. Efflorescence. Earth architecture. Software.

Como citar:
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.

INTRODUÇÃO

Técnicas construtivas com terra têm se popularizado como alternativas potencialmente mais sustentáveis na construção civil, já que exigem pouca ou nenhuma quantidade de estabilizantes. Buscando-se eliminar o uso do cimento Portland, baixas concentrações de ativadores fortemente alcalinos podem incrementar o ganho de resistência mecânica em misturas com presença de aluminossilicatos, caracterizando os ligantes geopoliméricos definidos inicialmente por Davidovits [1]. Entretanto, o ajuste dessas concentrações é complexo e várias questões podem contribuir para a formação de eflorescências chegando até mesmo à degradação das amostras [2].

As eflorescências são depósitos cristalinos de cor esbranquiçada que surgem nas superfícies provocadas por reações químicas entre os componentes. Dos fatores que mais influenciam essa formação, que pode ser considerada uma patologia, estão: a presença de sais solúveis e a presença de água e pressão hidrostática necessária para que a solução migre até a superfície possibilitando a evaporação [3]. Ainda que inofensivas, em geral podendo ser removidas, as eflorescências podem alterar a aparência da superfície em que se depositam. Em determinados casos os sais constituintes podem ser agressivos e, quanto mais tempo a solução salina permanece nos poros, maior é o dano que podem sofrer os materiais de construção [4].

Para Longhi [5], a estrutura porosa do geopolímero e os teores de ativação são os fatores que mais influenciam a formação de eflorescências, sendo que, apesar de apresentar uma relação direta com a quantidade de sódio lixiviado, essa formação não pode ser diretamente relacionada com a resistência à compressão. No experimento de Lermen et al. [6], a formação de eflorescências em geopolímeros não apresentou um comportamento linear e, quanto maior a diluição do ativador, maior a área superficial de eflorescência identificada em misturas com metacaulim. Neste estudo do autor, a menor resistência mecânica corresponde à maior formação de eflorescência, apesar do tempo de cura ter sido mais determinante na questão mecânica do que o teor de água da mistura. Já o trabalho de Silva et al. [7] avaliou precursores de alto teor de Fe, como o rejeito de lavagem da bauxita, identificando por espectroscopia no infravermelho (FTIR) bandas associadas ao fenômeno da eflorescência mais expressivamente na amostra que obteve maior resistência mecânica e correspondente à maior concentração de ativador – 10 M de NaOH e Na_2SiO_3. Desse modo, na literatura são encontradas diversas relações, pois há grande variação entre o tipo e concentração de ativadores e precursores nos experimentos com geopolímeros.

Considerando a frequência que tal fenômeno acontece e a possibilidade de aplicação dos geopolímeros para construções com terra, o presente trabalho buscou testar como precursor o solo proveniente do município de Campo Grande/MS em misturas álcali-ativadas de baixas concentrações de ativadores. Essa avaliação se deu quanto ao desempenho mecânico e a potencialidade de aplicação de softwares para o monitoramento da formação de eflorescências.

MATERIAIS E MÉTODO

A pesquisa pode ser caracterizada como experimental, entretanto o trabalho parte de uma organização geral classificada em: revisão de literatura, caracterização dos materiais empregados, procedimentos experimentais e avaliação/discussão dos resultados.

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O solo usado neste estudo foi retirado de jazida comercial no município de Campo Grande/MS e caracterizado no Laboratório de Transportes da UFMS, LATRAN – Tabela 1. Conforme ABNT NBR 17014:2022 [8], mostra-se adequado para a aplicação em paredes de taipa de pilão.

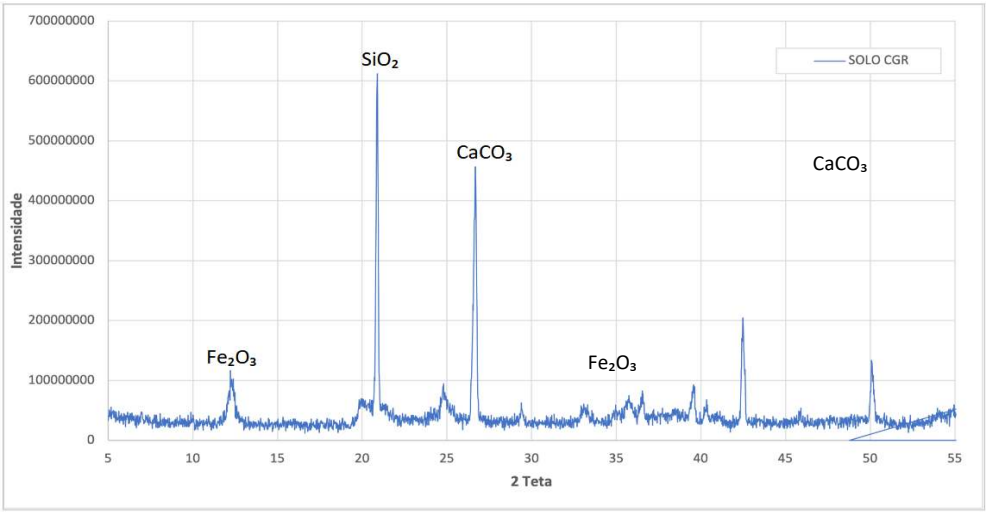
Tabela 1: Caracterização do latossolo vermelho de Campo Grande/MS

Descrição	Resultado	Referência
Massa específica	2,741 g/m3	NBR 6458:2017 [9]
Classificação granulométrica	Areia 83,64%; Silte 4,36%; Argila 12,0%	NBR 6502:1995 [10]
Limite de liquidez	18%	NBR 6459:2017 [11]
Limite de plasticidade	Não plástico	NBR 7180:2016 [12]

Fonte: os autores

A análise por difração de raios X foi realizada com o Difratômetro Bruker D8 Discover, radiação Cu-K_{β}, faixa de varredura de 5 a 60o, passo angular de 0,02 s, tempo de varredura por passo de 0,5 s. Partindo do uso do software *X'pert HighScore*, o difratograma é apresentado na Figura 1. De acordo com as fichas catalográficas, em maior intensidade foram identificados picos cristalinos de Quartzo – SiO_2, Hematita – Fe_2O_3 e Calcita – $CaCO_3$.

Figura 1: Difratograma do solo de Campo Grande empregado neste estudo.



Fonte: os autores.

Os ativadores empregados nas misturas, de forma simples e combinada, foram hidróxido de sódio, NaOH, e cal hidratada, $Ca(OH)_2$, escolhas justificadas pela

facilidade de acesso e baixo custo. O hidróxido de sódio na forma de lascas com 99% de pureza e a cal hidratada do tipo CH-III, de marca comercial CEM.

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Essa fase foi organizada em duas etapas gerais (1 e 2) entremeadas por uma análise visual/perceptiva do fenômeno da eflorescência, descritas como: 1 – determinação das misturas, elaboração dos corpos de prova e avaliação do desempenho mecânico; e 2 – registro do fenômeno e análise por *softwares*. Tais etapas são descritas no Quadro 1.

Quadro 1: procedimentos metodológicos adotados no estudo

ETAPA 1		ETAPA 2
– Moldagem das dosagens com mistura simples (Na_{10} e Ca_{10}) e combinadas (Na_3Ca_{10}, Na_5Ca_{10}, Na_5Ca_7) de ativadores alcalinos e amostra referência (REF); – Cura em temperatura ambiente controlada entre 25 e 30°C (recinto fechado); – Avaliação da resistência à compressão simples em 7 e 21 dias.	**ANÁLISE VISUAL/PERCEPTIVA**	– Registro fotográfico por dispositivo móvel e microscópico zoom usb; – Aplicação dos softwares RStudio e OpenCV Python, para acompanhamento do fenômeno; – Correlação com imagem e composição química obtidas em análise por MEV.

Fonte: os autores.

Na etapa 1, as amostras foram elaboradas manualmente seguindo a sequência de mistura: solo, adição de cal, adição de água com/sem hidróxido de sódio – Tabela 2. Os percentuais de água foram variados em função da verificação no "teste de bola" [9], amplamente utilizado na execução da arquitetura de terra. Os percentuais de ativadores escolhidos para este estudo compõem uma malha experimental mais ampla e foram elencados considerando a padronização dos percentuais de ativadores e os mais altos valores de resistência mecânica obtidos anteriormente.

Tabela 2: Dosagens avaliadas na pesquisa

Identificação	Ativador – percentual	Água – percentual
REF	Nenhum	5,5
Ca10	Ca(OH)2 – 10%	7,0
Na10	Na(OH)2 – 10%	8,0
N3C10	NaOH – 3% + Ca(OH)2 – 10%	9,0
N5C10	NaOH – 5% + Ca(OH)2 – 10%	8,5
N5C7	NaOH – 5% + Ca(OH)2 – 7%	7,0

Fonte: os autores.

Foram utilizados moldes cilíndricos 5x10cm - usualmente empregados na avaliação de argamassas - e a fabricação dos corpos de prova (CP) foi realizada com o preenchimento em 3 camadas, sendo cada camada compactada com compactador metálico e mesmo número de golpes (26), semelhante ao procedimento do teste de Proctor. Esses CPs foram identificados conforme a relação: elemento químico do ativador seguido do seu percentual em relação à massa total de solo utilizado.

Para cada dosagem, 9 CPs foram elaborados, 3 deles rompidos na idade de 7 dias e 3 na idade de 21 dias. A avaliação à compressão foi realizada com dados obtidos em prensa hidráulica normalizada com velocidade de 0,05 KN/s e avaliação estatística considerando a variância da amostra e relações entre o teor e tipo de ativador

utilizado. Para essa avaliação foi utilizado o *software* Jamovi. Na análise visual/perceptiva ponderaram-se dois critérios: valor de resistência mecânica obtido e maior proporção de manchas esbranquiçadas nas superfícies dos CPs (avaliação parcialmente subjetiva).

Na etapa 2, novas amostras foram moldadas com igual procedimento, mas apenas com a dosagem com melhor avaliação na análise anterior. As amostras foram inicialmente fotografadas por dispositivo móvel e posteriormente fotografadas com Microscópio Zoom 1600x Cam 2.0 Mp Profissional Digital Usb aos 7, 14, 21 e 60 dias, com a mesma escala para as duas imagens (topo e lateral). Para análise quanto à formação de eflorescências foram utilizados os *softwares RStudio, Python e Photoshop: filtro P&B*. Assim, foram identificados a quantidade de pixels brancos e pretos presentes nas superfícies registradas. Considerando que cada célula dessa imagem é um pixel, foi atribuído 0 para preto e 255 para branco, extraindo a quantidade numérica e o histograma de cada um. A posição escolhida para o registro foi no topo e na lateral dos CPs, de maneira idêntica.

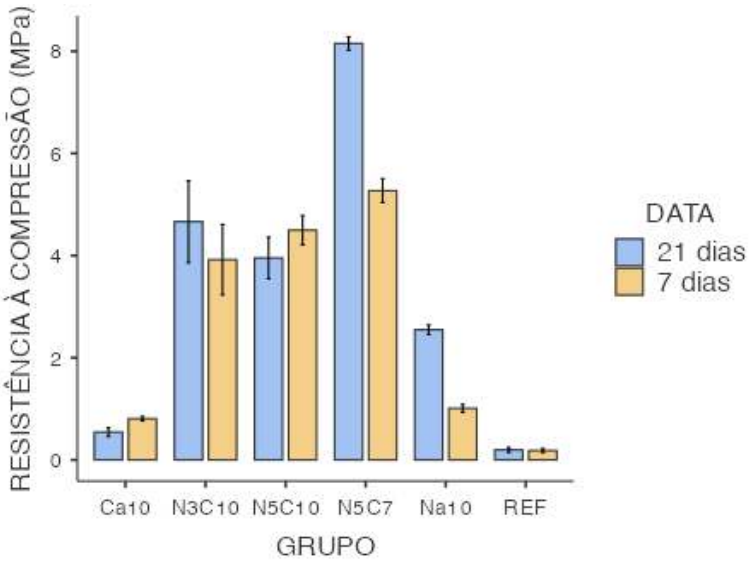
Considerando os valores obtidos, foi realizada avaliação estatística dos dados sobre pixels para indicar se a avaliação é significativa (etapa C). Ainda, foram utilizadas imagens e composição química obtidas em análise morfológica por microscópio eletrônico de varredura (MEV-SEM/EDS) da amostra Na_5Ca_7 aos 21 dias para correlações aos resultados. O microscópio utilizado, disponível em SEMAT/UMINHO, possui ultra alta resolução NOVA 200 Nano SEM, FEI Company, com aceleração de voltagem de 10KV e as amostras foram metalizadas em ouro.

RESULTADOS

DESEMPENHO MECÂNICO

Os dados coletados em relação à resistência à compressão simples aos 7 e 21 dias são identificados na Figura 2.

Figura 2: Avaliação descritiva de resistência à compressão realizada no software Jamovi



Fonte: os autores.

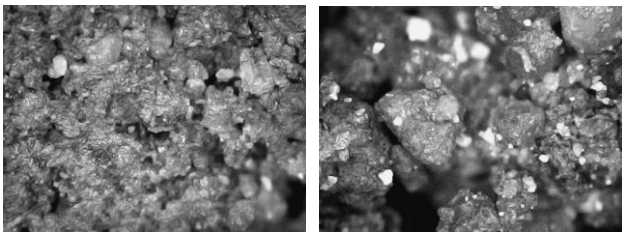
Pelas dosagens avaliadas, é representado incremento significativo apenas na amostra N_5C_7, apesar da amostra Na_{10} estar muito próxima da significância em relação às duas datas de rompimento. Quanto ao uso de ativador aos 7 e 21 dias, o uso combinado foi mais significativo que o uso simples dos hidróxidos na avaliação da resistência à compressão.

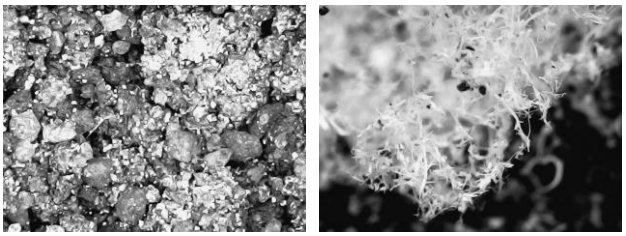
MONITORAMENTO DE FORMAÇÃO DE EFLORESCÊNCIAS

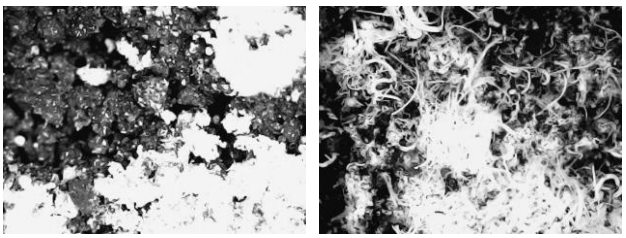
a) Registro das imagens

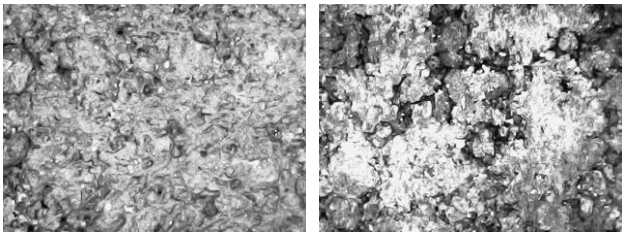
As imagens foram agrupadas conforme as datas de registro, mostrando o crescimento dos produtos de hidratação e consequentemente a formação de sais. A figura 3 representa tal sequência, de modo que claramente até os 21 dias a formação é crescente e filamentosa – possivelmente pela intensidade da reação, e aos 80 dias o aspecto esbranquiçado se parece com uma névoa.

Figura 3: Imagem microscópica das eflorescências formadas nos corpos de prova, sendo topo (direita) e lateral (esquerda).


CP referência


14 dias


21 dias


60 dias

Fonte: os autores.

b) Análise dos pixels

As imagens foram analisadas em dois softwares: RStudio e OpenCV. O primeiro é uma IDE (ambiente de desenvolvimento integrado) de código aberto (R) e o segundo é uma biblioteca de programação, de código aberto (Python). Para as análises das imagens, foram fornecidas as quantidades de pixels brancos e pretos presentes, tanto na avaliação micro quanto macro. Cada célula dessa imagem é um pixel, sendo atribuídos valores para "pontos" pretos e brancos.

Tabela 3: Tabela comparativa de pixels em R e Python.

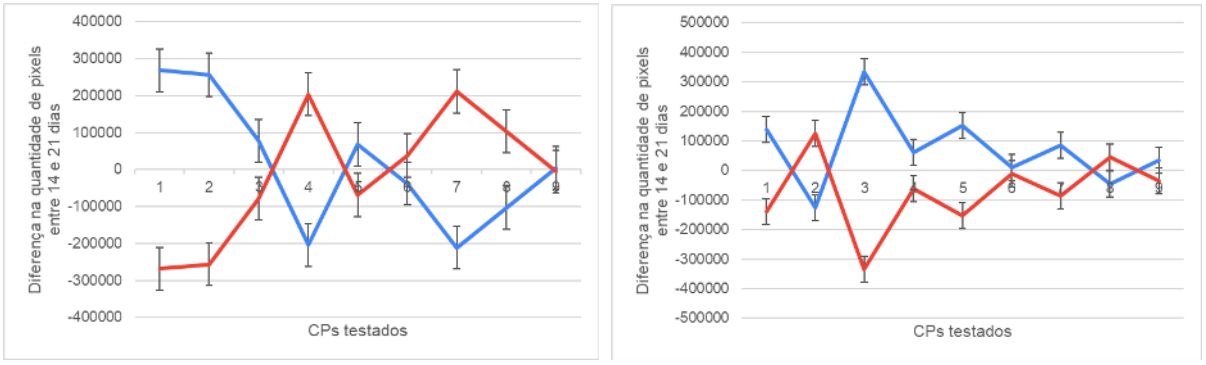
Identificação	Qtd pixels pretos (<=127) (RStudio – OpenCV)	Qtd pixels brancos (>127) (RStudio – OpenCV)	Percentuais (%)
Referência	602001 – 602001	319599 – 319599	53
14 dias	393648 – 393648	527952 – 527952	134
21 dias	435657 – 435657	485343 – 485343	111
80 dias	350466 – 350466	571134 – 571134	163

Fonte: o autor.

Ambos os softwares, para o mesmo parâmetro adotado, resultaram na mesma contagem, confirmando o aumento de pixels brancos nas imagens analisadas.

c) Análise gráfica da variação de pixels entre 14 e 21 dias nas faces base e lateral
Considerando que as formações mais intensas se deram nas datas de 14 e 21 dias, foram analisadas graficamente as quantidades de pixels nessas idades e observou-se que na face lateral as formações diferem de uma distribuição normal das médias entre as amostras (figura 4), enquanto as imagens capturadas na base têm uma aproximação maior.

Figura 4: Avaliação da variação dos pixels na face lateral (gráfico à esquerda) e na base (gráfico à direita) dos CPs



Nota: Pixels brancos (linha azul), pixels pretos (linha vermelha). Fonte: os autores.

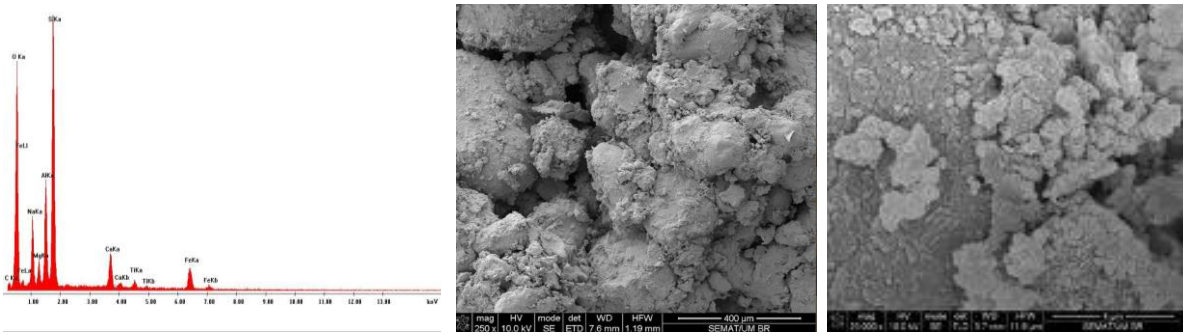
Pode-se observar que a avaliação capturada na base mostra que as variações foram concordantes, enquanto as da lateral não apresentaram o mesmo padrão. Assim, pode ser identificado um local mais adequado para esse tipo de captura superficial.

d) avaliação por MEV (SEM/EDS)

As imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura possibilitam uma caracterização morfológica, portanto interna das amostras, já que as capturas das fases anteriores são superficiais. Foi indicada, em média, a presença de 2,2% de Ca e

6% de Na, mostrando que nos locais visualizados, parte dos ativadores não estava presente e/ou tinham sido consumidos. Na ampliação (4micrômetros), identificam-se formações arredondadas e forte presença do elemento Si.

Figura 5: MEV - composição química (à esquerda); aspecto geral com 400 microm.(ao centro); ampliação com 4 microm.(à direita)



Fonte: os autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização desse estudo experimental indica que há viabilidade no uso do solo do município de Campo Grande/MS como precursor para uso simples e combinado de ativadores alcalinos. Desse modo, os resultados da avaliação quanto à resistência mecânica são satisfatórios. Em especial, a avaliação por imagem em pixels somente foi possível devido a coloração intensa do solo empregado e o contraste gerado, não sendo válida para solos esbranquiçados.

Quanto à ferramenta de avaliação da formação de eflorescências, a captura de imagens por microscópio óptico portátil foi bastante simples, bem como o processamento das imagens nos dois softwares. Entretanto, a avaliação realizada demonstrou que a posição de fotografia determina intensa variação dos resultados, fato que se associa fortemente ao movimento interno da água disponível nos CPs. Ainda, ao monitorar as amostras em datas variadas foi possível perceber que as datas iniciais apresentam grande formação de eflorescências e, para trabalhos futuros, o monitoramento nos primeiros 7 dias é extremamente importante.

Mesmo que os pixels brancos possam também representar grãos de componentes que não reagiram totalmente na mistura, o que se tenta rejeitar com a análise de microscopia eletrônica de varredura, os métodos por imagem podem representar parcialmente os fenômenos. Logo, entende-se que a ferramenta necessita de avaliações conjuntas na tentativa de explicar ações químicas e físicas que ocorrem nas amostras.

REFERÊNCIAS

[1] DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemestry and properties.** Proceedings of 88 Geopolymer Conference, p. 25-48.

[2] DIAS, N. **Geopolímeros: Contributos para a redução das eflorescências**. 2012. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Guimarães, 2012.

[3] IBIAPINO, R.; BRITO, W.; RIBEIRO, I. **Avaliação da formação de eflorescencias em blocos cerâmicos.** In: XIII Congresso Internacional sobre Patologia e reabilitação de estruturas. Crato/CE, 2027.

[4] FERNANDES, P. Estudo **sobre a influência do massará no processo de formação de salitre em rebocos na região de Teresina - PI, 2010**. Dissertação (Mestrado de Engenharia e em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/12704. Acesso em: 30 abr 2024.

[5] LONGHI, M. **Eflorescência em geopolímeros à base de metacaulim: formação, efeitos e mitigação**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em engenharia civil: construção e infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

[6] LERMEN, R.; REMONTTI, T.; SILVA R. **Influência da quantidade de água na formação de eflorescência em geopolímeros a base de mataculim**. Matéria, Rio de Janeiro, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0120

[7] SILVA, M.; RACANELLI, L.; SOUZA, J.; QUARESMA, J. CORREA, M. **Estudo do desempenho mecânico de geopolímero produzido com alto teor de ferro.** Matéria, Rio de Janeiro, 2023. DOI: http://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0309.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17014. Taipa de pilão: requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro, 2022.

[9] NEVES, C.; FARIA, O.; ROTONDARO, R.; CEVALLOS, P.; HOFFMAN, M. Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra: práticas de campo. Proterra, 2010. Disponível em: htt://www.redeproterra.org