ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS DE ARGILAS CAULINÍTICAS EM IMPRESSÃO 3D

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

INTRODUÇÃO

A mineração de ferro gera grandes volumes de rejeito, cuja disposição em barragens ocupa áreas extensas e representa um passivo ambiental expressivo. A reutilização desse material como matéria-prima em processos de fabricação digital surge como uma alternativa de destinação de maior valor agregado. A impressão 3D utilizando materiais de origem terrosa constitui uma alternativa sustentável para a construção civil, por utilizar materiais locais, residuais e com menor emissão de carbono (Gooma, 2023). Os modelos impressos podem ser aplicados em elementos arquitetônicos não estruturais, como componentes de fachada, brises e cobogós, possibilitando maior liberdade no desenvolvimento de formas arquitetônicas (Cruz et al., 2020). Entretanto, a qualidade dos modelos impressos depende tanto das condições de impressão, como altura das camadas, velocidade e a relação água/argila (Yousef et al., 2025; Asaf et al., 2023). A pesquisa tem como objetivo caracterizar essas propriedades do rejeito de ferro de natureza argilosa e investigar a viabilidade técnica de seu uso como ligante para impressão 3D. O trabalho está alinhado com quatro Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, sendo eles: ODS9 (Indústria, inovação e infraestrutura); ODS11 (Cidades e comunidades sustentávies); ODS12 (Consumo e produção responsáveis) e ODS13 (Ação contra a mudança global do clima).

DESENVOLVIMENTO

Foi utilizada uma argila caulinítica residual, extraída da mineração de ferro. A composição química foi determinada por fluorescência de raios X (S2 Puma, Bruker); a composição mineralógica foi obtida por difração de raios X (D6 Phaser, Bruker); a morfologia das partículas foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (Neo Scope, JCM-7000). Os resultados desses três ensaios estão apresentados na Figura 1.

A argila foi peneirada em uma malha de 2,36 mm, com descarte do material retido, e o passante foi moído em moinho planetário de bolas (380 rpm). Assim, obteve-se a redução do tamanho das partículas e a homogeneização do material.

Foram produzidas cinco formulações, mantendo-se constante a massa de 200g de argila e variando-se o volume de água adicionado de forma a atingir as seguintes relações água/argila: 0,65; 0,70; 0,75, 0,80 e 0,85. O procedimento padrão estabelecido para a mistura de cada relação iniciou-se com a mistura manual durante 30 segundos, seguido pela mistura mecânica com auxílio de furadeira equipada com misturador helicoidal (2800 rpm) por 1 minuto e 30 segundos e, por fim, a repetição dessas duas etapas. Com isso, obteve-se uma pasta com consistência uniforme e homogênea.

Os ensaios de impressão foram conduzidos em uma impressora 3D de extrusão pneumática Duraprinter C03, de bico extrusor de 4 mm. Os experimentos foram realizados mantendo-se a pressão de extrusão constante em 0,5 bar e velocidade de impressão de 10 mm/s, de modo a permitir que as diferenças observadas fossem atribuídas às características das misturas. Os corpos de prova eram cilíndricos, com dimensões de 50 mm de diâmetro e 60 mm de altura, com um total de 30 camadas de altura 2mm. A partir desse procedimento, foi possível

avaliar o desempenho das formulações quanto à sua extrudabilidade, definida pela capacidade de formar um filamento contínuo durante a extrusão, e à construtibilidade, relacionada à aptidão do material em sustentar sucessivas camadas depositadas sem perda significativa da estabilidade ou da forma da estrutura.

RESULTADOS

Com os experimentos realizados, foi possível determinar o intervalo de relações que satisfazem os parâmetros adequados para impressão 3D, visível na Figura 2: a relação 0,65 não extrusou adequadamente e não formou filamento, o que indica que com esse volume de água já não é possível obter uma extrusão adequada; a relação 0,70 apresentou camadas estáveis, com espessura de 6,6 mm e altura de 2 mm conforme previsto no modelo, configurando uma impressão bem sucedida; a relação 0,75 foi um pouco mais fluida, com altura da camada de 1,50 mm e espessura de 8,65 mm, mas que também ficou estável e apresentou boa construtibilidade; a relação 0,80 já apresentou fluidez excessiva, com camadas de 9.9mm de espessura e 1,50 mm de altura; e a relação 0,85 não se sustentou e não formou filamento por fluidez excessiva. Com isso, pode-se perceber que, à medida que a relação água/argila aumentava, as camadas impressas apresentavam-se progressivamente mais fluidas, o que favorecia a extrusão do material. Entretanto, quando essa relação era excessivamente elevada, a maior fluidez comprometia a capacidade das camadas de manter sua forma e sustentar as camadas seguintes, resultando na diminuição de sua altura e, consequentemente, na perda de construtibilidade. Por outro lado, relações água/argila excessivamente baixas reduziam a fluidez da mistura e dificultavam sua passagem pelo sistema de extrusão, comprometendo a extrudabilidade. Dessa forma, observa-se que tanto o excesso quanto a insuficiência de água prejudicam o processo de impressão, evidenciando a necessidade de estabelecer uma relação água/argila adequada. Assim, compreende-se as relações 0,70 e 0,75 as mais adequadas para esse tipo de argila, pois apresentaram uma boa estabilidade, extrudabilidade e construtibilidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados permitiram delimitar a janela entre os limites das relações água/argila e definir as duas relações mais adequadas para a impressão 3D, além de definir as principais condicionantes do processo, tais como a pressão constante de 0,5 bar durante e a impressão, e os procedimentos de moagem e de mistura. Com as medições da espessura e altura das camadas de cada impressão, também foi possível relacionar o espalhamento da massa com sua construtibilidade, visto que a relação 0,70, que apresentou a melhor estabilidade, teve uma altura de 2 mm como foi prevista nas medidas do modelo do cilindro.

Mais do que uma alternativa construtiva, a impressão 3D com esse rejeito representa uma via de reaproveitamento do passivo ambiental gerado pela mineração de ferro, conferindo-lhe destinação de maior valor agregado. A pesquisa poderá avançar mediante a comparação entre diferentes tipos de argila, possibilitando a análise da influência das características de cada material no processo de impressão. Além disso, poderá ser avaliada a influência do teor de caulinita na construtibilidade da mistura, buscando compreender sua relação com o comportamento do material. Por fim, o teste de diferentes geometrias para elementos arquitetônicos poderá ampliar a avaliação da aplicabilidade das misturas desenvolvidas em distintas configurações de impressão.

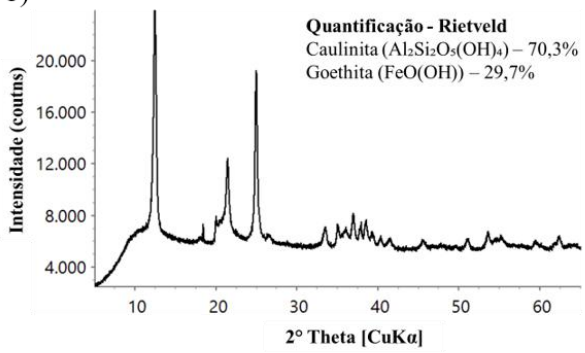
Palavras-chave: manufatura aditiva; construção com terra; fabricação digital.

ANEXOS

a)

Óxidos	%
Al_2O_3	32,97
SiO_2	33,84
TiO_2	1,44
Fe_2O_3	31,17
CaO	0,06
Outros	0,53

b)



c)

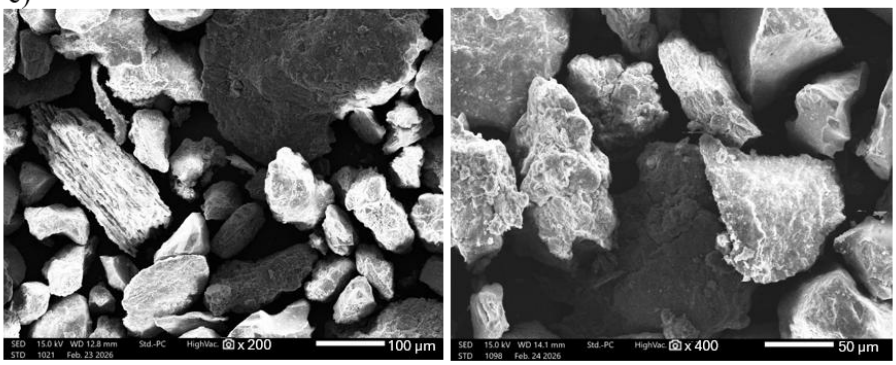


Figura. 1. *(a) Composição química (b) Composição mineralógica (c) Composição morfológica: imagem MEV ampliada x200 e x400.*

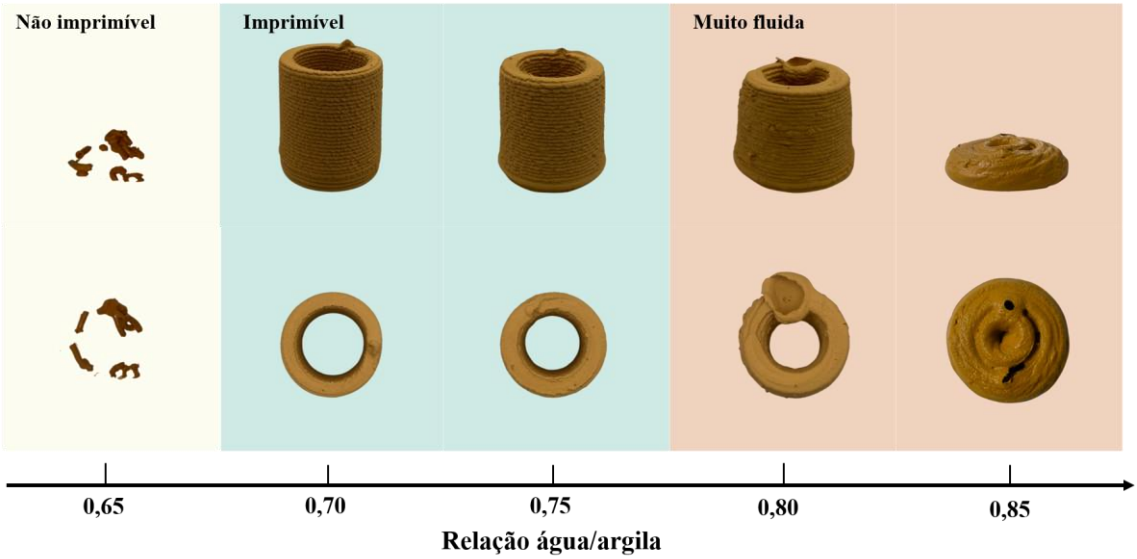


Figura 2. *Impacto da relação água/argila na construtibilidade das camadas do cilindro.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAF, O.; Bentur, A.; Larianovsky, P.; Sprecher, A. From soil to printed structures: A systematic approach to designing clay-based materials for 3D printing in construction and architecture. Construction and Building Materials, v. 408, p. 133783, 8 Dez. 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133783.

CRUZ, Paulo J. S.; FIGUEIREDO, Bruno; CARVALHO, João; CAMPOS, Tatiana. Additive manufacturing of ceramic components for façade construction. Journal of Façade Design & Engineering, v. 8, n. 1, 2020. DOI: 10.7480/jfde.2020.1.4725.

GOMAA, Mohamed; SCHADE, Sascha; BAO, Ding Wen; XIE, Yi Min. Automation in rammed earth construction for industry 4.0: precedent work, current progress and future prospect. Journal of Cleaner Production, v. 398, 136569, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136569.

YOUSAF, A.; Al Rashid, A.; Koç, M. Parameter tuning for sustainable 3D Printing (3DP) of clay structures. Journal of Engineering Research (Kuwait), v. 13, n. 3, p. 1826-1842, 2025. DOI: 10.1016/j.jer.2024.05.027