XV SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas
Porto Alegre/RS - 11 a 13 de junho de 2025

EFEITO DO TEMPO DE CURA E DA FORMAÇÃO DE EFLORESCÊNCIA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS

Effect of curing time and efflorescence formation on the compressive strength of geopolymeric mortars

ALLAN GUIMARÃES BORÇATO[1,2], LUIZ FERNANDO Z. TRENTIN[3], ALANA RÚBIA FARIAS[4], JULIANA M. CASALI[5], ANDREA M. BETIOLI[6], RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR[7]

[1] Prof. Me., Instituto Federal de Santa Catarina, allan.borcato@ifsc.edu.br
[2] Doutorando, Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná
[3] Discente, Instituto Federal de Santa Catarina, luiz.fzt@aluno.ifsc.edu.br
[4] Discente, Instituto Federal de Santa Catarina, alana.rf@aluno.ifsc.edu.br
[5] Profa. Dra., Instituto Federal de Santa Catarina, juliana.casali@ifsc.edu.br
[6] Profa. Dra., Instituto Federal de Santa Catarina, andrea.betioli@ifsc.edu.br
[7] Prof. Dr., Universidade Federal do Paraná, medeirosjunior.ufpr@gmail.com

RESUMO

Este estudo avaliou o efeito do tempo de cura e da formação de eflorescências na resistência à compressão de argamassas geopoliméricas. Resíduo de tijolo cerâmico foi utilizado como precursor. Diferentes teores de hidróxido de cálcio foram avaliados. As argamassas foram curadas por 7 e 28 dias. Posteriormente, foram submetidas a um ensaio de formação de eflorescência até a idade de 365 dias. Os resultados mostraram que o teor de hidróxido de cálcio influenciou significativamente a resistência à compressão. Por outro lado, os tempos de cura avaliados apresentaram resultados similares. Assim, este estudo permite aprimorar o desenvolvimento de argamassas geopoliméricas sustentáveis.

Palavras-chave: Argamassa. Geopolímero. Resíduo. Cura. Eflorescência.

ABSTRACT

This study evaluated the effect of curing time and efflorescence formation on the compressive strength of geopolymer mortars. Ceramic brick waste was used as precursor. Different contents of calcium hydroxide were evaluated. The mortars were cured for 7 and 28 days. Subsequently, the mortar was submitted to an efflorescence formation test up to the age of 365 days. The results showed that the calcium hydroxide content significantly influenced the compressive strength. On the other hand, the curing times evaluated showed similar results. Thus, this study allows the enhancement of the development of sustainable geopolymer mortars.

Key-words: Mortar. Geopolymer. Waste. Curing. Efflorescence.

Como citar:
BORÇATO, A. G., TRENTIN, L. F. Z., FARIAS, A. R., CASALI, J. M., BETIOLI, A. M., MEDEIROS JUNIOR, R. A. E. Efeito do tempo de cura e da formação de eflorescência na resistência à compressão de argamassas geopoliméricas. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2025, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2025.

INTRODUÇÃO

Os materiais geopoliméricos são formados a partir da reação de um precursor aluminossilicatos com uma solução ativadora alcalina. Esses materiais possuem diversas características vantajosas quando comparados aos materiais cimentícios convencionais, sendo a baixa emissão de CO_2 uma das principais vantagens [1]. No entanto, a suscetibilidade à eflorescência representa um desafio significativo para sua aplicação em construções e obras de engenharia civil [2]. A eflorescência em geopolímeros é uma patologia que é objeto de estudo de diversos pesquisadores, devido às suas implicações nas propriedades mecânicas e na durabilidade desses materiais.

A eflorescência de geopolímeros é um fenômeno que ocorre devido ao movimento de álcalis livres através da rede de poros até a superfície [3]. A pressão capilar induz o transporte de água e o movimento alcalino por meio de processos difusos e convectivos, sendo este último acelerado quando o material é exposto a ciclos de umedecimento e secagem [4]. O álcali em excesso, lixiviado para a superfície do material em um ambiente úmido, que sob certas condições de umidade, reage com o dióxido de carbono atmosférico para formar produtos na forma de um precipitado branco [5]. Quando os ativadores alcalinos são à base de sódio, os principais produtos da eflorescência são os carbonatos de sódio nas formas hidratada ou anidra, que se formam na superfície em diferentes formas e tamanhos [6].

Além de ser um problema estético, a eflorescência excessiva em geopolímeros pode reduzir sua durabilidade, devido à redução da resistência à compressão e à tração [5,7]. A redução da resistência à compressão e à tração pode ser explicada pelo fenômeno de subflorescência, que pode ser considerado como uma eflorescência estendida ocorrendo sob a superfície do material, levando à pressão de cristalização, a qual pode exceder a resistência à tração dos ligantes endurecidos e gerar danos estruturais [4]. Portanto, compreender os mecanismos subjacentes à formação de eflorescência em geopolímeros é essencial para desenvolver materiais mais duráveis e eficazes.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da adição de hidróxido de cálcio e do tempo de cura na resistência à compressão de argamassas geopoliméricas sustentáveis produzidas com resíduo de tijolo cerâmico como único precursor. Além disso, foi avaliada a correlação entre o ensaio de resistência à compressão e a velocidade de pulso ultrassônico, que é um método de ensaio não destrutivo.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

MATERIAIS E DOSAGEM DAS ARGAMASSAS

O resíduo de blocos cerâmicos de vedação (RC) foi obtido a partir de blocos cerâmicos descartados por uma indústria localizada no Oeste do Estado de Santa Catarina (SC). O RC foi submetido a um processo de moagem em um moinho de bolas de porcelana. Após o processo de moagem, o material foi então peneirado em uma peneira com abertura de malha de 150 µm e a fração passante foi coletada e utilizada para a produção do ligante geopolimérico. O RC foi o único precursor utilizado para o desenvolvimento do ligante geopolimérico. Hidróxido de sódio (HS) e silicato de sódio (SS) foram utilizados como ativadores alcalinos. O HS foi

dissolvido em água e posteriormente misturado com o SS. A solução resultante foi mantida em repouso em temperatura ambiente por 24 horas. Hidróxido de cálcio (HC) foi utilizado como adição mineral para melhorar as propriedades mecânicas do ligante geopolimérico. Areia natural foi utilizada como agregado para a produção das argamassas geopoliméricas. A areia possui granulometria inferior a 1,2 mm. Uma relação em massa de 1:1 (ligante geopolimérico: areia) foi utilizada para a produção das argamassas. A dosagem dos traços de argamassas (Tabela 1) foi desenvolvida a partir de estudos prévios [8,9].

Tabela 1 – Dosagem das argamassas geopoliméricas.

ID	RC (kg)	SS (kg)	HS (kg)	HC (kg)	Água (kg)	Areia (kg)	Água/ligante
A05	100	62,9	9,5	5,0	24,8	202,2	0,42
A10	100	62,9	9,5	10,0	24,8	207,2	0,40
A15	100	62,9	9,5	15,0	24,8	212,2	0,38
A20	100	62,9	9,5	20,0	24,8	217,2	0,36

Fonte: Os autores (2025).

A etapa de preparação das argamassas geopoliméricas consistiu inicialmente na mistura do precursor com a solução ativadora em uma argamassadeira por 2 min. Após isso, a areia foi adicionada e o material resultante foi misturado por mais 2 min. As argamassas produzidas foram moldadas em moldes cúbicos (50 x 50 x 50 mm). Os moldes foram selados com filme de PVC para uma cura inicial por 24 horas em temperatura ambiente (23 ± 2 °C). Após 24 horas, os corpos de prova foram removidos dos moldes e foram totalmente selados com filme de PVC e armazenados em temperatura ambiente (23 ± 2 °C) por 7, 28 e 365 dias.

Três condições de exposição para formação de eflorescência foram avaliadas em cada traço desenvolvido (Tabela 1). A condição de referência (REF) consistia em uma cura contínua por 365 dias. Nesta condição, não houve a formação de eflorescência nas argamassas geopoliméricas. As duas demais condições, denominadas de Cura 7d e Cura 28d, consistiam na formação de eflorescência após um período de cura inicial de 7 e 28 dias, respectivamente.

ENSAIOS REALIZADOS

Após o tempo de cura inicial de 7 ou 28 dias, o filme de polipropileno foi removido e os corpos de prova foram então parcialmente imersos em água (20 ± 5 °C) a uma profundidade de aproximadamente 15 mm até a idade de 365 dias. O ensaio de formação de eflorescência foi realizado conforme a metodologia reportada na literatura sobre o tema [3,8,10]. A água do ensaio de formação de eflorescência foi reposta regularmente devido à evaporação e absorção de água pelos corpos de prova. Isso foi necessário para manter constante a profundidade de imersão dos corpos de prova. Além disso, a cada 60 dias, os sais formados na eflorescência foram retirados e a água utilizada foi totalmente trocada para evitar o acúmulo de materiais lixiviados pelos corpos de prova.

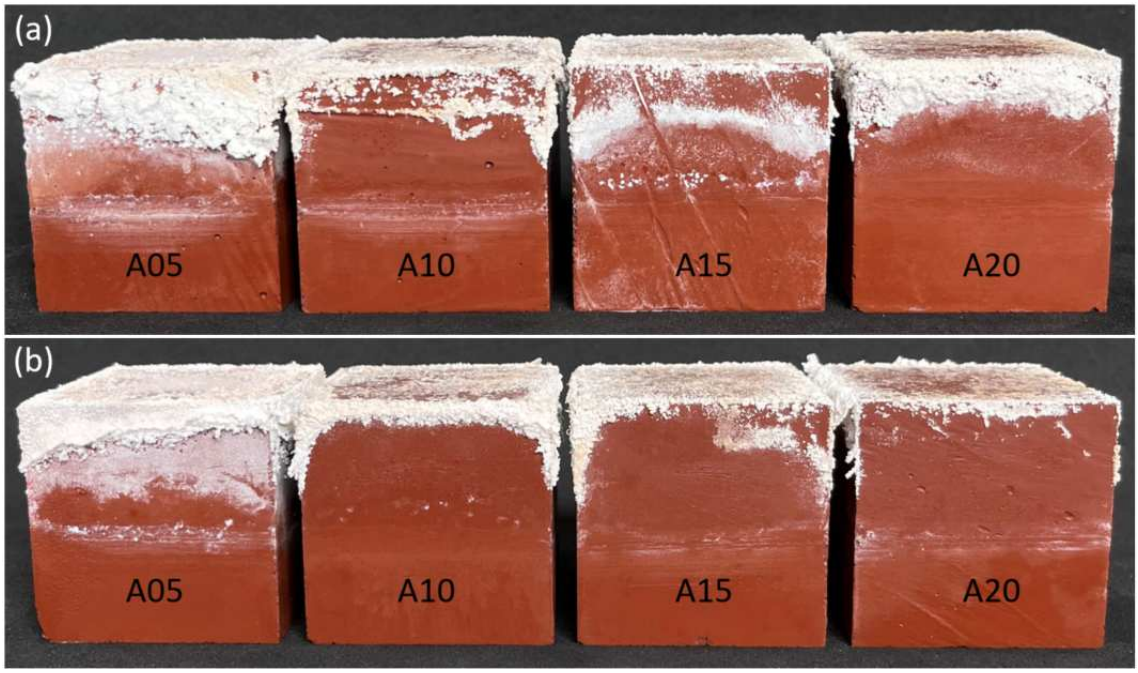
Aos 365 dias de idade, o ensaio de formação de eflorescência foi finalizado e a resistência à compressão dos corpos de prova foi determinada conforme a ASTM C109 [11] em uma prensa hidráulica equipada com uma célula de carga com capacidade de 300 kN. A resistência à compressão foi definida como a média de três corpos de prova para cada condição de

exposição (REF, Cura 7d e Cura 28d) em cada traço (Tabela 1). Antes do rompimento dos corpos de prova no ensaio de resistência à compressão, os espécimes foram submetidos ao ensaio de velocidade de pulso ultrassônico conforme a ABNT NBR 8802 [12]. Foram utilizados transdutores de 50 mm de diâmetro configurados para uma frequência de transmissão e recepção de 82 kHz. O resultado final do ensaio de determinação da velocidade de pulso ultrassônico foi a média de nove medições (três repetições em três corpos de prova) para cada condição de exposição (REF, Cura 7d e Cura 28d) em cada traço (Tabela 1). Os resultados dos ensaios de resistência à compressão foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância e teste de Tukey, considerando um nível de significância de 5%.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A Figura 1 apresenta a análise visual das argamassas geopoliméricas aos 365 dias. A análise visual comprovou a formação de eflorescência em todos os traços desenvolvidos (Tabela 1).

Figura 1 – Análise visual dos corpos de prova após ensaio de eflorescência: (a) 7 dias de cura; (b) 28 dias de cura.



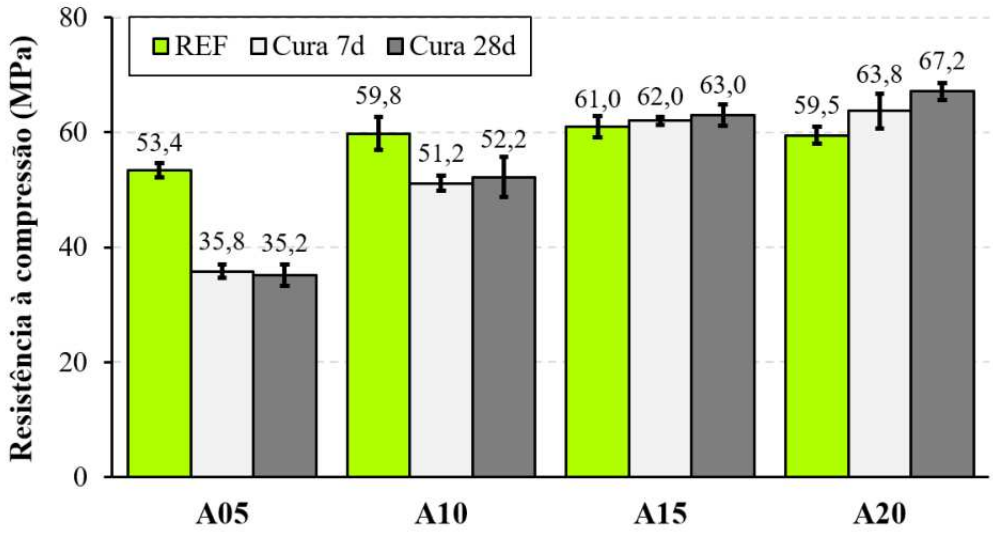
Fonte: Os autores (2025).

Por outro lado, a análise visual (Figura 1) também indicou que a formação de eflorescência foi reduzida quando houve aumento do teor de adição de hidróxido de cálcio. A formação de eflorescência provém da mobilidade do excesso de álcali e da consequente cristalização de carbonatos alcalinos. Quando o excesso de álcali é lixiviado para a superfície do material, devido à pressão capilar que induz o transporte de água e o movimento alcalino através de processos difusos e convectivos, ocorre a reação com o dióxido de carbono atmosférico para formar produtos na forma de um precipitado [4, 5, 10]. Dessa forma, a adição de hidróxido de cálcio poderia contribuir para o aumento da eflorescência pela maior quantidade de álcali

disponível. Entretanto, a análise visual (Figura 1) mostrou que ocorreu o efeito oposto, pois o cálcio proveniente do hidróxido de cálcio é incorporado à matriz do ligante, formando géis C-A-S-H, que acabam densificando a matriz e reduzindo a formação de eflorescência [8].

A Figura 2 mostra a resistência à compressão das argamassas geopoliméricas aos 365 dias. Foram identificados dois comportamentos distintos para os traços avaliados em função do teor de adição de hidróxido de cálcio. Para o traço A05, houve uma redução da resistência à compressão de 32,9% e 34,1% para as amostras com 7 e 28 dias de cura, respectivamente, quando comparadas com as amostras de referência (REF). Do mesmo modo, para o traço A10, houve uma redução da resistência à compressão de 14,5% e 12,7% para as amostras com 7 e 28 dias de cura, respectivamente, quando comparadas com as amostras de referência (REF). Por outro lado, os traços A15 e A20 apresentaram aumento da resistência à compressão quando comparadas com as amostras de referência (REF). O traço A15 apresentou um aumento de 1,8% e 3,3% para as amostras com 7 e 28 dias de cura, respectivamente. De modo similar, o traço A15 apresentou um aumento de 7,2% e 12,9% para as amostras com 7 e 28 dias de cura, respectivamente, quando comparadas com as amostras de referência (REF).

Figura 2 – Resistência à compressão das argamassas geopoliméricas aos 365 dias de idade.



Fonte: Os autores (2025)

Além disso, houve um aumento significativo da resistência à compressão quando avaliado o teor de adição de hidróxido de cálcio. Os traços A10, A15 e A20 apresentaram um aumento na resistência à compressão de 42,7%, 73,1% e 77,9% e de 48,4%, 79,0% e 90,9% para as idades de cura de 7 e 28 dias, respectivamente, quando comparadas com as amostras do traço com menor teor de adição de hidróxido de cálcio (A05). Este comportamento evidenciou que a adição de hidróxido de cálcio foi fundamental para aumentar a resistência à compressão sob a condição de formação de eflorescência, permitindo até superar a resistência à compressão das amostras de referência para os traços A15 e A20.

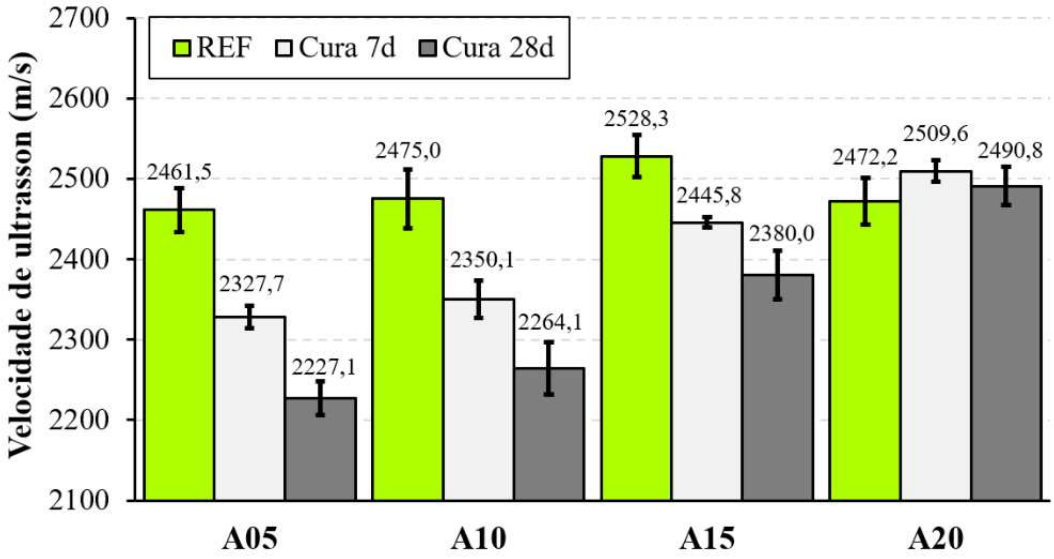
A análise estatística mostrou que o teor de adição de hidróxido e a condição de exposição influenciaram significativamente a resistência à compressão. Entre os teores de adição de

hidróxido de cálcio, a análise estática mostrou que não houve variação significativa entre 15% e 20%. Assim, os melhores resultados são alcançados com teores de 15%. Além disso, não há diferenças significativas entre as amostras curadas por 7 e 28 dias nas condições de exposição analisadas. Por outro lado, há diferença significativa entre as amostras curadas por 7 dias e as amostras de referência (REF). Dessa forma, tem-se que a cura por 28 dias permitiu que os traços apresentassem desempenho semelhante ao da condição de referência (REF). Este comportamento identificado na resistência à compressão das amostras está relacionado à formação dos géis na matriz dos geopolímeros [13]. A incorporação de hidróxido de cálcio aumenta as propriedades mecânicas dos geopolímeros devido à densificação causada pela coexistência de géis N-A-S-H e C-A-S-H na matriz dos geopolímeros [14,15].

Dessa forma, como durante todo o período do ensaio de formação de eflorescência, as amostras permaneceram saturadas com água devido à absorção capilar, pode ter ocorrido uma maior formação de géis C-A-S-H na matriz do ligante geopolimérico. Isso pode explicar uma maior resistência à compressão para a condição de exposição com formação de eflorescência (Cura 7d e Cura 28d), quando comparadas à condição de referência (REF), para as amostras com maiores teores de incorporação de hidróxido de cálcio (A15 e A20). Por outro lado, a redução acentuada na resistência à compressão dos traços com baixos teores de adição de hidróxido de cálcio (5% e 10%) também pode estar associada à maior formação de eflorescência, conforme identificado na análise visual (Figura 1). Como há maior formação de eflorescência, há também maior formação de subflorescência. Esse fenômeno pode ser definido como a eflorescência estendida que ocorre sob a superfície do material, gerando pressão de cristalização [4], que pode exceder a resistência à tração dos ligantes endurecidos e causar danos estruturais à microestrutura do material.

A Figura 3 mostra a velocidade de ultrassom das argamassas geopoliméricas aos 365 dias. Como a velocidade de pulso ultrassônico (VPU) é diretamente proporcional à resistência à compressão, tem-se que o comportamento identificado no ensaio de VPU (Figura 3) foi semelhante ao comportamento obtido no ensaio de resistência à compressão (Figura 2). Os menores valores de VPU para cada condição de exposição foram obtidos no traço A05, confirmando a relação direta entre VPU e resistência à compressão, pois no traço A05 também foram obtidos os menores valores de resistência à compressão (Figura 2) para cada condição de exposição. Além disso, as condições de exposição de Cura 7d e Cura 28d apresentaram valores de VPU superiores à condição de referência (REF) no traço A20. Este comportamento também foi identificado na resistência à compressão para o traço A20 (Figura 2). Dessa forma, tem-se que o ensaio de VPU pode ser uma alternativa de ensaio não destrutível para prever o comportamento mecânico das argamassas geopoliméricas.

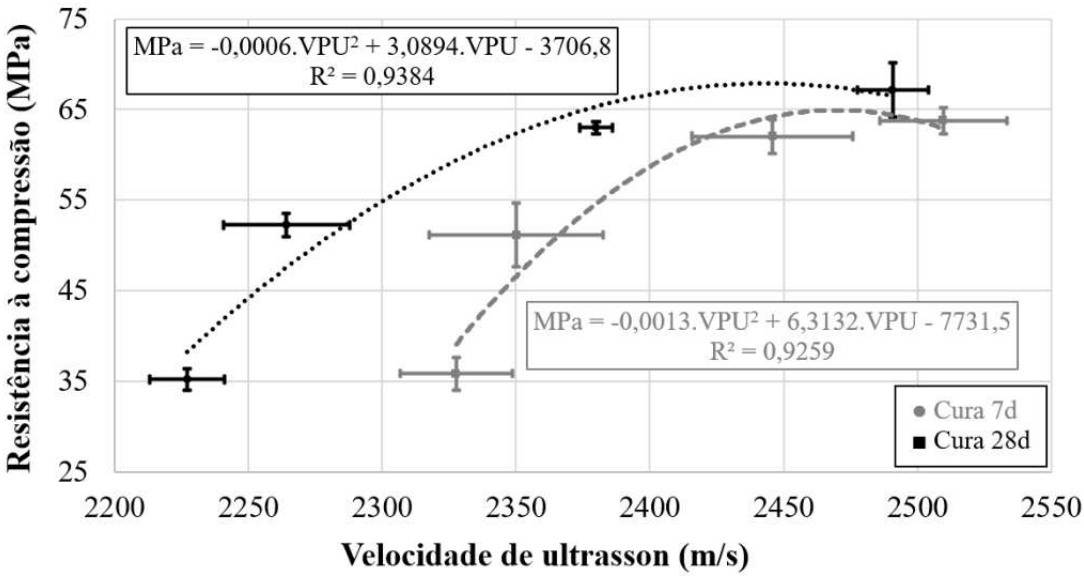
Figura 3 – Velocidade de ultrassom das argamassas geopoliméricas aos 365 dias de idade.



Fonte: Os autores (2025)

A Figura 4 mostra a correlação entre resistência à compressão e velocidade de pulso ultrassônico (VPU) para as condições de exposição com formação de eflorescência. Nota-se que ao considerar regressões quadráticas para a relação entre resistência à compressão e VPU foram obtidas boas correlações, com valores de R^2 de 0,9259 e 0,9384 para as condições de exposição de Cura 7d e Cura 28d, respectivamente. Portanto, o ensaio VPU pode ser uma ferramenta útil para avaliar por meio de correlações a resistência à compressão das argamassas geopoliméricas submetidas à formação de eflorescência.

Figura 4 – Correlação entre resistência à compressão e velocidade de pulso ultrassônico.



Fonte: Os autores (2025)

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados ao longo do programa experimental, pode-se concluir que:

- A adição de hidróxido de cálcio foi fundamental para aumentar a resistência à compressão dos geopolímeros sob formação de eflorescência. Os traços com maiores teores de adição (A10, A15 e A20) apresentaram um aumento significativo na resistência à compressão de 42,7%, 73,1% e 77,9% e 48,4%, 79,0% e 90,9% para as idades de cura de 7 e 28 dias, respectivamente, quando comparados ao traço com menor teor de adição de hidróxido de cálcio (A05).
- Os tempos de cura avaliados (7 e 28 dias) alcançaram valores semelhantes nos resultados de resistência à compressão das argamassas geopoliméricas. Entretanto, a análise estatística mostrou que há diferença significativa entre o tempo de cura de 7 dias e a condição de referência (REF). Dessa forma, conclui-se que a cura por 28 dias é o tempo ideal para que os traços apresentem desempenho semelhante ao da condição de referência.
- Houve uma boa correlação entre o ensaio de medição de velocidade de ultrassom e resistência à compressão dos geopolímeros. Assim, o ensaio de velocidade de ultrassom pode ser uma ferramenta útil para avaliar, por meio de correlações, a resistência à compressão das argamassas geopoliméricas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo apoio na condução deste estudo. Os autores também agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

[1] SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview, **Construction and Building Materials**, v. 237, 117455, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455

[2] LERMEN, R. T.; REMONTTI, T. L.; SILVA, R. A. Influência da quantidade de água na formação de eflorescência em geopolímeros a base de metacaulim, **Matéria**, v. 27, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0120

[3] LONGHI, M. A.; ZHANG, Z.; WALKLEY, B.; RODRÍGUEZ, E. D.; KIRCHHEIM, A. P. Strategies for control and mitigation of efflorescence in metakaolin-based geopolymers, **Cement and Concrete Research**, v. 144, 106431, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106431

[4] ZHANG, Z.; PROVIS, J. L.; MA, X.; REID, A.; Wang, H. Efflorescence and subflorescence induced microstructural and mechanical evolution in fly ash-based geopolymers, **Cement and Concrete Composites**, v. 92, p. 165–177, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.06.010

[5] PASUPATHY, K.; RAMAKRISHNAN, S.; SANJAYAN, J.; Effect of hydrophobic surface-modified fine aggregates on efflorescence control in geopolymer, **Cement and Concrete Composites**, v. 126, 104337, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104337

[6] LONGHI, M. A.; RODRÍGUEZ, E. D.; WALKLEY, B.; ZHANG, Z.; KIRCHHEIM, A. P. Metakaolin-based geopolymers: Relation between formulation, physicochemical properties and efflorescence formation, **Composites Part B: Engineering**, v. 182, 107671, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107671

[7] SIMÃO, L.; FERNANDES, E.; HOTZA, D.; RIBEIRO, M. J.; MONTEDO, O. R. K.; RAUPP-PEREIRA, F. Controlling efflorescence in geopolymers: A new approach, **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, e00740, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00740

[8] BORÇATO, A. G.; THIESEN, M.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Incorporation of clay brick wastes and calcium hydroxide into geopolymers: Compressive strength, microstructure, and efflorescence, **Journal of Building Engineering**, v. 88, 109259, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109259

[9] MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; THIESEN, M.; BETIOLI, A. M.; CASALI, J. M.; TRENTIN, L. F. Z.; FRARE, A.; BORÇATO, A. G. Influence of Precursor Particle Size and Calcium Hydroxide Content on the Development of Clay Brick Waste-Based Geopolymers, **Minerals**, v. 14, 1169, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/min14111169

[10] LONGHI, M. A.; RODRÍGUEZ, E. D.; WALKLEY, B.; ECKHARD, D.; ZHANG, Z.; PROVIS, J. L.; KIRCHHEIM, A. P. Metakaolin-based geopolymers: Efflorescence and its effect on microstructure and mechanical properties, **Ceramics International**, v. 48, p. 2212–2229, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.09.313

[11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C109**. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in [50 mm] cube specimen). West Conshohocken: ASTM, 2020.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

[13] BORÇATO, A. G.; BELTRAME, N. A. M.; OLIVEIRA, T. A.; MEDEIROS-JUNIOR, R.A. Microstructure and mechanical properties of geopolymers with different dolomitic lime contents, **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 18, 2025. DOI: https://doi.org/10.1590/s1983-41952025000100001

[14] YIP, C. K.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation, **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1688–1697, 2005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.042

[15] CHINDAPRASIRT, P.; SILVA, P.; SAGOE-CRENTSIL, K.; HANJITSUWAN, S. Effect of SiO2 and Al2O3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems, **Journal of Materials Science**, v. 47 p. 4876–4883, 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/s10853-012-6353-y