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

DESENVOLVIMENTO DE FORMULAÇÕES DE ARGAMASSAS PARA IMPRESSÃO 3D INCORPORANDO RESÍDUO DE MINERAÇÃO COMO LIGANTE

Development of mortar formulations for 3D printing incorporating mining waste as a binder

GABRIEL COSTA[1], GABRIEL SCHANOVEBER[2], PAULO RICARDO DE MATOS[3]
[1] Doutorando, Universidade do Estado de Santa Catarina/UDESC, comerlatogabriel@gmail.com
[2] Graduando, Universidade do Estado de Santa Catarina/UDESC, doerner2245@hotmail.com
[3] Prof. Dr., Universidade do Estado de Santa Catarina/UDESC, paulo.matos@udesc.br

RESUMO
A impressão 3D de concreto avança globalmente por reduzir mão de obra, desperdício e consumo de materiais. Contudo, as formulações apresentam elevados consumos de ligante (até 1000+ kg/m³). Este trabalho avaliou a incorporação de um resíduo de mineração (RM) como substituição parcial ao cimento Portland em argamassas para impressão 3D. Foram produzidas formulações com 0, 15 e 50% de RM. Avaliaram-se propriedades reológicas e construtibilidade. O aumento do RM elevou o número de camadas imprimíveis, mas 50% de RM resultou em acabamento superficial inadequado. Com 15% de RM, imprimiu-se um cilindro de 1 metro de altura com acabamento superficial adequado.

Palavras-chave: Impressão 3D. Resíduo de mineração. Reologia. Argamassa.

ABSTRACT
3D concrete printing is advancing globally due to its reduction in labor, waste, and material consumption. However, the mixtures typically present high binder contents (over 1000 kg/m³). This study evaluated the incorporation of a mining residue (MR) as a partial replacement for Portland cement in mortars for 3D printing. Mixtures with 0, 15, and 50% MR were produced. Rheological properties and buildability were assessed. Increasing MR content raised the number of printable layers, but 50% MR resulted in poor surface quality. With 15% MR, it was possible to print a one-meter-tall cylindrical element with an adequate surface finish.

Key-words: *3D printing. Mining waste. Rheology. Mortar.*

Como citar:
COSTA, G.; SCHANOVEBER, G.; DE MATOS, P. Desenvolvimento de formulações de argamassas para impressão 3D incorporando resíduo de mineração como ligante. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2025, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2025.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a impressão 3D de compósitos cimentício (3DPC) tem revolucionado as práticas no setor da construção civil. Essa tecnologia inovadora demonstra um significativo potencial para automatizar os processos em canteiros de obras, promovendo diversos avanços em relação às metodologias tradicionais [1][2][3][4]. Além disso, o setor de construção civil aparenta estar defasado em relação à tecnologia e à inovação, especialmente quando comparado a outras indústrias [5].

A 3DCP é uma ferramenta para inovação na construção em que é possível sobrepor camadas de material para produzir elementos tridimensionais. Desta forma, torna-se possível a execução de elementos sem a necessidade de fôrma de madeira, tornando-se uma das suas maiores vantagens [3][6][7][8]. O rápido crescimento deste campo indica que as estruturas de concreto impressas em 3D não são um objetivo distante, mas uma realidade próxima.

Nos últimos anos, a 3DCP, que inicialmente era limitada a laboratórios, tem avançado para aplicações em escala industrial, incluindo a construção de casas, pontes e outros elementos ao redor do mundo [3][9][10][11]. Esse progresso reflete o desenvolvimento de tecnologias e materiais que possibilitam a adoção da impressão 3D na construção civil, oferecendo personalização nas construções.

Entretanto, mesmo com grande avanço tecnológico, grande parte das misturas possuem alto teor de ligante – eventualmente ultrapassando 1000 kg/m³, o que pode inviabilizar economicamente e ambientalmente o uso da tecnologia [12][13][14][15][16]. Desta forma, busca-se ligantes alternativos para substituírem o cimento de forma total ou parcial na aplicação de 3DPC, mantendo características reológicas compatíveis com suas aplicações.

Apesar da literatura existente abordar a utilização de outros materiais nas formulações de 3DPC, a utilização de resíduo de mineração em substituição ao cimento é inovadora no meio da impressão. Este trabalho avaliou o comportamento reológico ao longo do tempo (0, 15 e 30 min), capacidade e qualidade da impressão de argamassas produzidas com resíduo de mineração (RM) como ligante em substituição parcial ao cimento em teores de 15 e 50%.

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS E PROPORCIONAMENTO DAS FORMULAÇÕES

As amostras foram produzidas com a mesma proporção de ligante: materiais inertes. Inicialmente, foi produzido a amostra de referência 0%RM com cimento e sílica ativa como ligantes. A base para as proporções iniciais foram a partir de valores da literatura [17] e tais proporções já foram avaliadas em estudo prévio em trabalhos anteriores [18] e são válidas para o conjunto de bombeamento e impressão adotados na pesquisa. Em seguida, o ligante foi substituído por resíduo de mineração (RM) nas proporções de 15% e 50% em massa, sem utilização da sílica ativa. A relação água/ligante (a/l) da amostra de referência foi fixada em 0,38, enquanto este parâmetro foi ajustado nas composições contendo RM para obter

consistência semelhante (ver resultados dos ensaios reológicos). A composição das amostras avaliadas está detalhada na Tabela 1.

Tabela 1 – Proporções das amostras.

Amostra	0%RM	15%RM	50%RM
Cimento	1,00	0,85	0,50
Resíduo de mineração	-	0,15	0,50
Sílica ativa	0,12	0,00	0,00
Areia fina	1,00	1,00	1,00
Pó de quartzo	0,20	0,20	0,20
Relação a/l inicial*	0,38	0,38	0,38
Superplastificante	0,30%	0,30%	0,30%

* a/l: água/ligante

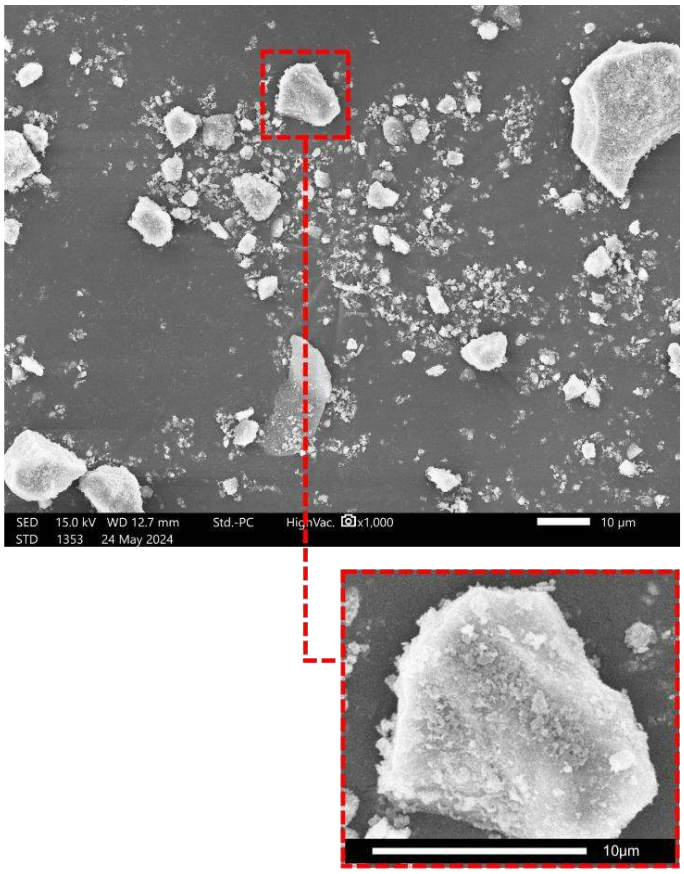
Fonte: Os autores (2025).

Para a produção das argamassas, foram empregados um cimento CP V-ARI, com área superficial BET de 13,31 m²/g e massa específica de 2,98 g/cm³, a sílica ativa (SF) 920D (Elkem), com área superficial BET de 19,30 m²/g. O resíduo de mineração, fornecido pela Circlua S.A., corresponde a um material composto por 47% caulinita, e foi previamente calcinado antes da utilização, com área superficial BET de 13,31 m²/g e massa específica de 2,89 g/cm³. A caracterização completa do resíduo pode ser acessada na Ref. [19]. O Superplastificante (SP) comercializado como ADVA 458 pela GCP Applied Technologies foi empregado. Foram utilizados dois agregados miúdos: uma areia natural de quartzo, com tamanho de partícula entre 600-75 µm (Dv50 = 133 µm) e pó de quartzo (QP) com tamanho de partícula entre 260-30 µm (Dv50 = 133 µm).

Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 1 representa a microscopia eletrônica de varredura do RM. As amostras foram revestidas com ouro antes da obtenção da imagem para melhorar a condutividade. A análise foi conduzida utilizando um microscópio JCM-7000 (JEOL), usando elétrons secundários e uma tensão de 15 kV e a imagem foi adquirida em uma ampliação x1000. O formato das partículas é relativamente cúbico.

Figura 1 – Microscopia eletrônica de varredura do RM.



Fonte: Os autores (2025).

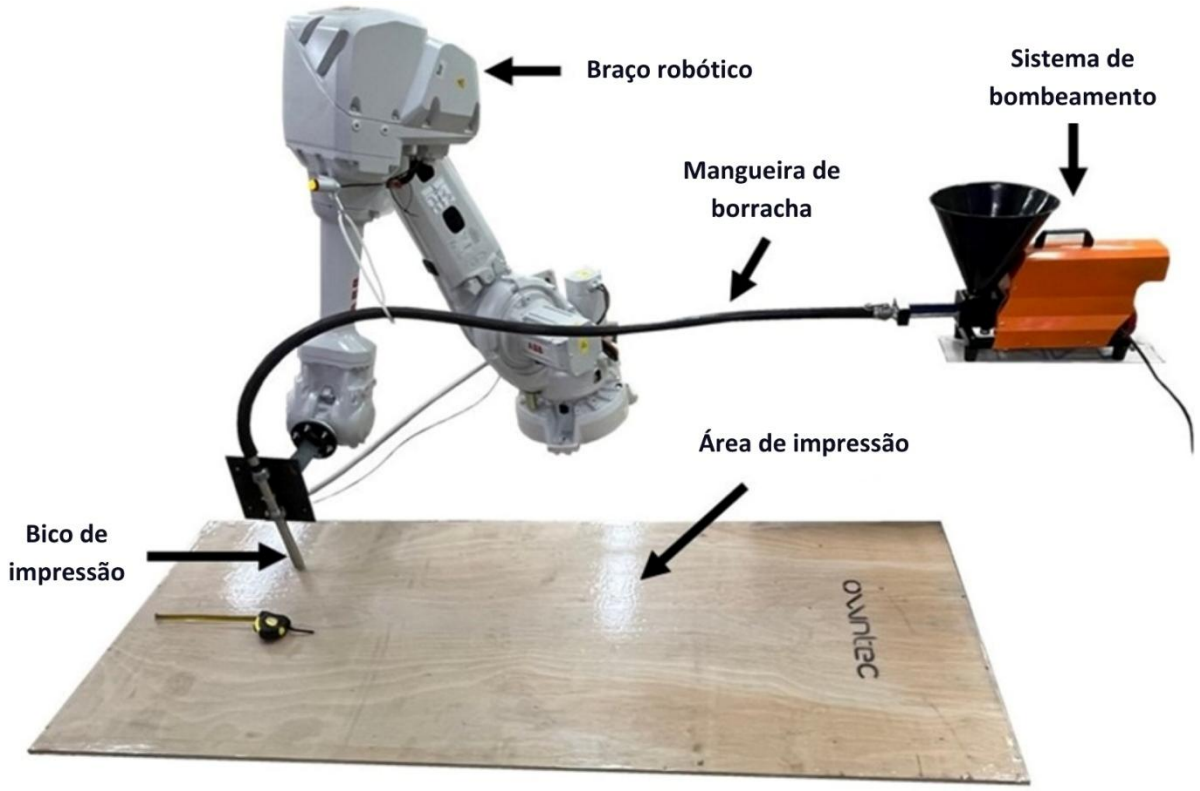
PREPARAÇÃO DA AMOSTRAS

As amostras foram preparadas em um misturador de argamassa em bateladas de 16 L. O processo de mistura obedeceu aos seguintes passos: o cimento e a areia foram misturados por 2 minutos; o resíduo foi acrescentado e misturados por 2 minutos (nas misturas 15%RM e 50%RM); a água foi adicionada aos poucos ao longo de 5 minutos; foi adicionado o aditivo SP e misturado por mais 5 minutos; a sílica ativa (mistura 0%RM) e o pó de quartzo foram adicionados e misturados por mais 5 minutos até todos os materiais estarem devidamente homogeneizados.

IMPRESSÃO 3D

O conjunto de impressão adotado consiste em um sistema de bombeamento de argamassa com máquina de injeção com potência de 1100 W e capacidade de 6 L e um braço robótico do modelo ABB IRB 4600 2.05/60, com 6 eixos e alcance de 2,05m. Para movimentação do braço robótico foi efetuado uma programação com linguagem RAPID, usando o software RobotStudio (ABB). O bocal cilíndrico possui 20 mm de diâmetro. O conjunto de impressão pode ser visto na Figura 1.

Figura 2 – Conjunto de impressão (braço robótico e bomba)



Fonte: Adaptado da De Matos et al. (2025) [19].

A avaliação da capacidade de construção foi feita por meio de uma impressão com igual tempo de deposição de camadas e tempo de manobra para todas as amostras de argamassas, com altura variável (que é um dos parâmetros de controle entre as amostras). A altura de cada camada foi de 10 mm e a velocidade de impressão foi de 75 m/s. O resultado do teste da capacidade de construção corresponde ao número de camadas imprimíveis antes do colapso do elemento. Esse tipo de ensaio já é comumente utilizado para avaliação da capacidade de construção e apresenta bom resultado para analisar essa condição entre amostras [20][21].

Avaliação Reológica

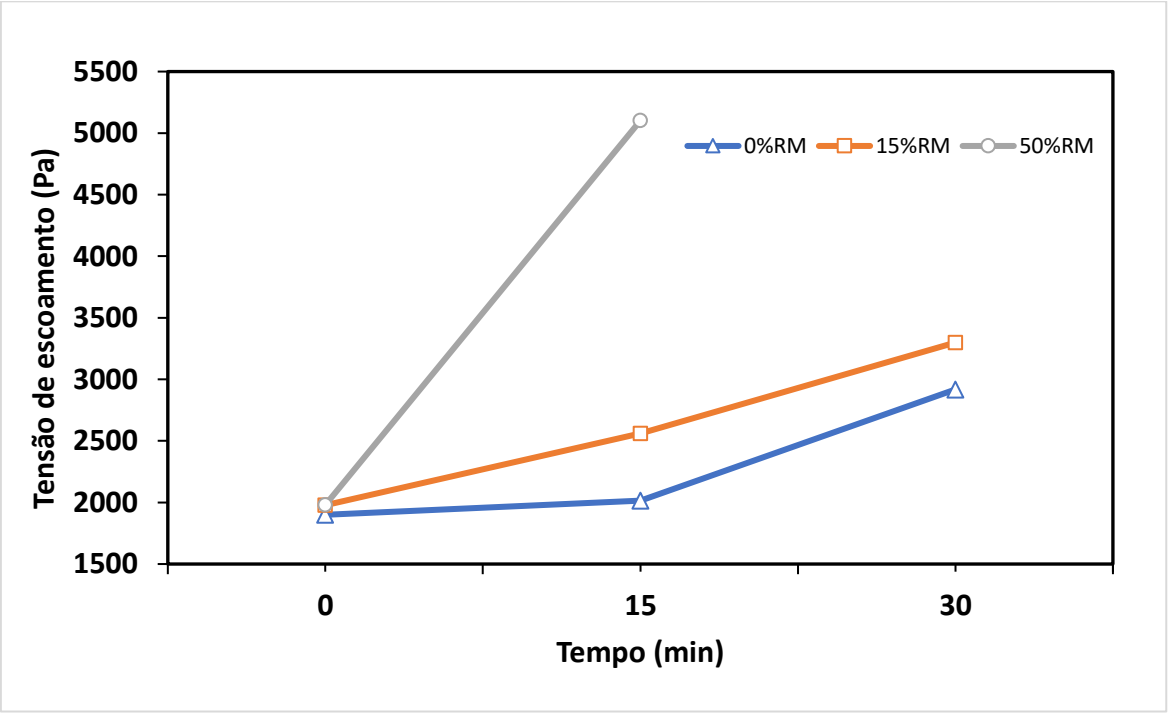
As propriedades reológicas das pastas foram avaliadas aos 0, 15 e 30 minutos após a mistura utilizando um reômetro Viscotester iQ Air (Haake) com o conjunto de pás em copo. A tensão de escoamento foi medida em repouso, em novas amostras preparadas para cada tempo de ensaio, e não na mesma amostra utilizada na impressão. A pá tinha 22 mm de diâmetro e 16 mm de altura; o copo possuía um diâmetro de 54,0 mm com superfície lisa. A tensão de escoamento estática (τ_0,s em Pa) foi determinada aplicando uma taxa de cisalhamento constante de 0,01 s^{-1} durante 60 s. Cada medida foi feita em uma amostra mantida em repouso até a execução do ensaio. resultados e discussão

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

PROPRIEDADES REOLÓGICAS DAS ARGAMASSAS AO LONGO DO TEMPO

A Figura 3 apresenta o resultado das propriedades reológicas das misturas em argamassas ao longo do tempo: 0, 15 e 30 min, após a mistura. Pode-se observar na Figura 3 que a tensão de escoamento no tempo inicial – tempo "0" apresentam semelhança, com variação inferior à 4%, em todas as misturas. Isso indica que o ajuste da consistência por meio da dosagem de água foi eficaz.

Figura 3 – Tensão de escoamento das argamassas ao longo do tempo.



Fonte: Os autores (2025).

Os resultados da tensão de escoamento logo após a mistura (minuto 0) – na faixa de 1900 à 1980 Pa – sugerem que as três amostras estão dentro de uma zona hábil de impressão. Pesquisas sugerem que essa faixa de tensão de escoamento é adequada para impressão e apresenta bons resultados [12][17][18]. Entretanto, a amostra 0%RM no minuto 15 não apresenta ganhos consideráveis de tensão de escoamento, sugerindo que ainda não houve formação dos produtos iniciais de hidratação e o contato entre eles (floculação) de forma pronunciada, o que explica o ligeiro aumento na tensão e baixa capacidade de carga frente as demais [22]. Para as misturas à base de cimento, a tensão de escoamento depende tanto das forças de atração/repulsão quanto do arranjo das partículas na suspensão [23]. À medida que os aglomerados se formam, eles começam a aprisionar água, reduzindo a quantidade de água livre disponível para lubrificar o sistema. Como resultado, a tensão de escoamento da mistura aumenta [24].

Na mistura 15%RM é possível identificar um aumento de 29,5% aos 15 minutos em relação ao minuto "0" de sua tensão de escoamento, apresentando uma maior estruturação das camadas inferiores que já estão plotadas. Para o caso 50%RM, no tempo de 15 minutos, os valores superam em 157,6% o identificado no minuto "0", gerando preocupação com o entupimento no sistema de impressão [25][26].

Não foi possível medir o valor da tensão de escoamento em 30 minutos para a mistura 50%RM, pois há limitação na medida do equipamento em até 6000 Pa, sugerindo valores superior aos medidos em 15 minutos pela curvatura de crescimento da tensão medida. Para a mistura 0%RM, houve o aumento na tensão de escoamento de 53% após 30 minutos em relação ao tempo inicial. Isso pode sinalizar a formação dos produtos de hidratação (principalmente C-S-H e etringita) nesta faixa de tempo, justificando o aumento da tensão de escoamento, pelo fortalecimento das conexões das partículas de cimento [27]. Na amostra 15%RM, 66,8% de aumento frente à medida inicial, explicando a estruturação da impressão e a qualidade de acabamento, estando dentro de uma faixa ótima de impressão.

Uma das possibilidades para o aumento de tensão de escoamento nas misturas com RM, está associado à área superficial do material, que é maior do que a área do grão de cimento, e ao formato de sua partícula, que gera o aumento no atrito entre os grãos [28][29]. Após 15 minutos, a água da solução começa a ser dispostas ao longo dos grãos da mistura e pela maior área superficial da argila, a água fica retida entre as suas camadas e não disponível aos demais grãos que ajudariam a lubrificar a microestrutura, causando menor fluidez do sistema e aumento a tensão de escoamento [24]. Para misturas com maior teor de RM, este comportamento encontra-se de forma mais ativa, com maior ausência dessa água lubrificante.

IMPRESSÃO 3D

A altura das camadas construídas com as misturas para impressão 3D é apresentada na Figura 4. A capacidade de construção foi analisada para confirmar o efeito da substituição parcial da argila nas misturas para impressão 3D, o que resultou em diferentes comportamentos reológicos já mencionados. Os resultados mostram que a mistura controle Figura 4(a) conseguiu suportar 13 camadas, em torno de 110 mm de altura, enquanto com a adição de 15% RM foi possível atingir 850 mm (106 camadas) conforme observado na Figura 4(b). Com a substituição de 50% de cimento, foram obtidos 620 mm de altura, com um total de 74 camadas, conforme visto na Figura 4(c).

Figura 4 – Amostras impressas: (a) 0%RM; (b) 15%RM; (c) 50%RM.



Fonte: Os autores (2025).

A Figura 4(b) mostra a imagem do elemento impressos com 15% RM, considerada a mistura com melhor desempenho no teste de impressão considerando a altura imprimível e o acabamento superficial. A Figura 4(c) mostra o artefato com 50% RM, com altura das camadas construídas satisfatória, mas apresentando acabamento superficial heterogêneo, com as espirais se sobrepondo de maneira irregulares e com algumas distorções nos filamentos entre as camadas.

Embora a amostra 50%RM tenha apresentado menor altura total e número de camadas em comparação à amostra 15%RM, sua altura final foi determinada devido à dificuldade do sistema de bombeamento em processar a mistura, resultando na paralisação na altura alcançada. Como visto na Figura 3, o ganho de tensão de escoamento ao longo do tempo da amostra 50%RM sugere que após 30 minutos, sua tensão de escoamento tenha ultrapassado o valor de 6000 Pa, e valores altos de tensão de escoamento podem gerar o entupimento do sistema, afetando a capacidade de bombeamento da amostra.

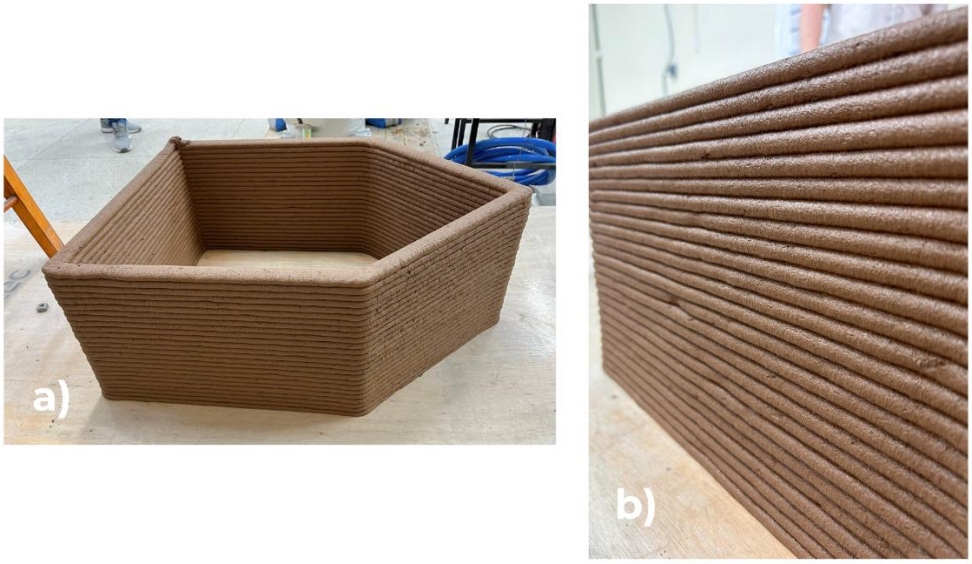
Vale salientar que as amostras com 15% e 50% RM não colapsaram durante o ensaio. Os testes foram interrompidos por falta de material disponível para bombeamento. Assim, supõe-se que estas composições têm capacidade de construção maior do que as reportadas aqui. Ensaios no estado endurecido não foram conduzidos no presente estudo. No entanto, com

base em estudos realizados sobre a substituição parcial do ligante, sugere-se que as resistências mecânicas sejam equivalentes em idades superiores a 7 dias [30].

APLICAÇÃO EM IMPRESSÃO 3D

Para validar a aplicação da argamassa em artefatos impressos, foi efetuada a produção de um elemento em formato de casa, conforme observado na Figura 5(a), utilizando a composição 15%RM, considerada ótima. O elemento possui 25 cm de altura, 45 cm de largura e 60 cm de comprimento. O acabamento superficial pode ser visto na da Figura 5(b).

Figura 5 – Impressão de um artefato em formato de uma casa pequena, amostra 15%RM.



Fonte: Os autores (2025).

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram desenvolvidas composições de argamassa para impressão 3D, incorporando 15 e 50% de resíduo de mineração (RM) em substituição ao ligante (cimento Portland e sílica ativa). As propriedades requeridas para esta aplicação incluem fluidez adequada e boa capacidade de construção. Foi possível identificar alguns pontos que corroboram a eficiência do resíduo de mineração como adição na formulação da argamassa para impressão 3D.

Primeiramente, observou-se um aumento na tensão de escoamento em função do tempo para as amostras de RM, 29,5% e 157,6% em relação aos primeiros 15 minutos de mistura, para 15%RM e 50%RM, respectivamente. Valores que contribuem para a formação das camadas, garantindo maior suporte às camadas inferiores por meio do empilhamento das camadas superiores. Nas amostras com RM, esses valores foram superiores aos da amostra 0%RM, sugerindo que a substituição parcial do ligante pelo resíduo pode ser favorável no aumento da tensão de escoamento ao longo do tempo e permitindo uma impressão contínua e estável para o sistema utilizado. Além disso, foi possível observar que os melhores resultados

que combinam o do ponto de vista reológico quanto os parâmetros relacionados à construção das camadas, ocorreu na amostra que utilizou percentuais menores do resíduo alternativo – 15%. O número de camadas da amostra impressa 15%RM aumentou em 772% em relação à amostra sem RM, enquanto a tensão de escoamento com o tempo foi de 1978 Pa para 3299 Pa, aos 30 minutos, 66,8% de aumento. Em relação à substituição do cimento por percentuais mais elevados do resíduo (50%), ainda é possível alcançar resultados satisfatórios, inclusive maiores tensões de escoamento, embora se observe uma perda na homogeneidade superficial do elemento impresso. Isso sugere que, embora a maior taxa de substituição do cimento por resíduo seja possível, ela pode influenciar negativamente a aparência visual do produto final, indicando a necessidade de um equilíbrio na dosagem para equilíbrio destes dois itens.

REFERÊNCIAS

[1] ROUSSEL, N. Rheological requirements for printable concretes. **Cement and Concrete Research**, out. 2018.

[2] DE SCHUTTER, G.; LESAGE, K.; MECHTCHERINE, V.; NERELLA, V. N.; HABERT, G.; AGUSTI-JUAN, I. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. **Cement and Concrete Research**, out. 2018.

[3] LE, T. T.; AUSTIN, S. A.; LIM, S.; BUSWELL, R. A.; GIBB, A. G. F.; THORPE, T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and Structures**, v. 45, n. 8, p. 1221–1232, ago. 2012.

[4] NERELLA, V. N.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 586–601, abr. 2019.

[5] PANDA, B.; PAUL, S. C.; HUI, L. J.; TAY, Y. W. D.; TAN, M. J. Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 281–288, nov. 2017.

[6] NERELLA, V. N.; MECHTCHERINE, V. Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D). Em: **3D Concrete Printing Technology: Construction and Building Applications**, p. 333–347, 2019.

[7] MALAEB, Z.; HACHEM, H.; TOURBAH, A.; MAALOUF, T.; EL ZARWI, N.; HAMZEH, F. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 6, n. 6, p. 14–22, 2015.

[8] SANJAYAN, J. G.; NEMATOLLAHI, B.; XIA, M.; MARCHMENT, T. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 468–475, maio 2018.

[9] KHOSHNEVIS, B. Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies. **Automation in Construction**, v. 13, n. 1, p. 5–19, jan. 2004.

[10] BHOOSHAN, S.; BHOOSHAN, V.; DELL'ENDICE, A.; CHU, J.; SINGER, P.; MEGENS, J.; VAN MELE, T.; BLOCK, P. The Striatus bridge. **Architecture, Structures and Construction**, v. 2, n. 4, p. 521–543, dez. 2022.

[11] JAGODA, J.; DIGGS-MCGEE, B.; KREIGER, M.; SCHULDT, S. The viability and simplicity of 3D-Printed construction: A military case study. **Infrastructures**, v. 5, n. 4, abr. 2020.

[12] JAYATHILAKAGE, R.; RAJEEV, P.; SANJAYAN, J. Rheometry for Concrete 3D Printing: A Review and an Experimental Comparison. **Buildings**, v. 12, n. 8, ago. 2022.

[13] ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; LIU, G.; YANG, Y.; WU, M.; PANG, B. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 263–271, jun. 2018.

[14] XU, J.; DING, L.; CAI, L.; ZHANG, L.; LUO, H.; QIN, W. Volume-forming 3D concrete printing using a variable-size square nozzle. **Automation in Construction**, v. 104, p. 95–106, ago. 2019.

[15] HAMBACH, M.; VOLKMER, D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 79, p. 62–70, maio 2017.

[16] LIM, S.; BUSWELL, R. A.; LE, T. T.; AUSTIN, S. A.; GIBB, A. G. F.; THORPE, T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. **Automation in Construction**, v. 21, n. 1, p. 262–268, jan. 2012.

[17] ZHANG, C.; NERELLA, V. N.; KRISHNA, A.; WANG, S.; ZHANG, Y.; MECHTCHERINE, V.; BANTHIA, N. Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, 104155, set. 2021.

[18] MATOS, P. R. de; PRIGOL, H.; SCHACKOW, A.; NAZÁRIO, S. da S.; DOERNER, G.; SAFANELLI, N. Quality control tests of fresh 3D printable cement-based materials. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 17, n. 5, 2024.

[19] DE MATOS, P. R.; DOERNER, G.; NAZÁRIO, S. da S.; ANDRADE NETO, J. da S.; LONGHI, M.; FOLGUERAS, M.; RODRÍGUEZ, E. D. Limestone calcined clay cements (LC3) produced with iron ore tailings and ceramic waste: Hydration, mechanical performance and rheology. **Construction and Building Materials**, v. 458, jan. 2025.

[20] BONG, S. H.; XIA, M.; NEMATOLLAHI, B.; SHI, C. Ambient temperature cured 'just-add-water' geopolymer for 3D concrete printing applications. **Cement and Concrete Composites**, v. 121, ago. 2021.

[21] HOU, S.; DUAN, Z.; XIAO, J.; YE, J. A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design. **Construction and Building Materials**, v. 273, mar. 2021.

[22] ROUSSEL, N.; OVARLEZ, G.; GARRAULT, S.; BRUMAUD, C. The origins of thixotropy of fresh cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 1, p. 148–157, jan. 2012.

[23] JOHNSON, S. B.; FRANKS, G. V; SCALES, P. J.; BOGER, D. V; HEALY, T. W. Surface chemistry-rheology relationships in concentrated mineral suspensions. **International Journal of Mineral Processing**, v. 58, p. 267–304, fev. 2000.

[24] TREGGER, N. A.; PAKULA, M. E.; SHAH, S. P. Influence of clays on the rheology of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 3, p. 384–391, mar. 2010.

[25] GAO, H.; JIN, L.; CHEN, Y.; CHEN, Q.; LIU, X.; YU, Q. Rheological behavior of 3D printed concrete: Influential factors and printability prediction scheme. **Journal of Building Engineering**, v. 91, ago. 2024.

[26] JIAO, D.; DE SCHRYVER, R.; SHI, C.; DE SCHUTTER, G. Thixotropic structural build-up of cement-based materials: A state-of-the-art review. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, set. 2021.

[27] SCRIVENER, K.; OUZIA, A.; JUILLAND, P.; KUNHI MOHAMED, A. Advances in understanding cement hydration mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 124, out. 2019.

[28] MUHAMMAD, A.; THIENEL, K. C.; SPOSITO, R. Suitability of Clinker Replacement by a Calcined Common Clay in Self-Consolidating Mortar—Impact on Rheology and Early Age Properties. **Minerals**, v. 12, n. 5, maio 2022.

[29] ARAMBURO, C.; PEDRAJAS, C.; RAHHAL, V.; GONZÁLEZ, M.; TALERO, R. Calcined clays for low carbon cement: Rheological behaviour in fresh Portland cement pastes. **Materials Letters**, v. 239, p. 24–28, mar. 2019.

[30] BHATTACHERJEE, S.; BASAVARAJ, A. S.; RAHUL, A. V.; SANTHANAM, M.; GETTU, R.; PANDA, B.; SCHLANGEN, E.; CHEN, Y.; COPUROGLU, O.; MA, G.; WANG, L.; BEIGH, M. A. B.; MECHTCHERINE, V. Sustainable materials for 3D concrete printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, set. 2021.