FORMULAÇÃO DE CONCRETO ÁLCALI-ATIVADO À BASE DE ESCÓRIA DE UMA PARTE PARA APLICAÇÕES EM IMPRESSÃO 3D

Bruno Meneghetti, Gabriel Comerlato, Gabriel Doerner, Pyetra Maas, Bruna Liebl, Paulo Matos

INTRODUÇÃO

A produção e o uso de cimento Portland (CP) são responsáveis por uma parcela significativa das emissões globais de dióxido de carbono, impulsionando a busca por alternativas sustentáveis (GCCA, 2024). Os materiais álcali-ativados (MAA) destacam-se como soluções promissoras (Provis, 2018), assim como a adoção de processos construtivos limpos, a exemplo da impressão 3D de concreto (3DCP) (Le et al., 2012). Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de um ligante álcali-ativado comercial de uma parte, à base de escória, para aplicações em 3DCP, demonstrando sua viabilidade por meio da fabricação de um elemento em escala real.

DESENVOLVIMENTO

A metodologia envolveu a utilização de um ligante álcali-ativado de uma parte à base de escória, ativado com silicato de sódio em pó, combinado com areia fina de quartzo, pó de quartzo, sílica ativa e água. A relação água/ligante (a/l) foi definida em 0,53, valor selecionado entre 0,46 e 0,64 por proporcionar o melhor equilíbrio entre a trabalhabilidade (extrusão e bombeamento) e a capacidade de suporte mecânico, ou construtibilidade (Le et al., 2012). A mistura foi caracterizada em laboratório por meio de ensaios de consistência na mesa de espalhamento, seguindo a NBR 13276 (ABNT, 2016), ensaios reológicos em reômetro rotacional e compressão no estado fresco ao longo do tempo (15 a 120 minutos). A resistência à compressão e à tração na flexão foram avaliadas nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Por fim, a viabilidade foi comprovada mediante a impressão de um banco em escala real, utilizando um braço robótico de 6 eixos com velocidade de impressão de 100 mm/s e bombeamento de 2 L/min.

RESULTADOS

Os resultados reológicos (Fig. 1a) demonstraram que a mistura apresenta comportamento altamente tixotrópico, com tensão de escoamento inicial de 1,8 kPa e taxa de estruturação tixotrópica de 0,09 kPa/min, adequada para manter a estabilidade dimensional sob o peso das camadas sobrepostas (Roussel, 2018). No estado endurecido, o material exibiu rápida evolução mecânica, atingindo resistência à compressão de 7,8 MPa no primeiro dia (25,2% da resistência final) e 31,0 MPa aos 28 dias. A resistência à tração na flexão alcançou 7,9 MPa aos 28 dias. Durante a validação prática, a fabricação do mobiliário de 40 camadas (1,72 m x 0,36 m x 0,49 m) transcorreu sem falhas estruturais, comprovando que a tensão aplicada na primeira camada impressa (4,0 kPa) manteve-se inferior à capacidade resistente gerada pelo desenvolvimento estrutural do material (4,4 kPa). O mobiliário impresso pode ser observado na Fig. 2.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo comprovou a viabilidade técnica e operacional da formulação de escória álcali-ativada de uma parte para a 3DCP. A fixação da relação a/l em 0,53 otimizou o balanço entre fluidez e construtibilidade, resultando em um material com elevada tixotropia e taxa de estruturação capaz de garantir a estabilidade do elemento em escala real. Verificou-se que o ensaio de compressão no estado fresco é uma métrica preditiva eficaz para avaliar a construtibilidade. Além disso, a cinética acelerada de ganho de resistência mecânica representa uma vantagem competitiva para a otimização dos ciclos

produtivos de pré-fabricados, enquanto o sistema de uma parte elimina o risco do uso de ativadores líquidos corrosivos, favorecendo o manuseio seguro em operações *in situ*.

Palavras-chave: Impressão 3D; Escória; Álcali-ativada; Reologia

ANEXOS

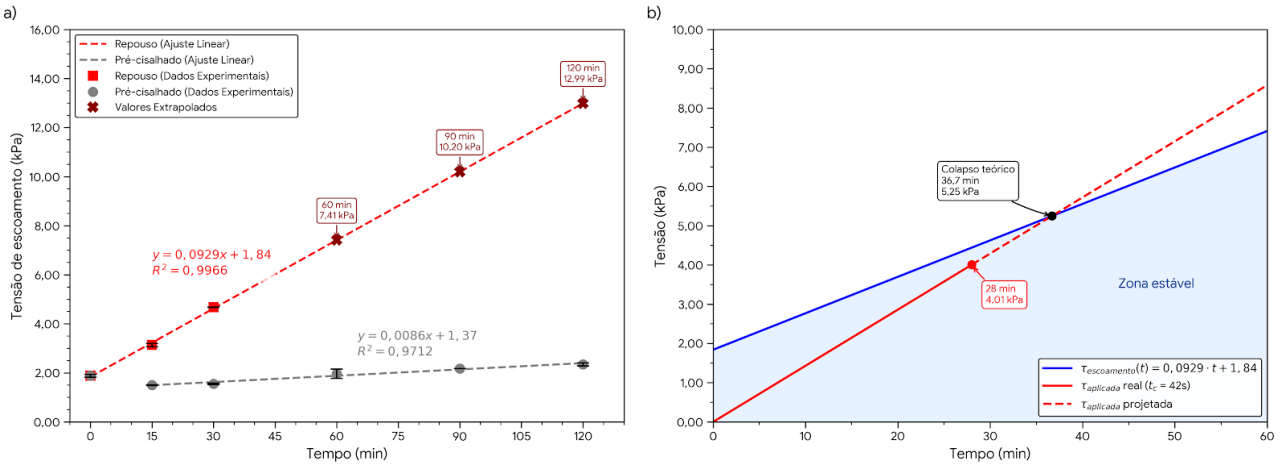


Figura 1. *Tensão de escoamento (repouso e pré-cisalhado) ao longo do tempo (a) e tensão de escoamento medida e aplicada para o cenário de impressão do banco (b) (O autor, 2026).*



Figura 2. *Objeto mobiliário impresso. (O autor, 2026)*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

GCCA - GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. **Cement industry net zero progress report 2024/25**. Londres: GCCA, 2024.

LE, T. T. *et al.* Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and Structures**, [*S. l.*], v. 45, n. 8, p. 1221-1232, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z. Acesso em: 16 fev. 2026.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, [*S. l.*], v. 114, p. 40-48, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009. Acesso em: 3 abr. 2026.

ROUSSEL, N. Rheological requirements for printable concretes. **Cement and Concrete Research**, [*S. l.*], v. 112, p. 76-85, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005. Acesso em: 18 fev. 2026.