XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8737

# Desenvolvimento e Validação de uma Impressora 3D de Bancada para Argamassas

## Development and Validation of a Bench-Scale 3D Printer for Cementitious Mortar

**Willer Mota Ferreira**
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | willer.ferreira@discente.ufg.br
**Patricia Aparecida Lima Borges**
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | patricia.borges@discente.ufg.br
**Helena Carasek**
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | hcarasek@ufg.br

### Resumo

A impressão 3D de concretos e argamassas tem se destacado como alternativa promissora na construção civil, o que demanda o desenvolvimento de equipamentos acessíveis para estudos laboratoriais e para a investigação de parâmetros de impressão. Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento e a operação de uma impressora 3D de bancada para argamassas. A metodologia consistiu na construção de um sistema cartesiano de baixo custo, com estrutura em perfis de alumínio, acionamento por motores de passo controlados por Arduino/RAMPS e extrusão semiautomatizada por pistola de calafetação. Foram realizados testes experimentais para avaliar a movimentação, a repetibilidade de posicionamento e a deposição do material cimentício. Os resultados demonstraram que o equipamento apresenta capacidade funcional para impressão, com desempenho satisfatório na deposição. A compatibilização entre a taxa de extrusão e a velocidade de deslocamento permitiu obter elementos com maior estabilidade geométrica e adequada continuidade dos filamentos, evidenciando a viabilidade do sistema para aplicações experimentais em laboratório.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Extrusão. Automação. Tecnologia construtiva.

### Abstract

*3D concrete printing has emerged as a promising alternative in the construction industry, requiring the development of accessible equipment for laboratory studies and the investigation of printing parameters. This work aims to develop, assemble, and operate a bench-scale mortar 3D printer. The methodology consisted of constructing a low-cost Cartesian system with an aluminum profile structure, driven by stepper motors controlled by Arduino/RAMPS and a semi-automated extrusion system using a caulking gun. Experimental tests were carried out to evaluate movement, positioning repeatability, and material deposition. The results demonstrated that the equipment has the functional capability for printing, with satisfactory material deposition performance. The compatibility between extrusion rate and travel speed enabled the production of elements with improved geometric stability and filament continuity, demonstrating the system's feasibility for experimental laboratory applications.*

*Keywords: Additive Manufacturing. Extrusion. Automation. Construction Technology.*

## INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, consolidou-se nas últimas décadas como uma das tecnologias mais promissoras da era digital.

Originalmente utilizada em prototipagem e design industrial, sua aplicação vem se expandindo para áreas diversas, como a medicina, a indústria alimentícia e, mais recentemente, a construção civil [1][2]. No setor da construção, a impressão 3D está deixando de ser apenas um estudo de laboratório para se tornar um recurso viável para a produção de estruturas em escala real, despertando grande interesse da área devido à liberdade projetual e ao potencial de transformação do setor [3].

O sistema construtivo tradicional sempre enfrentou limitações relevantes, como elevados custos de execução, desperdício de materiais, baixa produtividade, altos índices de acidentes em canteiros e impactos ambientais decorrentes do consumo de recursos e da geração de resíduos [4][5]. Nesse contexto, a impressão 3D de concretos e argamassas surge como uma alternativa tecnológica capaz de oferecer maior eficiência, redução de tempo e de custos, menor demanda de mão de obra, além de mitigar impactos ambientais e ampliar as possibilidades arquitetônicas [6][7].

Alguns requisitos fundamentais devem ser cumpridos no processo de impressão 3D de argamassas para garantir a qualidade final das peças. Entre eles, destacam-se a extrudabilidade, que assegura o fluxo contínuo do material pelo bico; a capacidade de construção, relacionada à resistência das camadas inferiores a suportar as superiores; e a janela de impressão, que define o intervalo de tempo durante o qual a mistura mantém propriedades adequadas à deposição [8][9].

Além das características do material, fatores operacionais da impressora exercem influência decisiva, como o tipo de extrusora, a velocidade e a taxa de extrusão, o formato, a altura e as dimensões do bico, bem como o intervalo entre as deposições sucessivas de camadas. A interação entre as propriedades do material e os parâmetros do equipamento é, portanto, determinante para a obtenção de elementos impressos com boa estabilidade, precisão geométrica e desempenho mecânico [10].

Diante desse cenário, observa-se que o desenvolvimento da impressão 3D em argamassa depende de uma abordagem interdisciplinar que integre engenharia, ciência da computação, automação e arquitetura. O avanço conjunto de hardware, software e formulações cimentícias é essencial para que a tecnologia supere a fase experimental e se consolide como alternativa prática e sustentável na construção civil.

Entretanto, apesar dos avanços em materiais e estratégias de deposição, ainda há carência de pesquisas sobre impressoras de argamassa acessíveis para uso laboratorial. Os equipamentos disponíveis são, em geral, de alto custo e voltados ao uso industrial, o que limita sua aplicação em estudos experimentais. Assim, a criação de impressoras de bancada de baixo custo é fundamental para viabilizar ensaios controlados e a avaliação de misturas e de parâmetros de deposição.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma impressora 3D de bancada para argamassas, capaz de atender aos requisitos básicos para a realização de testes experimentais em laboratório.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8737

## MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida com abordagem experimental, envolvendo o projeto, a montagem e os testes de operação de uma impressora 3D de bancada para argamassas, com foco na aplicação em laboratório.

A estrutura da impressora 3D de bancada (Figura 1) é composta por um sistema cartesiano formado por perfis de alumínio extrudado com ranhuras, permitindo montagem modular e ajuste dos componentes. O equipamento é caracterizado como uma fresadora CNC da marca FORSETI, que utiliza atuadores lineares com fusos trapezoidais responsáveis pelo deslocamento dos eixos. O movimento é guiado por rodas com rolamentos, o que garante baixo atrito e alta precisão. A fixação dos elementos estruturais é realizada por meio de parafusos e porcas específicos para os perfis, o que possibilita ajustes de alinhamento.

**Figura 1: Vista da impressora 3D de bancada**




Fonte: os autores.

O sistema também conta com acoplamentos flexíveis para a ligação entre o motor e o fuso, reduzindo desalinhamentos, além de dispositivos que minimizam as folgas mecânicas. Elementos auxiliares, como porta-cabos e pés de apoio, completam a estrutura, proporcionando organização e estabilidade ao conjunto. O Quadro 1 apresenta um resumo dos principais componentes da estrutura da impressora.

**Quadro 1: Principais componentes da impressora de bancada desenvolvida**

| CATEGORIA | COMPONENTE | FUNÇÃO | REPRESENTAÇÃO |
|---|---|---|---|
| Estrutura | Perfis de alumínio V-Slot | Base estrutural |  |
| Movimento | Atuadores lineares | Movimento dos eixos |  |

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8737

| | | | |
|---|---|---|---|
| Movimento | Fuso trapezoidal | Transmissão de movimento |  |
| Movimento | Rodas com rolamento | Guiamento |  |
| Transmissão | Acoplamento flexível | Fixação |  |
| Suporte | Suportes impressos em 3D | Suporte da pistola de calefetagem. |  |

Fonte: Os autores, com imagens adaptadas de [11], [12].

O sistema elétrico e de controle da impressora 3D de argamassa é composto por um conjunto integrado de dispositivos responsáveis pelo acionamento e coordenação dos movimentos da máquina (Quadro 2). Esse sistema inclui o computador, responsável pelo envio dos comandos, a placa controladora, os drivers de potência, os motores de passo, a fonte de alimentação e os dispositivos de segurança.

**Quadro 2: Dispositivos elétricos e de controle da impressora**

| CATEGORIA | ITEM | DESCRIÇÃO | EQUIPAMENTO |
|---|---|---|---|
| Controle | Arduino Mega 2560 | Placa controladora principal |  |
| | RAMPS 1.4 | Shield acoplado ao Arduino para controle de drivers e periféricos |  |
| | Drivers de motor de passo | 4 unidades (um por eixo X, Y1, Y2 e Z) |  |
| Alimentação | Fonte chaveada | 24V, 15A – usada para alimentar drivers e motores. |  |
| | Botão de emergência (E-Stop) | Interruptor de segurança, liga/desliga todo o sistema. |  |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Motores | Motores de passo NEMA 23 | Eixos X, Y (2 motores em paralelo) e Z |  |
| Sensores | Fim de curso (limit switch) | Instalação para referência dos eixos |  |

Fonte: Os autores, com imagens adaptadas de [11], [13].

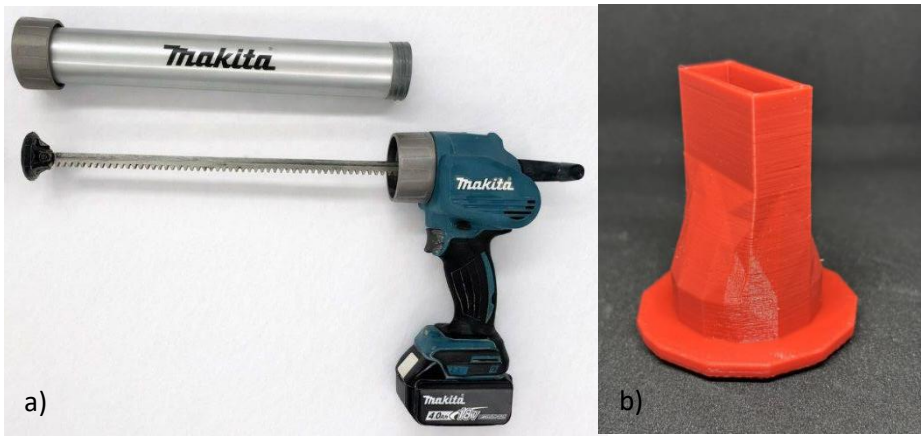
A integração desses componentes permite o controle preciso dos deslocamentos nos três eixos cartesianos, garantindo repetibilidade e estabilidade operacional durante o processo de impressão.

O sistema de extrusão foi desenvolvido a partir da adaptação de uma pistola elétrica de calafetação (Figura 2a), equipada com um cilindro de capacidade nominal de 600 $cm^3$, acoplada ao pórtico, permitindo a deposição de argamassa em camadas. A extrusão do material foi realizada de forma independente do sistema automatizado de movimentação, caracterizando uma operação semiautomática.

O bico de impressão (Figura 2b), com seção de saída de 3 cm × 1 cm, foi projetado por meio do software Autodesk Fusion 360 e fabricado por impressão 3D utilizando ácido polilático (PLA), um polímero termoplástico biodegradável amplamente empregado na manufatura aditiva devido à sua facilidade de processamento, estabilidade dimensional e baixo custo.

A operação integrada entre o sistema de movimentação, o bico de impressão e o sistema de extrusão possibilita o sincronismo entre o deslocamento do bico e a extrusão da argamassa, assegurando a deposição contínua, uniforme e controlada do material ao longo da trajetória de impressão.

**Figura 2: Partes do sistema de extrusão: a) Pistola de calafetação; b) Bico modelado e impresso em PLA**



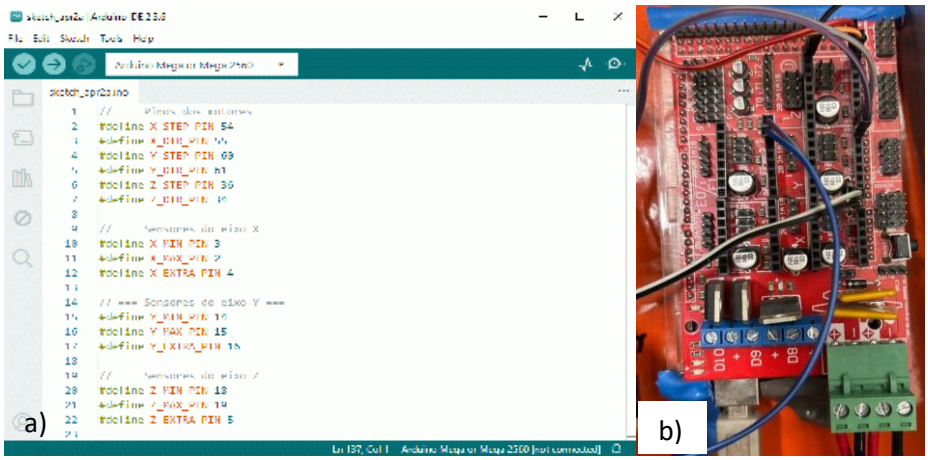

Fonte: os autores.

O sistema de controle é composto por um computador (PC), responsável pelo envio de comandos em G-code (linguagem de controle numérico usada para controlar máquinas CNC, como impressoras 3D), uma placa Arduino Mega 2560 e uma interface RAMPS 1.4, responsáveis pelo processamento e pela distribuição dos sinais de controle

(Figura 3b). Os motores de passo foram acionados por drivers de potência, alimentados por uma fonte chaveada de 24 V.

A programação do sistema foi desenvolvida em linguagem C++, utilizando o ambiente Arduino IDE (Figura 3a), sendo responsável pelo controle automatizado de um sistema cartesiano de três eixos (X, Y e Z). Inicialmente, o sistema executa uma rotina automática de movimentação, na qual os eixos são acionados conforme trajetórias previamente definidas no código.

**Figura 3: Arduino IDE: a) Layout do software; b) Arduino Mega 2560**




Fonte: os autores.

O algoritmo implementado possibilita o controle preciso dos deslocamentos nos eixos cartesianos, contemplando a definição do sentido de movimento, a geração de pulsos para acionamento dos motores de passo e o ajuste da velocidade por meio do controle da frequência de pulsos (temporização). Adicionalmente, foram estabelecidos dois modos de operação: (i) automático, destinado à execução de trajetórias previamente programadas, e (ii) manual, baseado na leitura dos sensores de fim de curso, o que permite o posicionamento controlado e seguro do sistema.

Sensores de fim de curso foram instalados nos limites dos eixos X, Y e Z, conectados às entradas digitais da placa controladora (Figura 3b), com a finalidade de realizar o referenciamento e impedir deslocamentos além dos limites físicos do equipamento. Complementarmente, foi incorporado um botão de parada de emergência, instalado em série com a alimentação elétrica, o que possibilita o desligamento imediato do sistema em situações de risco operacional.

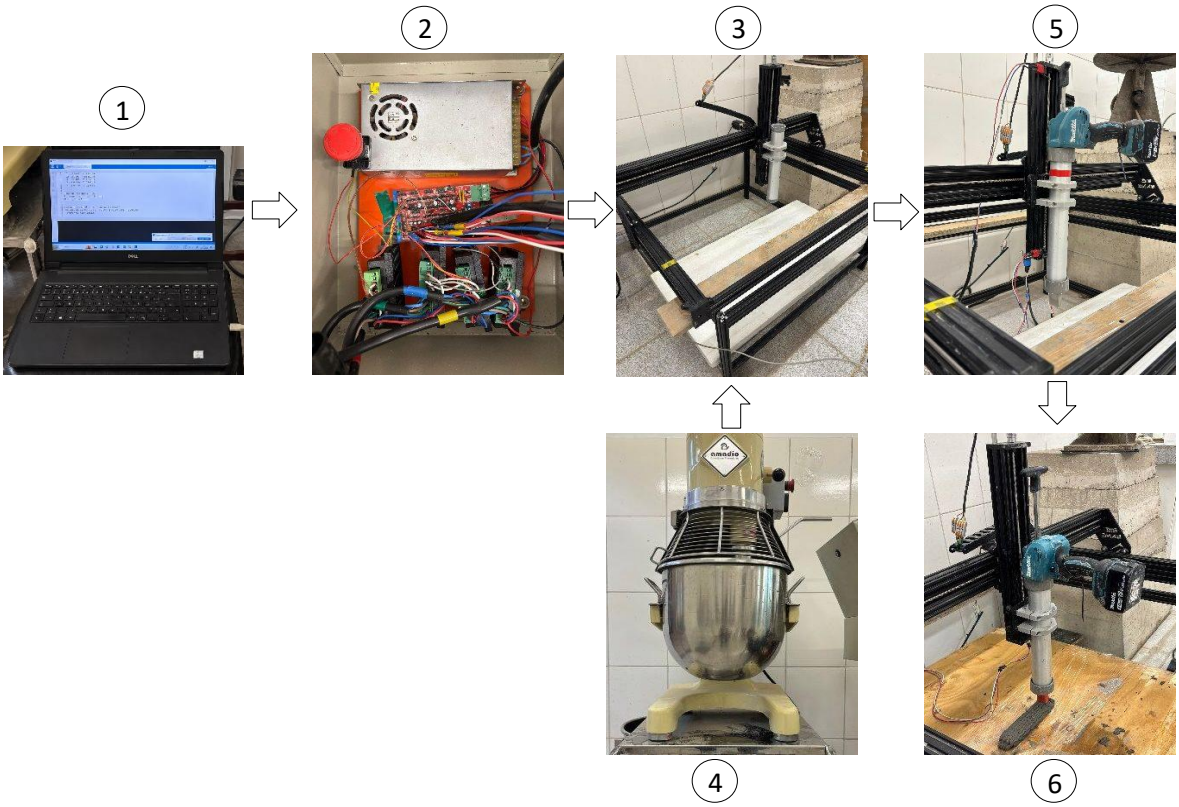
Os testes operacionais foram divididos em duas etapas. Na etapa preliminar, foram impressos seis corpos de prova com 40 cm de comprimento, constituídos por duas camadas sucessivas. Considerando a geometria nominal do cordão extrudado (3 cm × 1 cm por camada), cada corpo de prova demandou aproximadamente 240 cm³ de argamassa. Esses ensaios tiveram como objetivo ajustar os parâmetros operacionais, especialmente a compatibilização entre a taxa de extrusão e a velocidade de deslocamento da impressora.

Após a definição dos parâmetros operacionais, foi realizada a etapa final de validação funcional, na qual foram impressos corpos de prova com 40 cm de comprimento, constituídos por quatro camadas sucessivas. Cada corpo de prova demandou aproximadamente 480 cm³ de argamassa, volume compatível com a capacidade do sistema de extrusão. Esses ensaios destinaram-se à verificação do funcionamento integrado dos sistemas mecânico, elétrico e de controle, da continuidade da deposição, da estabilidade do processo e da repetibilidade da impressão.

## RESULTADOS

Os resultados obtidos evidenciam que a impressora 3D de bancada semiautomática desenvolvida apresenta capacidade funcional para a deposição de material cimentício em ambiente laboratorial, atendendo aos requisitos básicos de movimentação controlada e de extrusão contínua. A Figura 4 apresenta uma visão geral da configuração do sistema após as etapas de desenvolvimento e montagem, destacando os principais subsistemas envolvidos no processo de impressão.

**Figura 4: Configuração da impressão 3D desenvolvida: 1. Comando do sistema; 2. Sistema de controle; 3. Estrutura da impressora; 4. Argamassadeira planetária para mistura da argamassa; 5. Pistola de extrusão acoplada à estrutura; 6. Processo de impressão.**



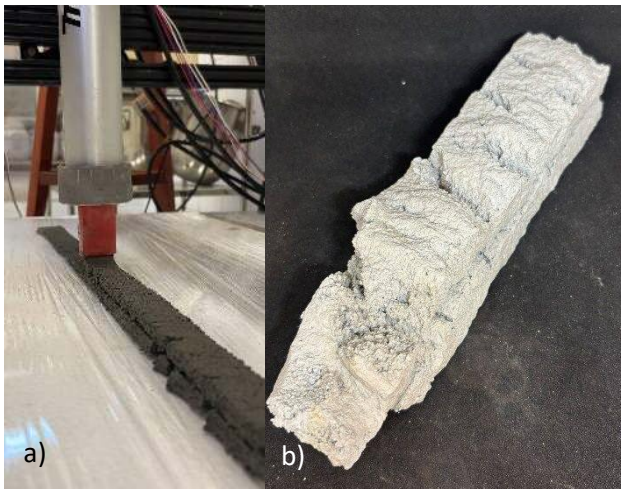

Fonte: os autores.

A partir da configuração apresentada, observa-se a integração entre os sistemas de preparo do material, de controle e de deposição, o que permite a condução de ensaios com controle operacional dos parâmetros de impressão.

A configuração adotada, na qual os sistemas de movimentação e de extrusão operam parcialmente de forma independente, impõe limitações significativas ao desempenho do processo de impressão. A ausência de integração direta entre a taxa de extrusão e a velocidade de deslocamento dos eixos cartesianos resulta em dificuldades de sincronização, aspecto amplamente reconhecido como crítico em processos de manufatura aditiva com materiais cimentícios. Diferentemente de sistemas convencionais de impressão 3D, nos quais a extrusão é controlada de forma acoplada ao movimento (por exemplo, via *G-code* com controle simultâneo), o uso de uma pistola de calafetação com controle de velocidade limita o ajuste fino da vazão de material.

Inicialmente, essa limitação refletiu-se diretamente na qualidade dos filamentos depositados, com variações geométricas ao longo das trajetórias de impressão (Figura 5a). Tais variações estão associadas ao desbalanceamento entre a taxa de extrusão da pistola da calafetação e a velocidade de deslocamento, resultando em defeitos como acúmulo localizado de material (superextrusão) e descontinuidades no material extrudado, pela subextrusão (Figura 5b).

**Figura 5: Defeitos observados na impressão devido ao desbalanceamento entre a taxa de extrusão e a velocidade de deslocamento: (a) durante a impressão; (b) material endurecido**




Fonte: os autores.

Desconsiderando a influência do proporcionamento das argamassas, que também afeta o comportamento reológico e a extrudabilidade, verifica-se que esses defeitos decorrem predominantemente da ausência de sincronização entre a vazão de material e o movimento do bico. Como consequência, há comprometimento da uniformidade da deposição e da estabilidade geométrica dos filamentos.

Esse comportamento está em concordância com estudos publicados [14][15][16], nos quais se destaca a necessidade de controle preciso da relação entre vazão volumétrica e velocidade de impressão para garantir qualidade dimensional e aderência adequada entre camadas.

A partir destas constatações, a velocidade de deslocamento da impressora passou a ser controlada por motores de passo acionados via Arduino/RAMPS, permitindo ajuste preciso em mm/s por meio da conversão de passos em movimento linear. A taxa de

extrusão foi determinada pelo avanço do êmbolo da pistola de calafetação (18 V), cujo controle eletrônico em múltiplos níveis regula a rotação do motor e, consequentemente, a vazão volumétrica do material.

Assim, nos testes subsequentes, a velocidade de extrusão foi determinada pela razão entre o deslocamento do êmbolo e o tempo, resultando em aproximadamente 19 mm/s. A velocidade de deslocamento da impressora foi ajustada para cerca de 23 mm/s, o valor mais próximo possível da taxa de extrusão, dentro das limitações de controle do sistema, visando compatibilizar os parâmetros de deposição.

A adoção dessa relação permitiu a obtenção de corpos de prova contínuos (Figura 6), sem fissuras ou descontinuidades, ao contrário das condições anteriores, em que o descompasso entre a velocidade de extrusão e o deslocamento da impressora resultava em instabilidades no filamento depositado.

A vazão volumétrica teórica correspondente à deposição de argamassa foi estimada em aproximadamente 13,8 $cm^3/s$, considerando a geometria do corpo de prova extrudado e os parâmetros de impressão adotados.

**Figura 6: Impressão após sincronização da velocidade de extrusão com o deslocamento da impressora: (a) Processo de impressão; (b) Corpos de prova impressos**



Fonte: os autores.

A adoção de um sistema semiautomatizado apresenta vantagens do ponto de vista experimental, especialmente no desenvolvimento de equipamentos de baixo custo e de aplicações laboratoriais. A simplicidade construtiva e a flexibilidade operacional permitem ajustes rápidos e adaptações do sistema, o que é relevante em estudos exploratórios, como os voltados à análise da influência de parâmetros de impressão sobre a aderência entre camadas.

Dessa forma, embora o sistema desenvolvido não atinja o nível de controle de equipamentos industriais ou comerciais avançados, mostra-se adequado para investigações experimentais iniciais, desde que suas limitações sejam devidamente consideradas na análise dos resultados.

## CONCLUSÃO

A impressora 3D de bancada desenvolvida apresentou desempenho satisfatório em sua operação, evidenciando a viabilidade da integração entre os sistemas estrutural, mecânico e eletrônico. A estrutura em perfis de alumínio associada aos atuadores lineares garantiu estabilidade e precisão nos deslocamentos, enquanto o sistema elétrico e de controle baseado em Arduino/RAMPS possibilitou o acionamento confiável dos motores e a execução de trajetórias programadas.

A compatibilização entre os diferentes subsistemas mostrou-se um fator fundamental para o funcionamento adequado do equipamento, permitindo a realização de movimentos coordenados e a deposição contínua de material cimentício. Entretanto, a ausência de integração direta entre a taxa de extrusão e a velocidade de deslocamento pode impor limitações à qualidade final dos elementos impressos. Esse aspecto foi mitigado nesta pesquisa por meio da padronização da velocidade dos sistemas, o que promoveu maior estabilidade no processo de deposição e contribuiu para a uniformidade dos filamentos extrudados.

De modo geral, o sistema desenvolvido mostra-se adequado para aplicações experimentais em laboratório, constituindo uma alternativa acessível para estudos de impressão 3D de argamassa e contribuindo para o avanço das pesquisas na área.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento desta pesquisa.

## DECLARAÇÃO

Os autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

## REFERÊNCIAS

[1] WANG, Xin; JIANG, Man; ZHOU, Zuowan; GOU, Jihua; HUI, David. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective. **Composites Part B: Engineering,** v. 110, p. 442-458, fev. 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034.

[2] STANSBURY, Jeffrey W.; IDACAVAGE, Mike J. 3D printing with polymers: challenges among expanding options and opportunities. **Dental Materials**, v. 32, n. 1, p. 54-64, jan. 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018.

[3] BOS, Freek; AHMED, Zeeshan; JUTINOV, Evgeniy; SALET, Theo. Experimental Exploration of Metal Cable as Reinforcement in 3D Printed Concrete. **Materials**, v. 10, n. 11, p. 1314, 16 nov. 2017. DOI: https://doi.org/10.3390/ma10111314.

[4] KAZEMIAN, Ali; YUAN, Xiao; COCHRAN, Evan; KHOSHNEVIS, Behrokh. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: laboratory testing of fresh printing

mixture. **Construction And Building Materials**, v. 145, p. 639-647, ago. 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.

[5] MA, Guowei; WANG, Li; JU, Yang. State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction. **Science China Technological Sciences**, v. 61, n. 4, p. 475-495, 14 set. 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s11431-016-9077-7.

[6] HENKE, Klaudius; TREML, Sebastian. Wood based bulk material in 3D printing processes for applications in construction. **European Journal Of Wood And Wood Products**, v. 71, n. 1, p. 139-141, 13 dez. 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s00107-012-0658-z.

[7] SHAKOR, Pshtiwan; SANJAYAN, Jay; NAZARI, Ali; NEJADI, Shami. Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing. **Construction And Building Materials**, v. 138, p. 398-409, maio 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.037.

[8] PANDA, Biranchi; MOHAMED, Nisar Ahamed Noor; PAUL, Suvash Chandra; SINGH, Gvp Bhagath; TAN, Ming Jen; ĺ·AVIJA, Branko. The Effect of Material Fresh Properties and Process Parameters on Buildability and Interlayer Adhesion of 3D Printed Concrete. **Materials**, v. 12, n. 13, p. 2149, 4 jul. 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/ma12132149.

[9] WOLFS, R.J.M.; BOS, F.P.; SALET, T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: numerical modelling and experimental testing. **Cement And Concrete Research**, v. 106, p. 103-116, abr. 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.001.

[10] BUSWELL, R.A.; THORPE, A.; SOAR, R.C.; GIBB, A.G.F. Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction. **Automation In Construction**, v. 17, n. 8, p. 923-929, nov. 2008. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2008.03.001.

[11] **FORSETI SOLUÇÕES**. Loja virtual. Disponível em: https://loja.forsetisolucoes.com.br/. Acesso em: 16 jul. 2026.

[12] **CHANGZHOU HETAI MOTOR CO.,** LTD. Linear actuator. Disponível em: https://www.ht-gear.com/pt/linear-actuator/. Acesso em: 16 jul. 2026.

[13] **BENLUZ**. Fonte chaveada 10 A 24 V bivolt 240 W. Disponível em: https://www.benluz.com.br/fonte-chaveada-10a-24v-bivolt-240w. Acesso em: 16 jul. 2026.

[14] CHEN, Yu; HE, Shan; GAN, Yidong; ÇOPUROğLU, Oğuzhan; VEER, Fred; SCHLANGEN, Erik. A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103599, jan. 2022b. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103599.

[15] PANDA, Biranchi; PAUL, Suvash Chandra; MOHAMED, Nisar Ahamed Noor; TAY, Yi Wei Daniel; TAN, Ming Jen. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar. **Measurement**, v. 113, p. 108-116, jan. 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.051.

[16] SANJAYAN, Jay G.; NEMATOLLAHI, Behzad; XIA, Ming; MARCHMENT, Taylor. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 468-475, maio 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232.