REOMETRIA DE ARGAMASSAS DE BAIXO CARBONO PARA IMPRESSÃO 3D

Rheometry of Low-Carbon Mortars for 3D Printing

Eduarda Araujo de Souza
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) | Belo Horizonte, MG | eduarda.a.souza@hotmail.com

Rafaela de Kássia Rodrigues e Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) | Belo Horizonte, MG | rkassia93@gmail.com

Paulo Henrique Ribeiro Borges
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) | Belo Horizonte, MG | paulo.borges@cefetmg.br

Resumo

A reometria é fundamental para a viabilidade da impressão 3D (I3D) na construção civil, influenciando a extrudabilidade e estabilidade das argamassas. Este estudo investiga argamassas de baixo carbono formuladas com coprodutos da mineração como alternativa ao cimento Portland. Foram analisadas quatro formulações utilizando um reômetro rotacional para avaliar parâmetros como tensão de escoamento e tixotropia. Os resultados indicam que a argamassa que possui 50% de escória de alto forno e 50% de estéril de mineração apresentou comportamento reológico mais próximo ao da argamassa de referência cimentícia, ou seja, comportamento reológico adequado para I3D, demonstrando, deste modo, seu potencial para aplicações em I3D. O estudo reforça a viabilidade do uso de resíduos industriais em formulações de baixo carbono, promovendo uma alternativa de baixo impacto ambiental para a construção civil.

Palavras-chave: Reometria; Impressão 3D; Argamassas de Baixo Carbono.

ABSTRACT

Rheometry is essential for the feasibility of 3D printing (3DP) in construction, influencing the extrudability and stability of mortars. This study investigates low-carbon mortars formulated with mining by-products as an alternative to Portland cement. Four formulations were analyzed using a rotational rheometer to assess parameters such as yield stress and thixotropy. The results indicate that the mortar containing 50% ground granulated blast furnace slag and 50% mining waste exhibited rheological behavior closest to the cementitious reference mortar, i.e., rheological behavior suitable for 3DP, thus demonstrating its potential for 3DP applications. The study reinforces the feasibility of using industrial waste in low-carbon formulations, promoting a low environment impact alternative for construction.

Keywords: Rheometry, 3D Printing, Low Carbon Mortars

1 INTRODUÇÃO

A reologia desempenha um papel central na implementação da Impressão 3D (I3D) na construção civil, sendo essencial para a caracterização e controle de materiais cimentícios durante as etapas de bombeamento, extrusão e deposição (Buswell *et al.,* 2018; Muthukrishnan; Ramakrishnan; Sanjayan, 2021; Nematollahi; Xia; Sanjayan, 2019; Ranjbar *et al.,* 2021). Este estudo investiga a viabilidade de utilizar coprodutos da mineração como alternativa ao cimento Portland, com foco nos parâmetros reológicos fundamentais para a I3D, como viscosidade, tensão de escoamento e tixotropia.

Os reômetros rotacionais medem a tensão de escoamento, viscosidade e taxa de consolidação estrutural (Jayathilakage; Rajeev; Sanjayan, 2022). A viscosidade influencia diretamente o bombeamento, enquanto a tensão de escoamento é determinante para a extrudabilidade e estabilidade das Camadas (NEMATOLLAHI; XIA; SANJAYAN, 2019). Misturas otimizadas precisam apresentar baixa tensão de escoamento para facilitar o escoamento, aliada à uma alta viscosidade de equilíbrio para garantir a retenção da forma após a extrusão (Ngo *et al.,* 2018). Além disso, a alta tixotropia é crucial para permitir que os materiais recuperem rapidamente sua rigidez após o cisalhamento (Jayathilakage; Rajeev; Sanjayan, 2022).

O presente estudo utiliza o teste com reômetro rotacional para avaliar o comportamento no estado fresco das argamassas propostas. Esse método possibilita compreender os desafios e ajustes necessários para desenvolver formulações de baixo carbono compatíveis com a tecnologia de I3D, contribuindo para avanços na construção sustentável e no reaproveitamento de rejeitos industriais.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste estudo foram selecionados com base na sua disponibilidade regional e potencial para reduzir impactos ambientais. A argamassa Sikacrete™-752 3D, desenvolvida para condições climáticas tropicais, foi utilizada como matriz de referência. Para formulações alternativas, empregou-se um estéril de mineração (EM), fornecido pela Vale S.A., como ligante de baixo carbono, além de areia fina de quartzo como agregado.

Como segundo ligante, foi utilizada uma escória de alto forno (EAF) granulada e moída fornecida pela Gerdau S.A. A EAF foi empregada (i) parcialmente para eventualmente contribuir (aumentar) a resistência mecânica das formulações de baixo carbono com EM; (ii) como ligante principal em uma formulação álcali-ativada.

Para as matrizes álcali-ativadas, foi utilizada uma solução alcalina contendo como ativador hidróxido de sódio (NaOH) em pellets, com pureza de 99% e silicato de sódio (Na_2SiO_3), composto de SiO_2 = 32.19%; Na_2O = 14,91%; H_2O = 52,90%, ambos fornecidos pela empresa Getex (Belo Horizonte).

2.2 MÉTODOS

A Tabela 1 mostra a matriz de formulações deste trabalho. A formulação de referência (argamassa Sikacrete® - 752 3D) é nesse trabalho denominada de argamassa de referência cimentícia (AR3D) e foi preparada com adição de água, conforme indicações do fabricante para uso em I3D, correspondendo a 16% de água em relação à massa de argamassa.

Tabela 1: Matriz de experimentos e composições

Código	EM (% massa da argamassa)	EAF (% massa da argamassa)	Areia de quartzo (% massa da argamassa)	Ativador hidróxido de sódio (% massa da argamassa)	Ativador silicato de sódio (% massa da argamassa)	Água (% massa do ligante)
AR3D	-	-	-	-	-	16
100EAF	-	100	40	3	8	40
50EAF50EM	50	50		1,5	4	39
100 EM	100	-		-	-	40

Fonte: Os autores

A segunda formulação de referência é uma argamassa com ligante 100% EAF ativado por solução de NaOH + Na_2SiO_3, aqui denominada de 100EAF. Teoricamente, essa argamassa já pode ser considerada de baixo carbono, pois não contém cimento Portland em sua constituição.

A formulação 100EM foi desenvolvida utilizando apenas o EM e a areia fina e não houve ativação alcalina, dado que, em tese, o EM não apresenta características encontradas em precursores já estabelecidos para materiais álcali-ativados. A argamassa 50EAF50EM foi elaborada utilizando EM, EAF e areia fina e foi ativada alcalinamente.

As medições dos parâmetros relacionados à reologia foram obtidas com um reômetro rotacional controlado por tensão, MCR-301 (Anton Paar GmbH, Graz, Áustria). Uma célula de material de construção em aço inoxidável (BMC-90) juntamente com um rotor de palhetas de 4 pás (ST14 -4V-35), foi empregado para medir os valores de tensão de escoamento estática. A temperatura foi mantida constante em 25,00 ± 0,05 °C. O BMC e o rotor de palhetas (tipo Vane) são totalmente compatíveis com o MCR-301.

As misturas AR3D, 100EAF, 50EAF50EM e 100EM foram preparadas em misturador de argamassa, com potência de 1000 W. A argamassa foi então transferida imediatamente para o copo do BMC-90, o copo da célula de materiais de construção foi parafusado na placa Peltier do reômetro e o rotor de 4 palhetas foi mergulhado lentamente, tomando cuidado para não tocar o fundo do copo, mas também para que a amostra cubra completamente as lâminas das palhetas. O raio interno do copo é de 35 mm.

A tensão de escoamento estática das diferentes misturas de argamassa foi medida pelo método de Nguyen & Boger, empregando um rotor de 4 pás (*Vane*) com 35 mm de altura e 14 mm de diâmetro (relação H/D = 2,5) (Nguyen; Boger, 1992). Após inserir o rotor completamente dentro da amostra, a palheta foi girada com uma velocidade angular constante de 0,1 rpm ≅ 0,01 rad/s. O torque foi registrado em função do tempo, com leitura e registro do torque a cada 0,3 s durante 120 s. Para o rotor Vane usado nos experimentos, K = 12,2 x 10–6 m^3. É importante ressaltar que, por motivos de limitações de torque do reômetro, a viscosidade das argamassas não foi medida.

Figura 1: Visualização do ensaio rotacional com a argamassa 100EAF



Fonte: Os autores

3 RESULTADOS

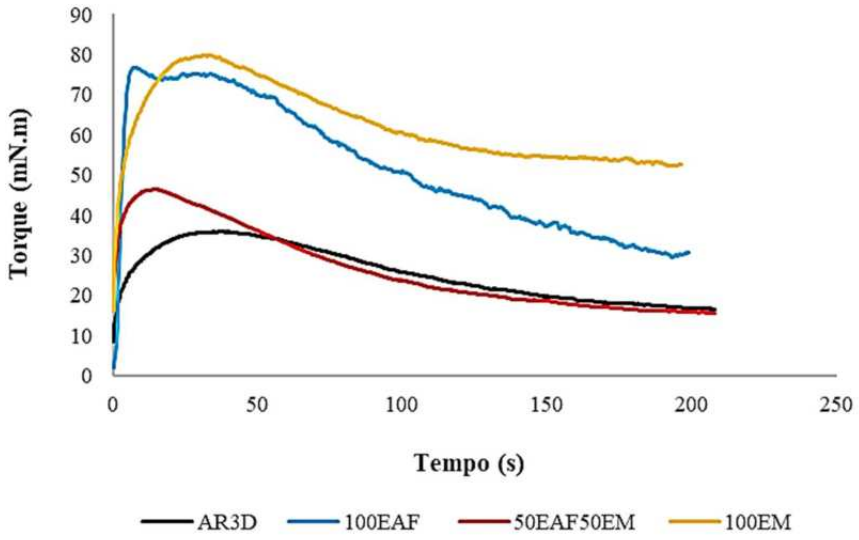
A Figura 2 mostra o Torque (mN.m) versus tempo (s) para as argamassas estudadas. O maior pico nas curvas foi usado para calcular a tensão de escoamento estática para cada argamassa e os resultados de torque máximo e tensão de escoamento são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados de coeficiente de escoamento com o rotor *Vane*

Código	Max. Torque (mN.m)	Tensão de escoamento estático (sy) (kPa)
AR3D	35,73	2,98
100EAF	76,63	6,28
50EAF50EM	46,25	3,79
100EM	79,69	6,53

Fonte: Os autores

Figura 2: Curvas que ilustram o comportamento reológico das argamassas



Fonte: Os autores

É possível observar que todas as curvas têm um pico máximo de torque, após o qual o torque decresce continuamente. Esse comportamento é característico de materiais não newtonianos (argamassas, materiais plásticos com tensão de escoamento), para os quais a tensão de cisalhamento reduz com o tempo (Assaad, 2020).

A curva referente a AR3D (cor preta) tem um pico máximo de torque relativamente baixo (35,73 mN.m) e, em seguida, o torque decai de forma contínua e estável ao longo do tempo, sugerindo que a argamassa AR3D tem uma resistência inicial moderada ao cisalhamento. A curva referente a argamassa 50EAF50EM (vermelha) possui um torque máximo um pouco mais alto (46,25 mN.m), mas seu comportamento de modo geral é o mais semelhante ao da AE3D.

A curva da argamassa 100EM (amarela) apresenta o maior pico de torque (79,69 mN.m), o que indica uma resistência inicial muito alta ao cisalhamento. Em condições de bombeamento, demandaria uma energia maior para ser trabalhada em I3D. O torque diminui de forma gradual, mas mais lentamente do que nas misturas anteriores. Isso implica que a mistura 100EM retém uma resistência maior por mais tempo, o que pode significar que esta argamassa é mais difícil de ser trabalhada, extrudada ou mantida em movimento após o início do processo de mistura ou aplicação.

Por sua vez, a argamassa 100EAF (azul) tem um pico de torque ligeiramente inferior ao da 100EM (76,63 mN.m), mas ainda é consideravelmente maior do que AR3D e 50EAF50EM. A EAF, como único ligante da argamassa, é bastante fluida nos instantes seguintes ao término da mistura. Contudo, em poucos instantes enrijece e perde sua capacidade de trabalho, mostrando pouco tempo de trabalho para uso em aplicações de I3D. Esse caráter está relacionado à uma maior quantidade de ativador ligante reativo (EAF) por volume de argamassa.

Os resultados encontrados para as tensões de escoamento estático apresentados na Tabela 2 vão de 2,98 kPa a 6,53 kPa. Estes valores estão próximos daqueles encontrados por Panda *et al.,* (2019), sendo que estes autores avaliaram formulações contendo cinzas volantes e EAF ativados pelo método de uma parte (ou seja, apenas com adição de água, sem adição de ativadores alcalinos líquidos) (Panda; Unluer; Tan, 2019). Contudo, os valores encontrados para as formulações 100EAF e 100EM são ligeiramente maiores que o maior valor encontrado pelos autores (cerca de 4,56 kPa).

Deste modo, a reometria permite inferir que a argamassa 50EAF50EM é aquela com o comportamento mais semelhante a AR3D, oferecendo menor resistência ao cisalhamento, tornando-a possivelmente mais fácil de bombear ou aplicar em processos como impressão 3D.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho investigou o comportamento de argamassas especialmente focadas para o uso em I3D, visando minimizar o impacto ambiental, com destaque para o uso de materiais de baixo carbono oriundos de

resíduos de mineração e indústria, como EAF e EM, promovendo uma alternativa com baixo impacto ambiental em relação ao Cimento Portland Foram avaliadas formulações de diferentes composições em termos de reologia, parâmetro importante para I3D.

Deste modo, a argamassa que mais favorece a aplicabilidade em I3D é a 50EAF50EM resultando em uma formulação que oferece trabalhabilidade adequada, dado seu caráter reológico, que se assemelha à argamassa de referência existente no mercado (AR3D), que apresenta comportamento reológico adequado para I3D.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, código número 001); ao Projeto Probral CAPES/DAAD (processo número 88881.701025/2022-01); ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, processo número 316882/2021-6) e à FAPEMIG (Agência de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, processo número APQ-03043-24) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ASSAAD, J. J. New Insights on the Vane Method to Evaluate Yield Stress of Cementitious Mortars. **Journal of Testing and Evaluation,** v. 48, n. 2, p. 1404–1421, 1 mar. 2020.

BUSWELL, R. A. *et al.* 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research,** 1 out. 2018.

JAYATHILAKAGE, R.; RAJEEV, P.; SANJAYAN, J. Rheometry for Concrete 3D Printing: A Review and an Experimental **Comparison. Buildings MDPI,** 1 ago. 2022.

MUTHUKRISHNAN, S.; RAMAKRISHNAN, S.; SANJAYAN, J. Effect of alkali reactions on the rheology of one-part 3D printable geopolymer concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 116, 1 fev. 2021.

NEMATOLLAHI, B.; XIA, M.; SANJAYAN, J. Post-processing methods to improve strength of particle-bed 3d printed geopolymer for digital construction applications. **Frontiers in Materials**, v. 6, 4 jul. 2019.

NGO, T. D. *et al.* Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, p. 172–196, 15 jun. 2018.

NGUYEN, Q. D.; BOGER, D. V. Measuring the Flow Properties of Yield Stress Fluids. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 24, n. 1, p. 47–88, jan. 1992.

PANDA, B.; UNLUER, C.; TAN, M. J. Extrusion and rheology characterization of geopolymer nanocomposites used in 3D printing. **Composites Part B: Engineering,** v. 176, 1 nov. 2019.

RANJBAR, N. *et al.* Rheological characterization of 3D printable geopolymers. **Cement and Concrete Research**, v. 147, 1 set. 2021.