

ESTUDO DA REOLOGIA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Júlia Michel, Thalian Valente Soares, Adilson Schackow, Carmeane Effting

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o setor da construção civil tem enfrentado desafios crescentes relacionados à sustentabilidade, produtividade e inovação tecnológica [6]. A busca por métodos construtivos mais eficientes, com menor impacto ambiental e maior precisão, tem impulsionado o desenvolvimento e a adoção de novas tecnologias. Alternativas como a manufatura aditiva (impressão 3D), capazes de tornar a indústria da construção mais eficiente e sustentável, ainda se encontram em fase inicial de desenvolvimento, sendo um dos obstáculos a adequação do material cimentício ao sistema de impressão utilizado [2].

Para atingir o equilíbrio necessário à impressão 3D, a argamassa frequentemente incorpora materiais complementares e aditivos químicos que modulam suas propriedades reológicas e estruturais. Assim, compreender e controlar a reologia da argamassa para impressão 3D torna-se essencial para garantir a qualidade e a viabilidade técnica dessa tecnologia, ampliando seu potencial de contribuição para a construção sustentável [5].

DESENVOLVIMENTO

A reologia é a área da física que estuda o fluxo e a deformação da matéria. Por meio dessa ciência, busca-se estabelecer uma relação entre força, deformação e tempo para descrever o fluxo de um material ao ser submetido a tensões externas [7]. No que se refere aos materiais cimentícios, as propriedades reológicas estão diretamente ligadas ao seu estado fresco [3]. A impressão 3D sofre grande influência da tensão de escoamento estática e da viscosidade, pois essas grandezas definem a capacidade do material de manter sua forma após ser extrudado e sua facilidade de bombeamento, respectivamente.

A tensão de cisalhamento mínima para iniciar ou manter o fluxo de um material é denominada tensão de escoamento, quando aplicada para iniciar o fluxo de um material em repouso, é chamada tensão de escoamento estática [4]. O valor da tensão de escoamento geralmente varia conforme a taxa de cisalhamento aplicada. O crescimento da tensão ao longo do tempo, enquanto o material encontra-se em repouso, é denominado taxa de estruturação [1]. Uma vez que o fluxo de um material é iniciado, a resistência que tal material apresenta para escoar com mais velocidade é chamada de viscosidade. Em outras palavras, a viscosidade determina o acréscimo da tensão de cisalhamento necessário para aumentar a taxa de fluxo [4].

Dessa forma, o estudo reológico da tensão de escoamento, da taxa de estruturação e da viscosidade aparente do traço com melhor desempenho na impressão tridimensional, foi o objeto de estudo dessa pesquisa, além de ensaios laboratoriais complementares para justificar o bom resultado da pasta cimentícia. Os ensaios reológicos foram realizados com o reômetro rotacional Haake Viscotester iQair.

Inicialmente, desenvolveu-se dois traços de argamassas cimentícias para serem estudados na impressão tridimensional. A amostra 1 é composta por cimento, metacaulim,

sílica ativa, areia, água, aditivo superplastificante e aditivo retardador. A amostra 2 possui em sua composição os mesmos materiais da amostra anterior, porém com o acréscimo de filer em sua composição.

As duas amostras foram produzidas baseando-se seus componentes e proporções em misturas previamente estudadas em literaturas. Através do método de tentativa e erro, executou-se o bombeamento das amostras na impressora até atingir-se as proporções ideais para a impressão 3D.

Com o resultado da melhor pasta cimentícia para impressão tridimensional, iniciou-se o estudo reológico. A primeira análise no reômetro foi realizada com a amostra em seu estado fresco (até 15 minutos após a hidratação da mistura), posteriormente, analisou-se a mistura com 45 minutos, 60 minutos e 75 minutos. A tensão de escoamento foi determinada como o pico de tensão registrado durante o procedimento, que caracteriza o início do escoamento do material. A taxa de estruturação foi obtida através da medição da tensão de escoamento ao longo dos primeiros 75 minutos de idade da pasta. Por fim, a viscosidade aparente foi determinada ao decorrer da taxa de cisalhamento.

Os ensaios de tração na flexão, compressão e massa específica também foram realizados a fim de obter conclusões mais aprofundadas sobre os resultados.

RESULTADOS

O estudo reológico resultou da análise da taxa de estruturação (Figura 1) e viscosidade aparente (Figura 2) da argamassa cimentícia. A taxa de estruturação foi formada através da análise da variação da tensão de escoamento estática ao decorrer da idade da pasta, resultando em um crescimento dos valores da tensão, conforme o aumento da idade das pastas. Considerando que essa taxa determina o tempo que a pasta consegue sobrepor suas camadas antes de desmoronar, obteve-se um bom resultado de estruturação para impressão 3D.

Em relação à viscosidade aparente, os resultados determinam a fluidez da pasta durante o bombeamento. O gráfico mostra que as pastas em todas as idades apresentam seu valor de viscosidade diminuindo com o aumento da taxa de cisalhamento, comportamento que auxilia na fluidez da pasta para bombeamento. Assim como os valores da viscosidade são maiores conforme a idade da pasta, comportamento já esperado considerando que o tempo acentua a separação entre a água e a pasta.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A execução deste trabalho possibilitou a avaliação de propriedades reológicas de argamassas cimentícias para a impressão tridimensional. Por meio de reometria rotacional foi possível investigar como a tensão de escoamento, taxa de estruturação e viscosidade influenciam na impressão tridimensional. Os resultados obtidos mostraram-se consistentes com outras pesquisas realizadas, garantindo uma boa capacidade de construção de camadas e bombeamento ao material.

Palavras-chave: reologia; materiais cimentícios; impressão 3D.

ILUSTRAÇÕES

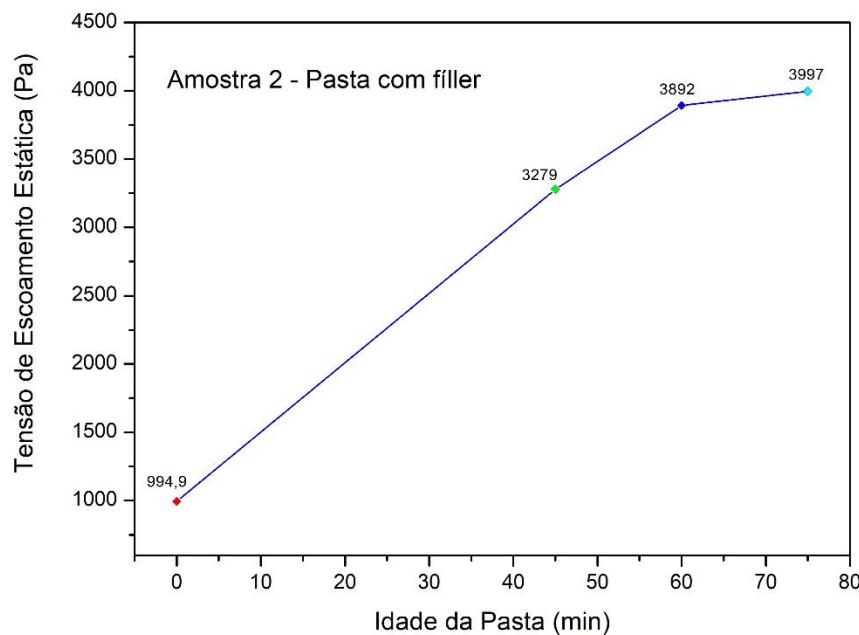


Figura 1. Taxa de estruturação.

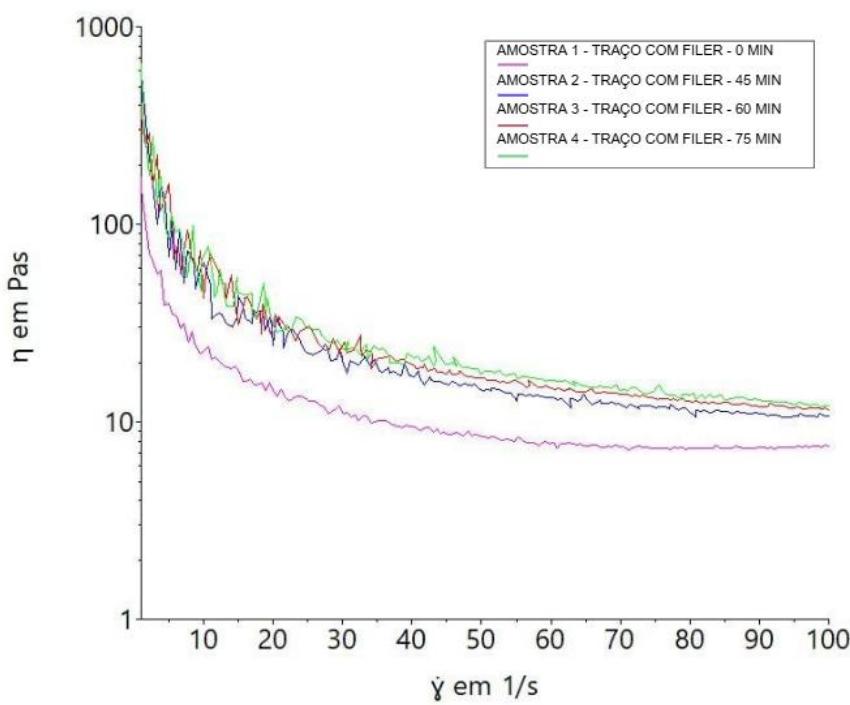


Figura 2. Viscosidade aparente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMZIANE, Sofiane; KHAYAT, Kamal; SONEBI, Mohammed; PERROT, Arnaud. RILEM TC 266 – MRP: Round-Robin rheological tests on high performance mortar and concrete with adapted rheology – evaluating structural build-up at rest of mortar and concrete. *Materials and Structures*. Nova Iorque, v.56, n. 150, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-023-02236-3>.
- [2] BUSWELL, R. A.; DE SILVA, W. L.; JONES, S. Z.; DI, J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, Zurich, v. 112, p. 37-49, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617311924>.
- [3] FERRARIS, Chiara F.; OBLA, Karthik H.; HILL, Russel. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*, Amsterdam, v. 31, n. 2, p.245-255, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00454-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00454-3).
- [4] MANDAL, Romio; PANDA, Sarat Kumar; NAYAK, Sanket. Rheology of Concrete: Critical Review, recent Advancements, and future prospectives. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 392, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132007>.
- [5] O.H. Wallevik, D. Feys, J.E. Wallevik, K.H. Khayat, Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials, *Cem Concr Res* 78 (2015) 100–109. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2015.05.003>.
- [6] Y.F. Li, Y.F. Liang, J.Y. Syu, C.H. Huang, Y.K. Tsai, M.H. Lok, Static and dynamic mechanical characteristics of 3D-Printed anisotropic basalt fiber-reinforced cement mortar, *Journal of Building Engineering* 100 (2025) 111692. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JBEM.2024.111692>.
- [7] Yuan, Q., Shi, C., & Jiao, D. (2022). *Rheology of Fresh Cement-Based Materials: Fundamentals, Measurements, and Applications* (1st ed.). CRC Press. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781003265313>.

DADOS CADASTRAIS

BOLSISTA: Júlia Michel.

MODALIDADE DE BOLSA: PROBIC.

VIGÊNCIA: Setembro/2024 a Agosto/2025 – Total: 12 meses.

ORIENTADOR(A): Carmeanne Effting.

CENTRO DE ENSINO: CCT.

DEPARTAMENTO: Departamento de Engenharia Civil.

ÁREAS DE CONHECIMENTO: Engenharias / Engenharia Civil.

TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Materiais de Construção Sustentáveis, Reologia e Impressão 3D.

Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA: NPP4229-2023.