AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS REOLÓGICOS DE MISTURAS CIMENTÍCIAS PARA IMPRESSÃO 3D: INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR ARGILA CALCINADA

Ana Laura Mai, Matheus Frederico Ferreira Henckmaier, Ana Livia Silvares Fiorussi, José da Silva Andrade Neto

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, meios construtivos mais econômicos e sustentáveis vêm sendo debatidos na construção civil e arquitetura (Nascimento; Morais; Lopes, 2022). Um dos sistemas mais promissores é a impressão tridimensional com concreto (3DCP), por utilizar somente a extrusão de material pré dimensionado, dispensando o uso de formas, gerando menos resíduos (Bhattacherjee et al., 2021). O maior desafio em relação a técnica é a quantidade de cimento necessária, por conta da não utilização de agregados graúdos (britas) que comprometem a trabalhabilidade e construtibilidade da mistura na impressão (ZHANG et al., 2021). Logo, o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) contribuem para a redução do teor de cimento na mistura e consequentemente diminui a emissão de gás carbônico na produção de clínquer, matéria prima do material (Chen et al., 2022). Neste contexto, têm-se o cimento de argila calcinada e fíler calcário *(Limestone calcined clay cement - LC³) (*Scrivener et al., 2028*).* O objetivo do presente trabalho é avaliar o uso de cimentos LC³ em misturas para 3DCP, se atentando a propriedades reológicas no estado fresco. Para isso, foram testadas quatro misturas, sendo uma referência e outras três com a adição progressiva dos MCS citados, denominados de LC³-65, LC³-50 e LC³-35. Avaliou-se extrudabilidade (capacidade de extrusão) e construtibilidade (capacidade de construir camadas) no momento de impressão e reometria rotacional para determinação da viscosidade aparente e da tensão de escoamento.

DESENVOLVIMENTO

Os materiais utilizados foram: Cimento Portland ARI (CP V) com diâmetro médio (Dv50) de 10,16 µm, densidade de 3080 kg/m³ e área de superfície específica BET de 2,56 m²/g; Fíler calcário (FC) com um Dv50 de 17,03 µm, uma densidade de 2750 kg/m³ e uma área superficial específica BET de 1,83 m²/g; Argila Calcinada (AC) com um Dv50 de 8,47 µm, uma densidade de 2440 kg/m³ e uma área superficial BET de 11,99 m²/g, obtida pelo aquecimento de uma argila caulinítica natural a 600 °C durante 3 h em um forno de laboratório tendo sua morfologia das partículas analisada por microscopia eletrônica de varredura – Figura 1. (c, d); Adva Flow 880 (SP), aditivo superplastificante de alto desempenho à base de policarboxilatos e água deionizada.

Foram avaliadas quatro diferentes proporções de CP V, AC e FC, conforme estudos de Al-Noaimat et al. (2023) e Moussa, El Haim e Rida (2026): Referência (100% CP V), LC³-65 (70% de CP V, 20% de AC e 10% de FC), LC³-50 (55% de CP V, 30% de AC e 15% de FC) e LC³-35 (40% de CP V, 40% de AC e 20% de FC). A relação água/cimento foi fixada em 0,28 e o teor de aditivo super plastificante em 0.1% em relação a massa dos materiais anidros, conforme testes prévios de impressão 3D.

A tensão de escoamento estática e viscosidade aparente das misturas foram determinadas por reômetro rotacional modelo MCR 303 (Anton Paar) com geometria placa-placa, gap de 1,0 mm. As impressões foram realizadas em impressora 3D de extrusão pneumática Duraprinter, modelo C03 (área útil de 30 × 30 × 50 cm). As dimensões da modelagem do cilindro foi 45 x 70 mm, foi utilizada uma pressão de 1 bar, velocidade de 10mm/s, e altura de cada camada igual a 2 mm. As impressões foram feitas com 10 minutos de espera em relação ao começo da mistura dos materiais até o momento de impressão e os ensaios de rometria foram feitos com 7 minutos de espera.

RESULTADOS

O mecanismo de operação e suas características específicas, como: tamanho de bico, velocidade de impressão, pressão utilizada e as propriedades de cada material das misturas influenciam diretamente o desempenho da impressão (Baz; Aouad; Remond, 2020). O desempenho das impressões depende diretamente da impressora, que demonstrou inconsistências ao longo do processo, diante dessa margem de erro todas as misturas foram impressas em quantidades repetidas até que se encontrasse um padrão de imprimibilidade. Como apresentado na Figura 1, o LC³-65 não teve um desempenho ideal, embora apresente boa construtibilidade, não apresentou uma extrudabilidade adequada, apresentando inconsistência entre as camadas e bolhas de ar. O LC³-35 apresentou um bom desempenho, contudo, por conta da maior quantidade de argila calcinada – que influencia diretamente na coesão da mistura por conta da sua morfologia granular, a mistura se acumula no bico da impressora, segregando a água e chegando a um momento que a extrusão é interrompida. A mistura LC³-50 apresentou a relação ideal de construtibilidade e extrudabilidade, mantendo constância e coesão ao longo da impressão. Na Figura 2a é apresentado o resultado de tensão de escoamento estática, em que se observa que o LC³-50 apresenta um valor 3,5 vezes superior a amostra de referência, e, conforme observado na Figura 2b, apresenta valores de tensão superiores a amostra de referência em todo intervalo de taxa de cisalhamento avaliada. Estes resultados convergem para o comportamento observado na impressão 3D, em que o cimento LC³-50 apresentou menor fluidez e, por tanto, maior construtibilidade. Isso ocorre devido ao formato angular e elevada área superficial da argila calcinada, conforme pode ser visualizado na Figura 2c,d.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados permitiram avaliar os efeitos do uso da argila calcinada e do fíler calcário nas misturas no comportamento reológico e na janela ideal para impressão 3D: mistura LC³-50, 0.1% de aditivo e 10 minutos de espera. O uso de argila calcinada e fíler calcário reduz o consumo de clínquer Portland, reduzindo as emissões de CO_2 na indústria, e otimiza as propriedades reológicas para impressão 3D. A pesquisa avançará diante novas condições de imprimibilidade, proporções de misturas e modelagens.

Palavras-chave: Materiais cimentícios suplementares; Reologia; Fabricação digital.

ANEXOS

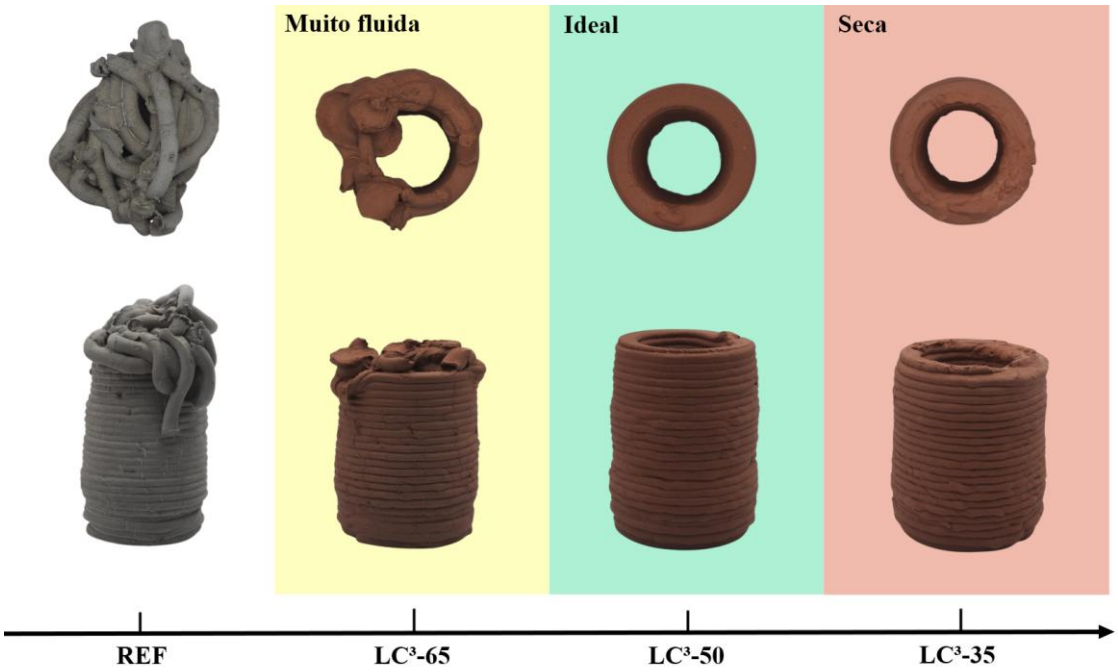


Figura 1. *Desempenho de cada mistura em relação a construtibilidade das camadas da modelagem.*

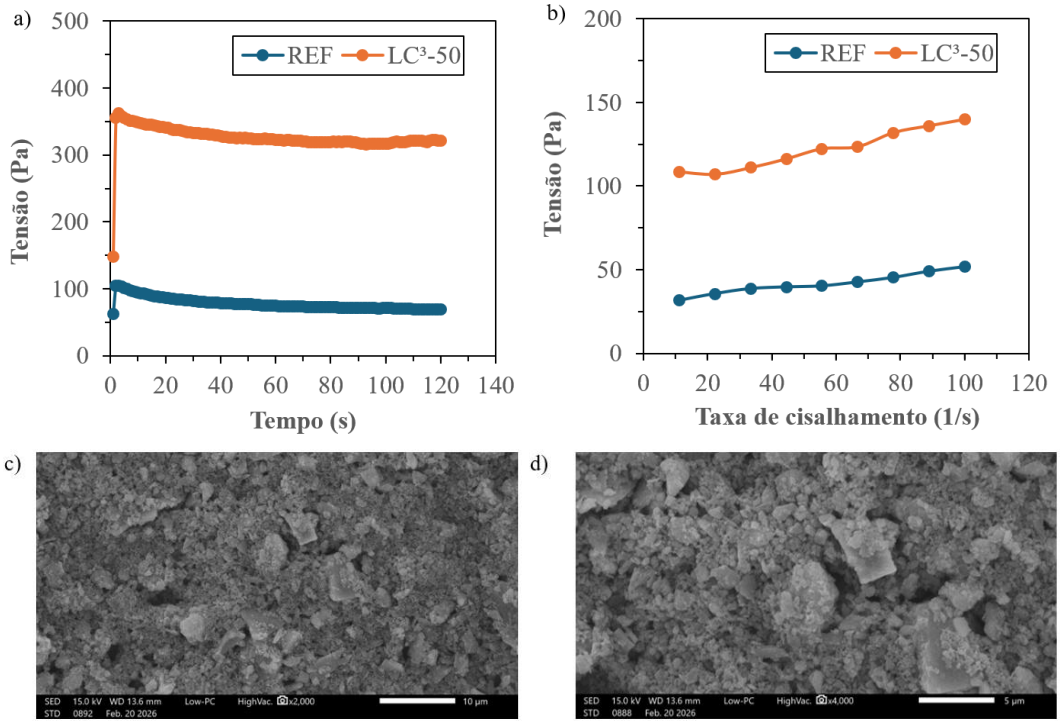


Figura 2. *(a) Curva de tensão em relação ao tempo (b) Curva de tensão em relação a taxa de cisalhamento (c) Composição morfológica da argila calcinada: imagem MEV ampliada 2000x (d) Composição morfológica da argila calcinada: imagem MEV ampliada 4000x.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-NOAIMAT, Y. A. et al. 3D printing of limestone-calcined clay cement: A review of its potential implementation in the construction industry. Results in Engineering, v. 18, 101115, 2023. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101115.

BAZ, Bilal; AOUAD, Georges; REMOND, Sébastien. Effect of the printing method and mortar's workability on pull-out strength of 3D printed elements. Construction and Building Materials, v. 230, p. 117002, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117002. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819324444. Acesso em: 27 ago. 2026.

BHATTACHERJEE, Shantanu; BASAVARAJ, Anusha S.; RAHUL, A. V.; SANTHANAM, Manu; GETTU, Ravindra; PANDA, Biranchi; SCHLANGEN, Erik; CHEN, Yu; ÇOPUROĞLU, Oguzhan; MA, Guowei; WANG, Li; BEIGH, Mirza Abdul Basit; MECHTCHERINE, Viktor. Sustainable materials for 3D concrete printing. Cement and Concrete Composites, v. 122, p. 104156, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104156.

CHEN, Yu; HE, Shan; GAN, Yidong; ÇOPUROĞLU, Oğuzhan; VEER, Fred; SCHLANGEN, Erik. A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing. Journal of Building Engineering, v. 45, p. 103599, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103599

MOUSSA, Nada Oulad; EL HAIM, Mohamed; RIDA, Loubaba. Limestone–Calcined Clay: An Alternative Binder for 3D Concrete Printing. BIO Web of Conferences, v. 212, 01022, 2026. DOI: 10.1051/bioconf/202621201022.

NASCIMENTO, Emilli Rodrigues do; MORAIS, Denilson Pedro Ferreira de; LOPES, Shara Carvalho. Sustentabilidade na construção civil no Brasil: uma revisão da literatura. Research, Society and Development, v. 11, n. 14, e524111436611, 2022 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36611.

SCRIVENER, Karen; MARTIRENA, Fernando; BISHNOI, Shashank; MAITY, Soumen. Calcined clay limestone cements (LC^3). Cement and Concrete Research, v. 114, p. 49-56, December 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017.

ZHANG, Chao; NERELLA, Venkatesh Naidu; KRISHNA, Anurag; WANG, Shen; ZHANG, Yamei; MECHTCHERINE, Viktor; BANTHIA, Nemkumar. Mix design concepts for 3D printable concrete: a review. Cement and Concrete Composites, v. 122, p. 104155, 2021. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104155.