DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA PROTOTIPAGEM RÁPIDA DE EDIFICAÇÕES DE TERRA

Guilherme de Oliveira Walter[1], Guilherme Jorge Brigolini[2], Paulo Raimundo Silva[3]

Instituto Federal de Minas Gerais campus Ouro Preto; MG, Brasil
[1]guilherme.walter@ifmg.edu.br, [3]paulo.pinto@ifmg.edu.br

[2]Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto; MG, Brasil, guilherme.brigolini@ufop.edu.br

Palavras-chave: impressão 3D, prototipagem com terra, parâmetros de impressão, indústria 4.0

Resumo

Este artigo apresenta um estudo sobre a impressão 3D com terra para a prototipagem de edificações. O objetivo do estudo é avaliar parâmetros de altura de camada, velocidade de impressão e proporção terra x água, visando identificar as melhores configurações para a obtenção de resultados de qualidade. A metodologia envolveu a realização de ensaios práticos com diferentes proporções de terra e água, variando alturas de camada de impressão e utilizando bicos de diâmetros distintos. Os resultados mostraram que a proporção de 70% de terra e 30% de água proporcionou uma extrusão consistente e um fluxo contínuo do material durante a impressão. Em relação à altura de camada, valores entre 50% e 70% do diâmetro do bico garantiram camadas uniformes e uma boa aderência à superfície de impressão. Esses resultados contribuem para estabelecer parâmetros adequados e obter protótipos de alta qualidade. Além disso, este estudo destaca o potencial da impressão 3D com terra como uma técnica alinhada à Indústria 4.0. A utilização dessa tecnologia oferece benefícios como personalização de projetos, redução de custos, otimização do tempo de produção e menor impacto ambiental. A capacidade de criar estruturas complexas de forma rápida e eficiente, utilizando materiais naturais e sustentáveis, contribui para uma construção mais inteligente e responsável. Dessa forma, a impressão 3D com terra para a prototipagem de edificações apresenta-se como uma alternativa viável, desde que os parâmetros adequados sejam estabelecidos. Com o aprimoramento contínuo dos parâmetros de impressão e o desenvolvimento de novas técnicas, espera-se que essa tecnologia possa revolucionar a indústria da construção, permitindo a criação de estruturas personalizadas, eficientes e sustentáveis.

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D com terra é uma abordagem revolucionária na indústria da construção, oferecendo novas possibilidades para a prototipagem de edificações. Essa técnica permite a fabricação de estruturas arquitetônicas utilizando camadas sucessivas de material à base de terra, oferecendo benefícios significativos em termos de eficiência, sustentabilidade e personalização de projetos.

Ao explorar a literatura existente sobre a impressão 3D com terra, é evidente que essa abordagem tem despertado interesse e tem sido amplamente estudada. Pesquisadores renomados, como Gomaa et al. (2021), têm investigado os benefícios dessa técnica, destacando a redução do consumo de energia e a diminuição dos resíduos em comparação com os métodos de construção convencionais. Segundo Gomaa et al. (2021), o uso de materiais como o *cob* na impressão 3D com terra oferece vantagens significativas.

Outro aspecto importante abordado na literatura é a eficiência energética das estruturas impressas em 3D com terra. Autores como Dubor et al. (2018) enfatizam a necessidade de projetos que maximizem a eficiência energética, contribuindo para uma construção mais sustentável e com menor impacto ambiental. Dubor et al. (2018) apontam a importância de estratégias de projeto que considerem a otimização do uso de energia nesses processos.

No entanto, é importante ressaltar que a maioria dos estudos existentes se concentra na impressão 3D com terra em uma escala maior, voltada para a construção de edifícios completos. Pouca atenção tem sido dada à prototipagem em uma escala reduzida, que é

fundamental para a experimentação de parâmetros e o desenvolvimento de técnicas mais eficientes.

Nesse contexto, o presente estudo se propõe a preencher essa lacuna, concentrando-se na prototipagem de edificações em uma escala menor. O objetivo é avaliar parâmetros-chave, como a altura de camada, velocidade de impressão e proporção terra-água, para identificar as melhores configurações que resultem em protótipos de alta qualidade. Através de ensaios práticos com diferentes proporções de terra e água, variando alturas de camada e utilizando bicos de diâmetros distintos, buscou-se estabelecer parâmetros adequados para a obtenção de resultados superiores.

Ao focar a prototipagem em uma escala reduzida, o estudo visa fornecer *insights* valiosos para a aplicação da impressão 3D com terra em projetos de maior envergadura. Esses resultados podem contribuir para o aprimoramento contínuo dos parâmetros de impressão e o desenvolvimento de técnicas mais eficientes e sustentáveis.

Além disso, é importante destacar o potencial da impressão 3D com terra como uma técnica alinhada à Indústria 4.0[1]. Essa tecnologia oferece benefícios como personalização de projetos, redução de custos, otimização do tempo de produção e menor impacto ambiental.

2 OBJETIVO

O objetivo deste artigo é realizar um estudo aprofundado sobre a utilização da impressão 3D com terra para a prototipagem de edificações. Através da análise e avaliação de parâmetros de impressão, como altura de camada, velocidade de impressão e proporção terra x água da mistura, busca-se obter resultados relevantes que contribuam para o desenvolvimento e aprimoramento dessa tecnologia inovadora.

O principal objetivo é investigar os efeitos desses parâmetros na qualidade e viabilidade da impressão 3D com terra. Por meio da definição adequada da altura de camada, pretende-se garantir uma deposição precisa das camadas, assegurando a uniformidade e a aderência entre elas. Além disso, a determinação da velocidade de impressão ideal visa otimizar o tempo de produção sem comprometer a qualidade do resultado final.

Outro objetivo importante é estabelecer a proporção correta entre terra e água na mistura utilizada como matéria-prima. Essa proporção influencia diretamente a viscosidade, fluidez e adesão do material durante o processo de extrusão. Busca-se encontrar a combinação ideal que facilite a impressão, evitando obstruções na extrusora e garantindo uma deposição consistente e uniforme.

Ao atingir esses objetivos, espera-se viabilizar a prototipagem de edificações utilizando a impressão 3D com terra de forma eficiente e sustentável. Com os parâmetros de impressão estabelecidos, será possível obter estruturas de alta qualidade, com menor custo e tempo de produção, e com potencial para aplicação em diversos projetos arquitetônicos.

Com base nos resultados obtidos, espera-se contribuir para o avanço da tecnologia de impressão 3D com terra e fornecer diretrizes práticas para sua implementação. Essas informações poderão ser úteis para profissionais da área da construção civil, pesquisadores e demais interessados em explorar o potencial da impressão 3D como uma alternativa viável e sustentável para a prototipagem de edificações.

Em suma, o objetivo deste artigo é realizar um estudo abrangente dos parâmetros de impressão na impressão 3D com terra, visando aprimorar a qualidade e a eficiência desse processo e proporcionar avanços significativos no campo da prototipagem de edificações.

[1] Conceito que representa a aplicação de tecnologias digitais avançadas para tornar a produção industrial mais eficiente, flexível e conectada, envolvendo Internet das Coisas, inteligência artificial e automação avançada.

3 METODOLOGIA

3.1 Preparação do material

a) Coleta de terra: A terra utilizada neste estudo foi coletada em uma região próxima ao distrito de São Bartolomeu, em Ouro Preto, Minas Gerais (20° 20 '36.8 "S, 43° 33' 40.6"W) conforme figuras 1 e 2. A coleta foi realizada considerando a representatividade da região em relação às características desejadas para a prototipagem de edificações.

Figura 1. Google Maps. São Bartolomeu [s.l] (https://goo.gl/maps/MzPEmt4wE5LGrryQ9)

Figura 3. Coleta do material sendo realizada

b) Secagem da terra: O material coletado foi seco ao ar livre, permitindo a evaporação da umidade natural presente na terra. Esse processo de secagem foi necessário para obter uma terra com teor de umidade adequado para a impressão 3D.

c) Peneiramento da terra: Após a secagem, a terra passou por um processo de peneiramento para remover partículas com diâmetro superior a 2,0 mm. Isso foi feito para obter uma terra fina, livre de fragmentos maiores que poderiam comprometer a extrusão adequada durante a impressão.

3.2 Montagem da impressora 3D

a) Modelo de impressora: A impressora utilizada foi baseada no modelo MPCNC (Mostly Printed CNC), conforme figura 3 Esse modelo foi escolhido devido à sua versatilidade e capacidade de testar diferentes materiais como material de impressão 3D[2].

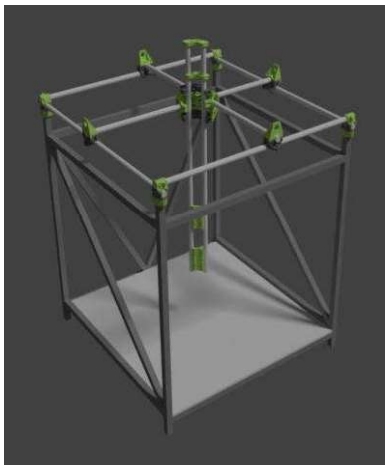

Figura 3. Estrutura da impressora e sistema de movimentação

[2] disponível gratuitamente no site https://www.v1engineering.com/

b) Construção da impressora: A impressora foi montada utilizando tubos de aço de 25,4 mm de diâmetro e peças de ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) e PLA (poliácido láctico) impressas em uma impressora 3D do tipo FDM (*fused deposition modeling*). A área de impressão da máquina foi configurada para 60 cm x 60 cm x 60 cm, proporcionando espaço suficiente para a impressão de unidades modulares de edificações.

c) Extrusora: Optou-se pela utilização de uma extrusora do tipo êmbolo para a extrusão do material. Essa escolha foi feita levando em consideração a capacidade de extrusão precisa e controlada que esse tipo de extrusora oferece.

A extrusão de um material com grande concentração de argila apresenta uma série de desafios devido às características desse material. Keep (2020a) apresenta o comportamento da argila em densificar sob valores mais elevados de pressão, ou seja, a ocorrência da separação da argila e da água dentro do tubo de extrusão, o que acarreta a deposição da argila seca nas paredes do tubo, conforme a figura 4. Devido a este fator, a utilização de um bico afunilado se torna desfavorável à extrusão, sendo que, dessa maneira, a argila seca poderá obstruir o bico, aumentando a pressão necessária para extrusão.

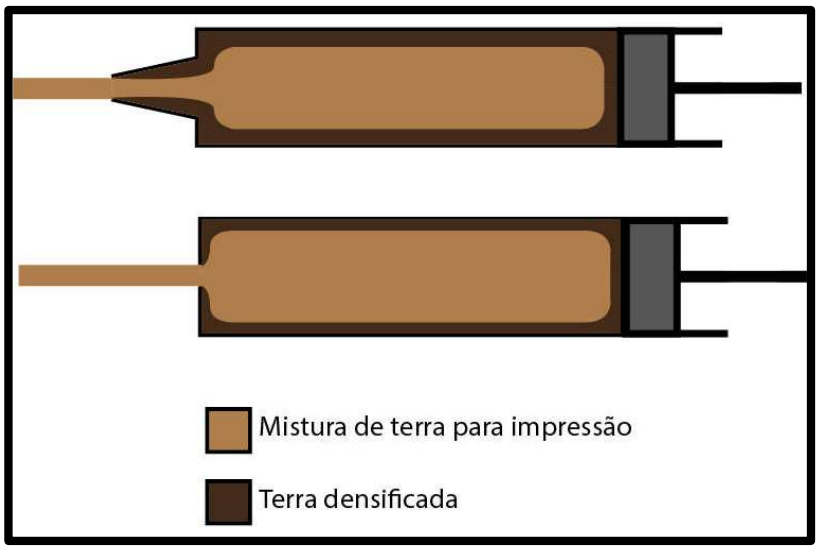

Figura 4. Fenômeno da densificação do material nas paredes da extrusora (adaptado Keep, 2020a)

3.3 Ensaios de trabalhabilidade

Mistura terra-água: Para avaliar a trabalhabilidade da terra como material de impressão, foram realizados testes de mistura da terra com diferentes proporções de água. A consistência e a qualidade do fluxo da mistura foram observadas, juntamente com a capacidade da extrusora de bombear o material sem vazamentos excessivos ou alta pressão.

3.4 Ensaios de velocidade de impressão

a) Cálculo da densidade da mistura: Com base nos melhores resultados dos testes de trabalhabilidade, foi calculada a densidade da mistura terra-água (equação 1). Esse cálculo permitiu mensurar a massa de material extrusado por milímetro de extrusão em cada diâmetro de bico utilizado.

$$d = \frac{m}{V} \quad (1)$$

onde:

d = densidade do material [g/mm³];

m = massa da mistura [kg];

V = volume do material medido.

b) Medição da vazão: Para determinar a velocidade de impressão adequada, o material extrusado foi coletado durante um minuto, obtendo-se a vazão de material extrusado nesse período.

c) Determinação da velocidade de impressão: Com base na vazão obtida, foi possível calcular (equação 2) a velocidade de impressão em milímetros por minuto (unidade utilizada para configuração no g-code). Para realização desse cálculo considerou-se as dimensões conforme demonstrado na figura 5.

$$V_{impressão} = \frac{Q}{m} \quad (2)$$

onde:

$V_{impressão}$ = velocidade de impressão [mm/min];

Q = vazão [g/min];

m = massa de 1mm de camada impressa [g].

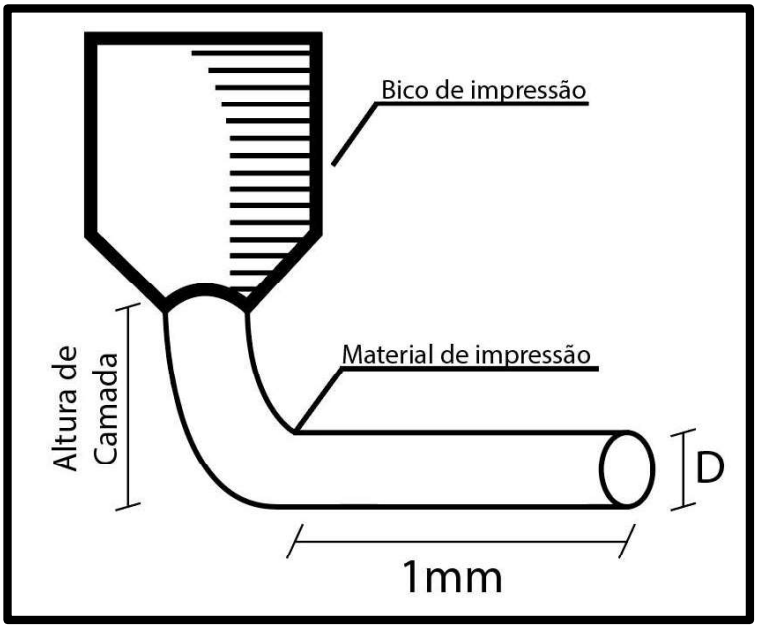

Figura 5. Dimensões utilizadas para o cálculo da velocidade de impressão

3.5 Ensaios de variação da altura da camada

Definição da altura de camada: Foi realizado um ensaio variando a distância entre o bocal e a superfície de impressão para determinar a altura de camada ideal. Essa altura deve permitir que o material seja depositado sobre a superfície de impressão de maneira adequada, evitando amassamento e garantindo um bom assentamento do material. Com base nos valores obtidos neste ensaio calculou-se (equação 3) o fator de amassamento da camada para avaliação dos efeitos com diferentes diâmetros dos bicos.

$$\text{Fator de amassamento da camada} = \frac{\text{Espessura da camada (mm)}}{\text{Diâmetro do bico de impressão (mm)}} \quad (3)$$

3.6 Produção de unidades modulares

Geometria das unidades modulares: Com base nos parâmetros estabelecidos nos ensaios anteriores, foram produzidas unidades modulares seguindo um desenho específico (figura 6). Essas unidades foram projetadas para criar uma maior superfície de contato com o ar, acelerando o processo de secagem dos blocos e reduzindo seu peso.

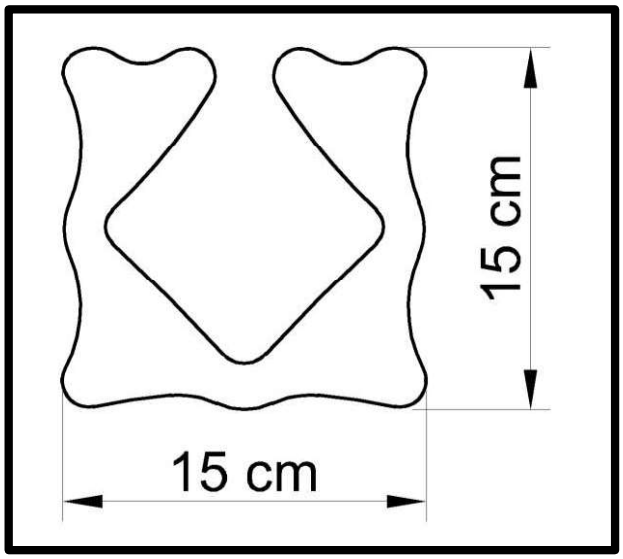

Figura 6. Desenho e medidas da unidade modular

A metodologia adotada neste estudo permitiu uma análise abrangente dos parâmetros de impressão 3D com terra para a prototipagem de edificações. Desde a preparação do material até a produção das unidades modulares, cada etapa foi cuidadosamente planejada e executada visando obter resultados precisos e confiáveis.

4 RESULTADOS

4.1 Preparação do material

Terra fina seca ao ar: Para a impressão 3D com terra, foi utilizada terra proveniente de uma região próxima ao distrito de São Bartolomeu em Ouro Preto, Minas Gerais. A terra foi coletada e submetida ao processo de secagem ao ar livre. Em seguida, passou por um processo de peneiramento para remover partículas com diâmetro superior a 2,0 mm, resultando em uma terra fina seca ao ar. Esse processo permitiu obter um material com características adequadas para a impressão 3D.

4.2 Trabalhabilidade do material

No processo de definição da proporção terra-água a ser utilizada para as prototipagens, foram adotadas referências da literatura. De acordo com Veliz Reyes et al. (2018), a proporção ideal para a impressão 3D com terra é de 75% de terra e 25% de água, sendo essa a primeira mistura testada com a extrusora desenvolvida. No entanto, constatou-se que a liquidez do material nessa proporção não era suficiente para viabilizar a impressão, resultando em altos valores de pressão que danificaram a extrusora durante o processo.

Diante desse desafio, prosseguiram-se os testes com o objetivo de encontrar uma proporção mais adequada. Aumentando a quantidade de água na mistura, foi adotada a proporção de 70% de terra e 30% de água, o que permitiu a extrusão do material de forma consistente e contínua. Essa proporção foi escolhida levando em consideração que proporções mais elevadas de água tornaram a mistura menos propícia para manter a consistência após a extrusão.

Um dos principais desafios enfrentados nessa etapa foi o desenvolvimento da extrusora, devido aos esforços elevados gerados pela alta pressão necessária para bombear o material. A partir da prototipagem de diversos modelos, foi possível montar uma extrusora capaz de resistir aos esforços durante a extrusão do material, garantindo simultaneamente um fluxo contínuo do material pelo bico de extrusão.

Dessa forma, a definição da proporção terra-água e o desenvolvimento da extrusora foram aspectos cruciais para o sucesso das prototipagens em impressão 3D com terra. Essas etapas

de experimentação e aprimoramento tecnológico foram fundamentais para estabelecer condições adequadas de impressão e garantir a qualidade dos resultados obtidos.

4.3 Velocidade de impressão

a) Densidade da mistura: No cálculo da densidade do material, utilizou-se um recipiente de 100 ml ou 100000 mm³, o qual foi preenchido com a mistura de terra e água na proporção empregada para a impressão. Em seguida, o recipiente foi pesado, descontando-se o seu peso próprio, por meio de uma balança da marca Toledo, modelo 9094 plus. Esse procedimento foi repetido cinco vezes com o objetivo de obter uma média dos valores.

Após a obtenção desses resultados, realizou-se o cálculo da densidade do material utilizando a equação 1, o que resultou em um valor médio de 0,002 g/mm³.

Tabela 1. Valores de densidade e valores médios determinados durante o ensaio

Amostra	1	2	3	4	5	Média
Massa da mistura [kg]	0,172	0,175	0,169	0,172	0,168	0,171
Densidade [g/mm³]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

A determinação precisa da densidade do material é de suma importância para compreender suas propriedades físicas e desempenho durante o processo de impressão 3D. Através desse procedimento, foi possível obter um valor médio confiável que servirá como base para a análise e ajuste dos parâmetros de impressão, visando a obtenção de resultados de alta qualidade.

b) Velocidade de impressão: A velocidade de impressão foi determinada a partir da medição da vazão de material extrusado. Para cada diâmetro de bico e densidade de mistura, foi possível obter uma velocidade de impressão em milímetros por minuto conforme tabela 2. Essa velocidade foi ajustada para garantir uma fluidez adequada do material durante a impressão e uma deposição precisa sobre a superfície de impressão.

Tabela 2. Valores medidos durante o ensaio e a velocidade de impressão calculada

Discriminação	Bico 1,0 cm	Bico 1,5 cm
Diâmetro [mm]	10	15
Área [mm²]	75,5	176,7
Massa[g]	0,134	0,300
Velocidade de impressão [mm/min]	4044	1798

4.4 Altura da camada

Altura de camada ideal: Os ensaios foram realizados para avaliar a variação da altura da camada durante a impressão seguindo os valores descritos na tabela 3. Diferentes distâncias entre o bocal e a superfície de impressão foram testadas. Verificou-se que uma distância muito pequena resultava em amassamento do material e camadas mais espessas, enquanto uma distância muito grande comprometia o assentamento do material e resultava em camadas mais finas (figura 7). Através dos testes, foi possível determinar a altura de camada ideal que proporcionou uma deposição adequada do material sobre a superfície de impressão conforme valores descritos nas tabelas 4 e 5.

Tabela 3. Valores de altura de camada adotados para realização dos ensaios

Diâmetro do bico [cm]	Altura de camada				
	20%	40%	50%	70%	90%
1	0,2 cm	0,4 cm	0,5 cm	0,7 cm	0,9 cm
1,5	0,3 cm	0,6 cm	0,75 cm	1,05 cm	1,35 cm

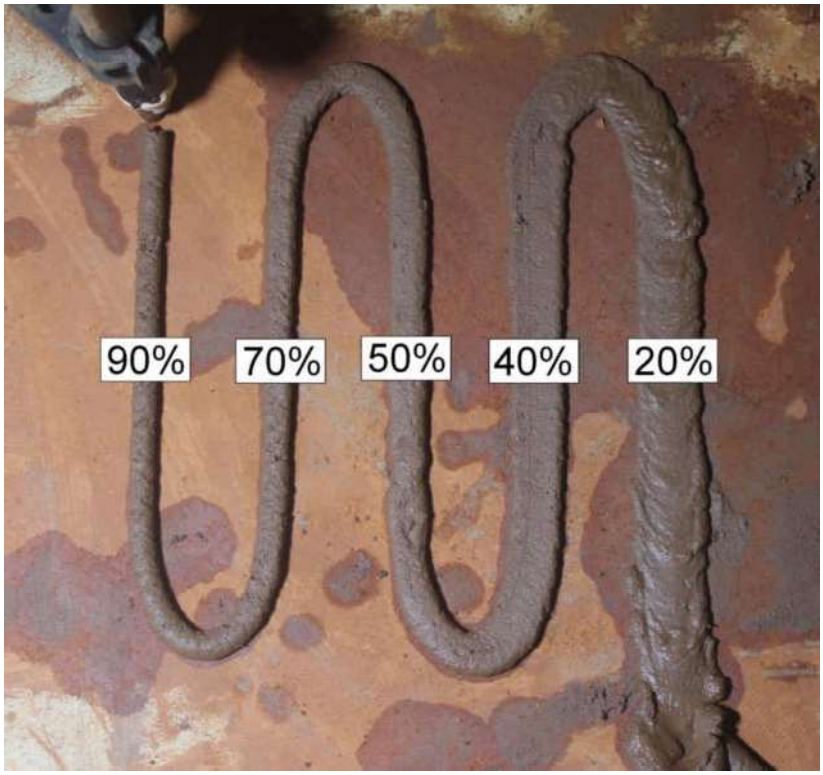

Figura 7. Ensaio de altura de camada e respectivos valores (crédito: G. Walter)

Tabela 4. Valores obtidos durante a realização do ensaio de altura de camada para o bico de 1,0 cm.

Bico de 1,0 cm	Altura da camada				
	20%	40%	50%	70%	90%
Espessura da camada (mm)	37	29	29	26	18
	38	31	29	27	19
	36	30	28	25	16
Espessura da camada média (mm)	37	30	29	26	18
Fator de amassamento da camada	3,71	3,01	2,88	2,60	1,79

Tabela 5. Valores obtidos durante a realização do ensaio de altura de camada para o bico de 1,5 cm

Bico de 1,5 cm	Altura da camada				
	20%	40%	50%	70%	90%
Espessura da camada (mm)	39	27	22	15	14
	34	27	21	15	14
	37	31	20	16	14
Espessura média da camada (mm)	37	28	21	15	14
Fator de amassamento da camada	2,45	1,90	1,41	1,02	0,93

4.5 Produção de unidades modulares

As unidades foram impressas conforme os diâmetros do bico e velocidades de impressão especificadas. Após a conclusão da impressão, foram deixadas secando à sombra por quatorze dias. Após esse período, as unidades adquiriram integridade o suficiente para serem manuseadas sem quebrar, como ilustrado na figura 8.

Figura 8. Unidade modular de impressão 3D de terra com suas camadas uniformes e bem definidas

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a impressão 3D com terra para a prototipagem de edificações é viável, desde que os parâmetros adequados sejam estabelecidos. Através da avaliação dos parâmetros de impressão, foi possível definir condições ideais para a produção de unidades modulares. Essa técnica apresenta potencial para inovação na indústria da construção civil, especialmente dentro do contexto da Indústria 4.0. A impressão 3D com terra pode oferecer possibilidades de construção mais eficiente, sustentável e personalizada, contribuindo para a transformação do setor.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo, foi realizado um exame detalhado da impressão 3D com terra para a prototipagem de edificações. Os parâmetros de impressão, como altura de camada, velocidade de impressão e proporção terra-água da mistura, foram cuidadosamente avaliados para determinar as condições ideais de impressão.

Os resultados obtidos demonstraram que a utilização de terra fina seca ao ar como material de impressão é viável, desde que seja adequadamente preparada e combinada com uma proporção apropriada de água. A trabalhabilidade do material foi essencial para garantir um fluxo suave durante a extrusão e a deposição precisa sobre a superfície de impressão.

A determinação da velocidade de impressão e da altura de camada ideais também desempenhou um papel crucial na obtenção de resultados satisfatórios. Através de testes e ajustes cuidadosos, foi possível estabelecer parâmetros que resultaram em uma impressão precisa, com camadas bem assentadas e uma geometria adequada.

Além disso, a produção das unidades modulares confirmou o potencial dessa técnica como uma alternativa inovadora na indústria da construção civil. A utilização da impressão 3D com terra possibilitou a criação de estruturas modulares com maior eficiência, redução de peso e aceleração do processo de secagem.

No contexto da Indústria 4.0, a impressão 3D com terra se destaca como uma tecnologia promissora, permitindo a personalização e a fabricação digital de elementos construtivos. Essa abordagem oferece oportunidades para a construção de edificações mais sustentáveis, econômicas e adaptáveis às necessidades específicas dos projetos.

Portanto, os resultados deste estudo reforçam a viabilidade e o potencial da impressão 3D com terra para a prototipagem de edificações. As descobertas obtidas podem servir de base para pesquisas futuras e contribuir para o avanço dessa tecnologia na indústria da construção, impulsionando a busca por soluções mais eficientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dubor, A.; Cabay, E.; Chronis, A. (2018). Energy efficient design for 3D printed earth architecture. Humanizing Digital Reality. Springer, Singapore. p. 383-393. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6611-5_33

Gomaa, M.; Jabi, W.; Reyes, Aa V.; Soebarto, V. (2021). 3D printing system for earth-based construction: case study of cob. Automation In Construction, [S.L.], v. 124, Elsevier. http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103577.

Keep, J. (2020a). 10 years of extrusion 3D printing: part 2. <https://www.youtube.com/watch?v=MS8IEndyHcQ&t=465s>. Acesso em 20/09/2022.

Keep, J. (2020b). Guide to clay 3D printing. http://www.keep-art.co.uk/journal_1.html. Acesso em: 19 setembro 2022.

Veliz Reyes, A.; Gomaa, M.; Chatzivasileiadi, A.; Jabi, W.; Wardana, N. (2018). Computing craft – early stage development of a robotically-supported 3D printing system for cob structures. 10.52842/conf.ecaade.2018.1.791.

AUTORES

Guilherme de Oliveira Walter, mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (2022). Atualmente é Técnico de Laboratório - Automação do Instituto Federal Minas Gerais e Professor Voluntário do Instituto Federal de Minas Gerais Campus Ouro Preto. Tem experiência na área de Engenharia Civil. Atuando principalmente nos seguintes temas:prototipagem rápida, construção civil, arquitetura com terra. Currículo completo em http://lattes.cnpq.br/2016352193152581.

Guilherme Jorge Brigolini, mestre em Ciência dos Materiais, Doutor em Ciência dos Materiais pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (2011). Atualmente é professor da Universidade Federal de Ouro Preto e coordenador do Grupo de Pesquisas ATIVE. Currículo completo em http://lattes.cnpq.br/8755682183778618.

Paulo Raimundo Pinto, mestre (2005) e doutor (2008) pela Universidade Federal de Viçosa, atuando em desenvolvimento de sistemas de instrumentação e controle eletrônico aplicados. É professor do Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Ouro Preto, no departamento de Automação Industrial. Em novembro de 2019 foi promovido à classe de professor titular. Currículo completo em http://lattes.cnpq.br/8158865847990189.