

MATERIAIS CIMENTÍCIOS PARA IMPRESSÃO 3D¹

Júlia Michel², Carneane Effting³, Adilson Schackow⁴, Nicollas Safanelli⁵, Thalian Valente Soares⁶.

¹ Vinculado ao projeto “Materiais de Construção Sustentáveis, Reologia e Impressão 3D”

² Acadêmica do Curso de Engenharia Civil – CCT – Bolsista PROBIC

³ Orientadora, Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Civil – CCT – carneane.effting@udesc.br

⁴ Doutor, Departamento de Engenharia Civil – CCT

⁵ Mestre em Engenharia Civil – CCT

⁶ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – CCT

A indústria da construção civil, constantemente, procura implementar tecnologias que melhoram o nível de automação da fabricação de estruturas de edifícios e, é nesse contexto que surge a impressora 3D. Uma ferramenta que permite a fabricação de moldes para peças sólidas em camadas aditivas, a partir de desenhos digitais e que promete revolucionar o modo de construir. Essa inovação surge como uma alternativa inteligente para a produção de materiais, reduzindo significativamente os custos, desperdícios e o tempo de fabricação. Esse método de impressão surgiu pela primeira vez em 1984, por Charles Hull, como um meio de prototipagem rápida. Ao longo dos anos, essa técnica foi aprimorada e as impressoras 3D ganharam destaque no mercado devido à sua ampla aplicabilidade na produção de objetos de diversos segmentos (QUEIROZ, 2024).

Recentemente, alguns investigadores fizeram uma série de estudos no campo dos materiais de construção impressos em 3D e quais parâmetros influenciam na impressão. Os parâmetros de processamento de impressão são os principais fatores que afetam diretamente a estabilidade do processo de impressão e sua qualidade. Um dos maiores desafios técnicos é a dependência de propriedades muito específicas do material, que precisa ser capaz de sofrer extrusão, ajustar-se à camada anterior, e manter sua devida forma ao sofrer pressão das camadas sobrejacentes (BUSSWELL *et al.*, 2018). Sendo assim, o desenvolvimento de traços de concretos e argamassas para impressão 3D deve ser minuciosamente realizado, com enfoque nos aspectos reológicos (ZHANG *et al.*, 2021).

Oliveira *et al.* (2000) define a reologia como a ciência que estuda o fluxo e a deformação de um material quando ele é submetido a uma tensão externa. No que se refere aos materiais cimentícios, as propriedades reológicas estão diretamente ligadas ao estado fresco (FERRARIS *et al.*, 2001). Portanto, o estudo reológico dos materiais se torna fundamental para compreensão do seu comportamento perante a impressão tridimensional, considerando que esse estudo visa garantir resultados quantitativos com maior nível de precisão, além de possibilitar a avaliação em diferentes taxas de cisalhamento, representando diferentes possibilidades de aplicação.

Dessa forma, esse trabalho foi desenvolvido objetivando a análise das propriedades reológicas das argamassas cimentícias na impressão tridimensional. Para isso, utilizou-se um traço inicialmente estipulado de argamassa cimentícia e foram realizadas substituições no componente sílica ativa, buscando a otimização da argamassa para impressão tridimensional. Com o auxílio do reômetro, os traços foram analisados em seus estados frescos (15 minutos após a adição de água na mistura) e pode-se verificar qual traço de argamassa cimentícia melhor se comporta para impressão 3D.

No traço inicialmente estipulado, foram utilizados: cimento Portland, areia (abertura 300mm), água, aditivo superplastificante (MC-Powerflow 4001), aditivo retardador (Centrament Retard Control 200) e sílica ativa. Os traços subsequentes foram definidos na tentativa de substituir a sílica ativa por outras adições minerais, escolhendo-se a cinza de casca de arroz, metacaulim e cinza volante. As proporções dos materiais na mistura são apresentadas na Tabela 1.

Os quatro traços definidos nessa pesquisa foram submetidos a três tipos de análise, a fim de qualificá-los e determinar quais os dois melhores traços para impressão tridimensional. Primeiramente, realizou-se o ensaio de índice de consistência, com a massa no estado fresco. Em sequência, fez-se corpos de prova prismáticos para a realização do ensaio de resistência à compressão e, por último, executou-se a análise do comportamento reológico.

Conforme as diretrizes da NBR 13276 (ABNT, 2016), o ensaio para determinar o índice de consistência das argamassas foi realizado utilizando a mesa de consistência. Após a abertura de todas as misturas, observou-se os seguintes resultados de espalhamento: mistura 1 – 308 mm; mistura 2 – 292 mm; mistura 3 – 359 mm; mistura 4 – 319 mm. Dessa forma, pode-se concluir que a mistura 3 possui a consistência mais fluída, enquanto a mistura 2 possui a consistência mais seca, realçando a capacidade do fluxo de cada mistura.

O ensaio de resistência à compressão seguiu as normas estabelecidas pela NBR 13279 (ABNT, 2005). Foram confeccionados três corpos de prova para cada mistura elaborada e, após 14 dias de cura, realizou-se o rompimento de cada um dos corpos de prova. A mistura 1, composta por sílica ativa, obteve como maior resultado para o ensaio 39,86 MPa. A mistura 2, com cinza de casca de arroz apresentou um valor de 30,96 MPa. Já o traço composto por metacaulim (3), resultou em uma resistência igual a 37,06 MPa. E por último, a mistura 4 de cinza volante, obteve um resultado de 24,23 MPa. Assim, verificou-se que a mistura 1 possui maior resistência a compressão, enquanto a mistura 4 possui a menor resistência.

Para avaliar as propriedades reológicas da argamassa, foi utilizado o reômetro HAAKE, modelo Viscotester iQ Air, por meio da reometria rotacional. Transcorrido dois minutos após o término da confecção de cada mistura, essas foram submetidas a análise reológica. O comportamento reológico das argamassas foi analisado variando a velocidade de rotação e medindo o torque necessário para atingir essas velocidades. O método proposto a ser utilizado é adaptação de Matos (2019) que permite visualizar a tensão de escoamento estática e a curva de fluxo da argamassa. Considerando-se que a curva de fluxo determina a dificuldade de bombeamento da argamassa na Impressora 3D e a tensão de escoamento estática, a quantidade de camadas que a argamassa irá suportar, o melhor resultado consiste em valores baixos da curva de fluxo e altos da tensão de escoamento.

A Figura 1 mostra o gráfico dos resultados da análise da curva de fluxo das argamassas. Esse gráfico é obtido por um processo no qual o fluido inicialmente em repouso é submetido a uma taxa de cisalhamento crescente até determinado limite, quando uma tensão de cisalhamento (τ) é aplicada em um elemento do fluido, é gerada uma deformação representada pela taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$). Nesse gráfico podemos determinar a força necessária para manter o bombeamento da impressora 3D e manter a aderência da mistura na superfície. Por meio deste gráfico, pode-se observar que as misturas com sílica ativa (1) e cinza volante (4) apresentaram as menores curvas de fluxo, ou seja, os menores valores de tensão para mantê-las em movimento, sem separação da mistura.

A Figura 2 apresenta o gráfico de barras do ensaio de tensão de escoamento estática. Essa tensão desempenha grande influência na impressão tridimensional, pois estabelece a capacidade do material de manter sua forma após ser extrudado e suportar as camadas subsequentes. Portanto, tensões de escoamento estática elevadas são favoráveis. Nesse ensaio, a ordem de melhor

desempenho foi, respectivamente, metacaulim (3), cinza de casca de arroz (2), sílica ativa (1) e cinza volante (4).

Por meio dos parâmetros analisados, curva de fluxo e tensão de escoamento estática, determinados no ensaio de reometria, pode-se concluir que a mistura 1 (sílica ativa) e a mistura 3 (metacaulim) obtiveram melhor construtibilidade. Visto que para o uso na impressora 3D, os ensaios de curva de fluxo e tensão de escoamento estática são os mais relevantes, a mistura 1 apresentou melhor resultado para o ensaio de curva de fluxo e um bom resultado para o ensaio de tensão de escoamento estática. Já a mistura 3, apresentou o melhor resultado para o ensaio de tensão de escoamento estática e um bom resultado para o ensaio de curva de fluxo. A mistura 2, apesar de apresentar um bom resultado no ensaio de tensão de escoamento estática, apresentou o pior resultado para a curva de fluxo, por isso foi descartada. O mesmo ocorreu com a mistura 4, que apresentou um bom desempenho na curva de fluxo, mas foi o pior desempenho na tensão de escoamento estática.

Tabela 1. Composição dos traços de argamassa cimentícia.

| Traço 1 | Cimento (g) | Areia (g) | Água (g) | Powerflow (g) | Centrament (g) | Sílica Ativa (g) |
|---------|-------------|-----------|----------|---------------|----------------|-----------------------|
| | 1500 | 1750 | 625 | 8 | 6 | 400 |
| Traço 2 | Cimento (g) | Areia (g) | Água (g) | Aditivo 1 (g) | Aditivo 2 (g) | Cinza Casca Arroz (g) |
| | 1500 | 1750 | 625 | 8 | 6 | 400 |
| Traço 3 | Cimento (g) | Areia (g) | Água (g) | Aditivo 1 (g) | Aditivo 2 (g) | Metacaulim (g) |
| | 1500 | 1750 | 625 | 8 | 6 | 400 |
| Traço 4 | Cimento (g) | Areia (g) | Água (g) | Aditivo 1 (g) | Aditivo 2 (g) | Cinza Volante (g) |
| | 1500 | 1750 | 625 | 8 | 6 | 400 |

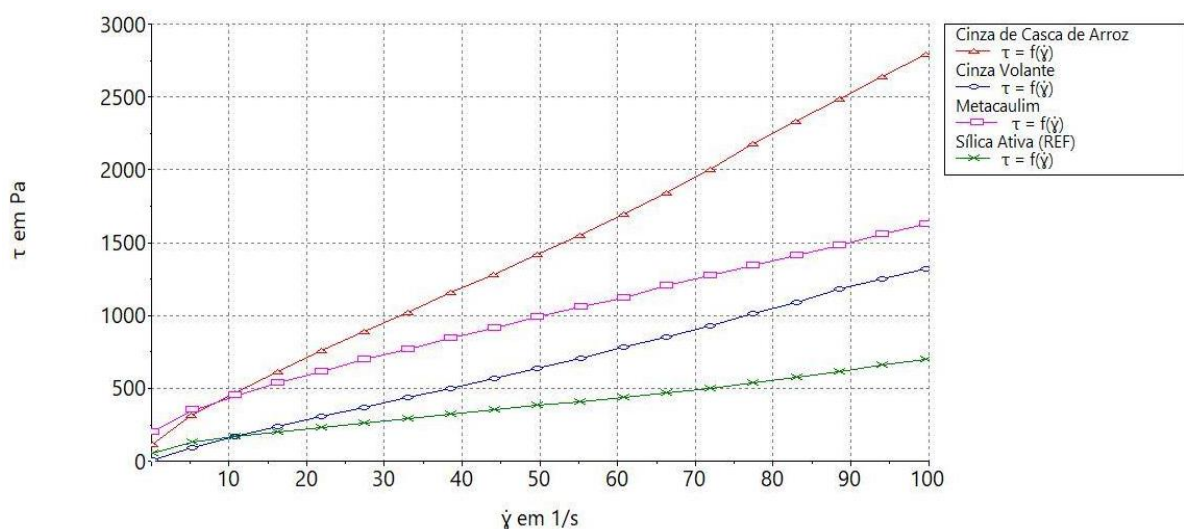


Figura 1. Gráfico Curva de Fluxo.

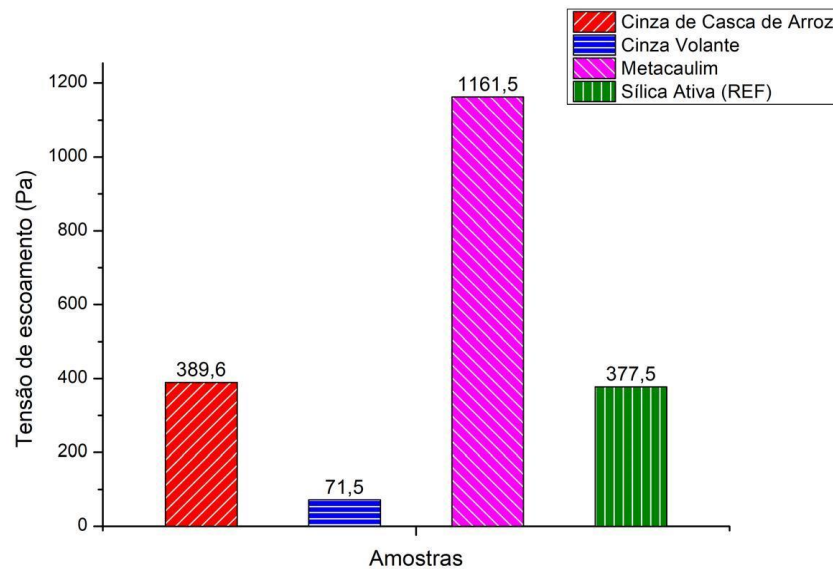


Figura 2. Gráfico Tensão Escoamento Estática.

Palavras-chave: Impressora 3D. Argamassa. Reômetro.

REFERÊNCIAS

- 1 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- 2 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- 3 - 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, Amsterdam, v. 112, p. 37-49, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617311924>. Acesso em: 28 nov. 2022.
- 4 - 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). Acesso em 2 mar 2023.
- 5 – MATOS, Paulo Ricardo de et al. **Estudo do uso de resíduo do polimento de porcelanato em concreto autoadensável.** 2019.
- 6 - OLIVEIRA, I. R; STUDART, A.R.; PILEGGI, R. G; PANDOLFELLI, V.C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas:** Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 224 p.
- 7 – QUEIROZ JUNIOR, Cleanto Carlos de. **A utilização da impressão 3D na construção civil.** 2024. 81f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.
- 8 - 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, Amsterdam, v. 122, n. 104155, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946521002237>. Acesso em: 25 nov. 2022