

UNIVERSIDADE CESUMAR – UNICESUMAR
PROGRAMA PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS LIMPAS

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE
IMPRESSORA 3D EM ESCALA DE BANCADA VISANDO APLICAÇÃO
NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

MAICON DOUGLAS LELES DAS SILVA

MARINGÁ
2022

UNIVERSIDADE CESUMAR – UNICESUMAR
PROGRAMA PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS LIMPAS

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE
IMPRESSORA 3D EM ESCALA DE BANCADA VISANDO APLICAÇÃO
NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas da Universidade Cesumar - UniCesumar, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Limpas.

Linha de pesquisa: Ecoeficiência Urbana

Orientadora: Prof. Dra. Luciana C. S. H. Rezende

Coorientadora: Prof. Dra. Natália U. Yamaguchi

MARINGÁ

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586d Silva, Maicon Douglas Leles da.

Desenvolvimento e validação de um protótipo de impressora 3D em escala de bancada visando aplicação na construção civil / Maicon Douglas Leles da Silva. – Maringá-PR: UNICESUMAR, 2022.

92 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Profa. Dra. Luciana C. S. Herek Rezende.

Coorientadora: Profa. Dra. Natália Ueda Yamaguchi.

Dissertação (mestrado) – Universidade Cesumar - UNICESUMAR, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas, Maringá, 2022.

1. Construtibilidade. 2. *Contour crafting*. 3. Extrudabilidade. 4. Materiais cimentícios. I. Título.

CDD – 690

Roseni Soares – Bibliotecária – CRB 9/1796

Biblioteca Central UniCesumar

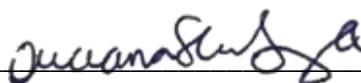
Ficha catalográfica elaborada de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

MAICON DOUGLAS LELES DA SILVA

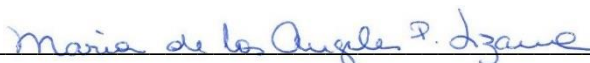
**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE
IMPRESSORA 3D EM ESCALA DE BANCADA VISANDO APLICAÇÃO
NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada à Universidade Cesumar - UniCesumar, como requisito à obtenção
do título de Mestre em Tecnologias Limpas pela Comissão Julgadora composta pelos
membros:

COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dra. Luciana C. S. H. Rezende
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas -
Universidade Cesumar – UniCesumar



Prof. Dra. Maria de Los Angeles Perez Lizama
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas -
Universidade Cesumar – UniCesumar



Prof. Dra. Berenice Martins Toralles
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil -
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Aprovado em: 25 de fevereiro de 2022.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa, Hellen Fernandes Bianchi Leles, por ter me incentivado e enfrentado todos os obstáculos comigo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela sua graça, bondade, misericórdia, privilégio e oportunidade de desfrutar deste momento ímpar. Por sempre estar comigo dispondo força; ânimo e coragem para vencer os desafios impostos durante essa pós-graduação. Toda honra e toda a glória sejam dadas ao único e verdadeiro Deus.

Sou muito grato também aos meus pais, Maria Claudete da Silva e Reinaldo Leles da Silva, que me ensinaram a tomar as decisões certas, sempre ao meu lado, fornecendo-me todo o suporte, desde a minha existência.

Aos meus sogros, Inez de Paula Fernandes Bianchi e Anderson Bianchi, que sempre me apoiaram, amparando-me nas horas mais difíceis, com palavras de ânimo, sabedoria, e por todo auxílio que me prestaram para chegar até aqui.

Aos grandes amigos doutorandos Livia Fernanda Silva, Marla Corso e mestrando Danilo Cebrian Scarpelini Kaminski, pela ajuda prestada em laboratório para construção e ensaios realizados nesta pesquisa, e a todos os amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram neste trabalho, em especial aos amigos que o programa proporcionou.

À grande amiga, mestra Lilian Keylla Berto, que de certa forma me apresentou ao programa convencendo-me a começar, e desde o início colaborando com palavras de ânimo e superação.

À professora do programa de pós-graduação em engenharia civil da Universidade Estadual de Londrina (UEL) Prof. Dra. Berenice Martins Toralles Carbonari, pelo auxílio, contribuindo com ideias e metodologias abordadas neste trabalho.

À Universidade Cesumar – UniCesumar pela concessão da bolsa institucional de estudos, bem como a liberação do uso dos laboratórios de pesquisa.

À Fundação Araucária pelo financiamento do projeto, permitindo que fosse possível a conclusão desta pesquisa.

Em especial à minha orientadora, professora do programa Pós-Graduação em Tecnologias Limpas da Universidade Cesumar – UniCesumar, Prof. Dra. Luciana C. S. H. Rezende, por todo o apoio, dedicação, compreensão, paciência e principalmente por acreditar na minha ideia, tornando-a possível.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”
Ayrton Senna

“Bem sei eu que tudo podes, e que nenhum dos teus propósitos pode ser impedido.”
Jó 42:2

“Porque desde a antiguidade não se ouviu, nem com ouvidos se percebeu, nem com os olhos se viu um Deus além de ti que trabalha para aquele que nele espera.”
Isaías 64:

RESUMO

Com o advento da Indústria 4.0, a impressão 3D é uma tecnologia emergente nas mais diversas áreas industriais. A possibilidade de deposição gradual de material permite que formas complexas sejam obtidas sem desperdício e sem o uso de moldes. Este fato, aliado à diminuição de custos, torna o desenvolvimento desta tecnologia por extrusão uma oportunidade para o setor construtivo. Desta forma, com o intuito de minimizar os resíduos gerados no canteiro de obras, otimizar o tempo de construção e contribuir positivamente com o meio ambiente, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema capaz de realizar a impressão de objetos em três dimensões, e composto por um protótipo de impressora 3D em escala de bancada. A impressora, por sua vez, está acoplada a dois outros subsistemas, um para realizar a extrusão do compósito cimentício e outro para a homogeneização da mistura durante o preparo do material. Assim, fabricou-se o robô cartesiano por meio da execução dos projetos mecânico e elétrico, acoplando-o ao subsistema de bombeamento por uma mangueira com ½ polegada de diâmetro. A definição dos parâmetros de vazão e velocidade de impressão foi realizada de forma a garantir a extrudabilidade e a construtibilidade para materiais compósitos. Para a validação do sistema desenvolvido, preparou-se uma argamassa convencional nas proporções de mistura em relação à massa de 1:0,33:1,33:0,01, sendo cimento, água, areia e aditivo superplastificante, respectivamente. Calibrou-se o subsistema de bombeamento, por meio da realização de ensaio de vazão na bomba de injeção, definindo as vazões mássicas de 4 e 5 Kg/min, e a parametrização das velocidades no robô cartesiano desenvolvido, definindo as velocidades de impressão de 10, 30 e 50 mm/s. Definiu-se, então, as amostras AE1 – 10, AE1 – 30 e AE1 – 50 mm/s para a vazão de 5 Kg/min e as amostras AE2 – 30 e AE2 – 50 mm/s para a vazão de 4 Kg/min nas respectivas velocidades. Como forma de comparar as amostras extrudadas, foram coletadas amostras no misturador (sem extrudar), denominadas AR – 1 e AR – 2. Para a validação do sistema desenvolvido projetou-se um objeto com dimensões 400 x 400 x 80 mm (C x L x A), analisando, após a impressão, suas medidas de projeto, estabelecendo a extrudabilidade do material cimentício e a construtibilidade das camadas. Para garantir a confiabilidade da argamassa confeccionada, foram realizados ensaios nos estados fresco, onde o índice de consistência das amostras variou entre 268,20 e 292,20 mm para as amostras AE1 e AE2, e entre 255,72 e 296,97 mm para as amostras AR e no estado endurecido, sendo que a resistência à tração na flexão das amostras variou entre 6,95 e 8,35 MPa, e entre 34,71 e 40,64 MPa para a resistência à compressão. Por meio dos resultados obtidos, tem-se que a substituição dos métodos tradicionais pela impressora 3D, no canteiro de obras, torna-se viável, proporcionando a redução de resíduos e a minimização do tempo de construção, contribuindo diretamente para um processo construtivo mais limpo e sustentável.

Palavras-chave: Construtibilidade; *Contour crafting*; Extrudabilidade; Materiais cimentícios.

ABSTRACT

With the advent of Industry 4.0, 3D printing is an emerging technology in many different industrial areas. The possibility of gradual material deposition allows complex shapes to be obtained without waste and without the use of molds. This fact, combined with cost reduction, makes the development of this extrusion technology an opportunity for the construction industry. Thus, in order to minimize the waste generated at the construction site, optimize the construction time and contribute positively to the environment, this work aimed to develop a system capable of printing objects in three dimensions, and composed of a 3D printer prototype on a bench scale. The printer, however, is coupled to two other subsystems, one to perform the extrusion of the cementitious composite and the other for the homogenization of the mixture during the preparation of the material. Thus, the Cartesian robot was manufactured through the execution of the mechanical and electrical projects, coupling it to the pumping subsystem through a ½-inch diameter hose. The definition of the flow rate and printing speed parameters was performed in order to ensure extrudability and constructability for composite materials. For the validation of the developed system, a conventional mortar was prepared in the mixing ratios in relation to mass of 1:0.33:1.33:0.01, being cement, water, sand and superplasticizer additive, respectively. The pumping subsystem was calibrated by performing a flow test on the injection pump, defining the mass flow rates of 4 and 5 Kg/min, and the parameterization of the speeds in the developed Cartesian robot, defining the printing speeds of 10, 30, and 50 mm/s. Samples AE1 - 10, AE1 - 30 and AE1 - 50 mm/s were defined for the flow rate of 5 Kg/min and samples AE2 - 30 and AE2 - 50 mm/s for the flow rate of 4 Kg/min at the respective speeds. As a way to compare the extruded samples, samples were collected in the mixer (without extruding), named AR - 1 and AR - 2. For the validation of the developed system an object with dimensions 400 x 400 x 80 mm (L x W x H) was designed, analyzing, after printing, its design measures, establishing the extrudability of the cementitious material and the constructability of the layers. To ensure the reliability of the mortar, tests were performed in the fresh state, where the consistency index of the samples varied between 268.20 and 292.20 mm for samples AE1 and AE2, and between 255.72 and 296.97 mm for the AR samples, and in the hardened state, where the flexural tensile strength of the samples varied between 6.95 and 8.35 MPa, and between 34.71 and 40.64 MPa for the compressive strength. Through the results obtained, the replacement of traditional methods by the 3D printer at the construction site becomes feasible, providing waste reduction and minimizing the construction time, contributing directly to a cleaner and more sustainable construction process. Through the results obtained, the replacement of traditional methods by the 3D printer at the construction site becomes feasible, providing waste reduction and minimizing the construction time, contributing directly to a cleaner and more sustainable construction process.

Keywords: Constructability; Contour crafting; Extrudability; Cementitious materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução Industrial.	21
Figura 2 – Primeira impressora para fabricação de objetos tridimensionais desenvolvida por Charles Chuck Hull.	25
Figura 3 – Primeira casa impressa em Xangai na China em 2014 pela técnica Contour Crafting.	26
Figura 4 – Evolução da manufatura aditiva ao longo do tempo.	27
Figura 5 – Impacto da vazão e da velocidade de impressão na qualidade do filamento impresso.	34
Figura 6 – Fluxograma da classificação dos robôs, segundo a autonomia do sistema de controle.	35
Figura 7 – Etapas básicas para construção de uma impressora 3D.	36
Figura 8 – Variantes do Arduino. (a) Raspberry PI, (b) Arduino Uno, (c) Arduino Nano (d) Arduino Mega.	38
Figura 9 – Shield Ramps 1.4.	38
Figura 10 – Motor de passo.	39
Figura 11 – Fluxograma da metodologia utilizada para a fabricação protótipo de impressora 3D em escala de bancada.	44
Figura 12 – Projeto para a fabricação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada obtido em software SolidWorks® versão 2018.	46
Figura 13 – Projetos realizados no software SolidWorks® versão 2018, do protótipo de impressora 3D em escala de bancada, misturador e sistema de bombeamento: (a) Protótipo de impressora 3D a escala de bancada; (b) Bomba B40; (c) Mangueira para transporte da argamassa; (d) Misturador de argamassa.	50
Figura 14 – Misturador de argamassa MIX90 da Betomaq: (a) Motor trifásico; (b) Botão de acionamento; (c) Reservatório; (d) Tampa; (e) Cabo para transporte; (f) Abas de mistura.	51
Figura 15 – Bomba de injeção modelo B40 Betomaq: (a) Grade de segurança; (b) Manômetro de pressão; (c) Quadro de energia; (d) Bomba helicoidal; (e) Caçamba; (f) Acoplamento da mangueira; (g) Cabine do motor; (h) Roda de borracha.	52
Figura 16 – Bocal do protótipo de impressora 3D em escala de bancada com 20 mm de diâmetro: (a) Vista Frontal; (b) Vista Lateral.	53
Figura 17 – Calibração do béquer para ensaio de vazão volumétrica: (a) Proveta graduada 1000 ml com água destilada; (b) Béquer com a água destilada já calibrado; (c) Ensaio da vazão volumétrica com béquer calibrado em 1000 ml.	54
Figura 18 – Ensaio da vazão mássica.	55
Figura 19 – Projeto para os objetos impressos em protótipo de impressora 3D em escala de bancada. (a) Desenho técnico do objeto impresso; (b) Objeto impresso fatiado no software Repetier®.	55
Figura 20 – Software de fatiamento Repetier®.	56

Figura 21 – Configuração do software de fatiamento <i>Repetier</i> ®: (a) Configurações no software do preenchimento do objeto impresso; (b) Tipo de preenchimento do objeto impresso.....	56
Figura 22 – Materiais constituintes secos no misturador.	58
Figura 23 – Sistema de bombeamento. (a) Compartimento da bomba de injeção para armazenamento da argamassa, (b) bico da extrusora.	59
Figura 24 – Sequência metodológica utilizada para o preparo das amostras de argamassas. ..	59
Figura 25 – Metodologia adotada para a realização das coletas das amostras de argamassas produzidas no protótipo de impressora 3D em escala de bancada.	60
Figura 26 – Coleta das amostras de argamassas em recipiente metálico para a realização dos ensaios de índice de consistência.....	62
Figura 27 – Funil de Blücher utilizado para ensaio da absorção de água.	62
Figura 28 – Aparatos para realização do ensaio de densidade da argamassa. (a) Recipiente com água destilada para calibração do volume; (b) Recipiente com argamassa AR – 2 para determinação da densidade.....	63
Figura 29 – Pontos do objeto impresso para medição e coleta de dados.....	63
Figura 30 – Aparatos para realização do ensaio de resistência à tração na flexão e compressão. (a) Molde prismático utilizado para coletas das amostras de argamassas com dimensões de 4 x 4 x 16 cm; (b) Máquina de ensaio utilizada para os ensaios à tração na flexão e compressão.....	65
Figura 31 – CP's para ensaios mecânicos das amostras de argamassa. (a) AR – 1; (b) AE1 – 10; (c) AE1 – 30; (d) AE1 – 50; (e) AE2 – 30; (f) AE2 – 50.....	66
Figura 32 – CP posicionado para início do ensaio. (a) resistência a tração na flexão (b) resistência a tração na compressão.	66
Figura 33 – Conjunto de equipamentos utilizados na montagem do protótipo de impressora 3D em escala de bancada: (a) Bico extrusor; (b) Protótipo de impressora 3D em escala de bancada; (c) Misturador de argamassa; (d) Mangueira de transporte da argamassa; (e) Bomba de injeção de argamassa.....	68
Figura 34 – Ensaio do índice de consistência para as amostras de argamassas. (a) AR – 1; (b) AE1 – 10; (c) AE1 – 30; (c) AE1 – 50; (c) AE2 – 30; (c) AE2 – 50.	71
Figura 35 – Diâmetro médio dos índices de consistências para as amostras de argamassas AE1 e AE2.	72
Figura 36 – Impressões dos objetos para as amostras de argamassas. (a) AE1 – 10; (b) AE1 – 30; (c) AE1 – 50; (d) AE2 – 30; (e) AE2 – 50.	76
Figura 37 – Impressão da primeira camada da argamassa AE1 – 50, com a bomba B40 Betomaq.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coletas para a realização do ensaio do índice de consistência para as argamassas AR – 1; AR – 2; AE1 – 10; AE1 – 30; AE1 – 50; AE2 – 30 e AE2 – 50.....	61
Tabela 2 – Impressões realizadas com a vazão de 5 Kg/min para cada velocidade adotada. ..	64
Tabela 3 – Impressões realizadas com a vazão de 4 Kg/min para cada velocidade adotada. ..	64
Tabela 4 – Resultados dos ensaios físicos realizados nos constituintes secos para o preparo das amostras de argamassas AE1 e AE2.....	69
Tabela 5 – Resultados dos ensaios no estado fresco realizados nas amostras de argamassas AR – 1 e AR – 2.....	69
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão para os CP's das amostras de argamassas AR – 1; AE1 e AE2.	73
Tabela 7 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão para os corpos de prova das amostras de argamassas AR – 1, AE1 e AE2.	74
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de extrudabilidade e construtibilidade das amostras de argamassas AE1 e AE2 nas velocidades 30 e 50 mm/s.....	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais técnicas de impressão 3D existentes e os materiais utilizados em cada uma delas.....	28
Quadro 2 – Benefícios na utilização da manufatura aditiva em construções em relação ao tripé da sustentabilidade.....	29
Quadro 3 – Estado da arte da manufatura aditiva empregada na construção civil.....	30
Quadro 4 – Velocidades utilizadas em diferentes pesquisas nas quais não foram obtidos vincos ou deformações nos objetos impressos.....	33
Quadro 5 – Descrição (modelo e quantidade), dos materiais utilizados na fabricação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada.....	45
Quadro 6 – Quantitativo de materiais utilizados na etapa da realização do projeto mecânico para a fabricação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada.	47
Quadro 7 – Descrição quantitativa dos materiais utilizados no desenvolvimento do projeto eletroeletrônico do protótipo de impressora 3D em escala de bancada.....	48
Quadro 8 – Dados técnicos do misturador de argamassa modelo MIX90 da Betomaq.	51
Quadro 9 – Descrição técnica da bomba de argamassa modelo B40.	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
A/C	Água/Cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AE1 – 10	Argamassa extrudada 1 impressa com velocidade de 10 mm/s e vazão 5 Kg/min
AE1 – 30	Argamassa extrudada 1 impressa com velocidade de 30 mm/s e vazão 5 Kg/min
AE1 – 50	Argamassa extrudada 1 impressa com velocidade de 50 mm/s e vazão 5 Kg/min
AE2 – 30	Argamassa extrudada 2 impressa com velocidade de 30 mm/s e vazão 4 Kg/min
AE2 – 50	Argamassa extrudada 2 impressa com velocidade de 50 mm/s e vazão 4 Kg/min
BIM	Building Information Model
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CP	Corpo de prova
DIW	Escrita direta à tinta
FDM	Modelagem por Deposição Fundida
FFF	Fabricação com Filamento Fundido
GCODE	Código G
IERC	European Research Projects on the Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
LEED	Liderança em Energia e Design Ambiental
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
NPN	Negative Positive Negative
RepRap	Replicação Rápida
RSSF	Redes De Sensores Sem Fio
SLA	Estereolitografia
SLA-1	Primeira Impressora de Estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
SP	Aditivo Superplastificante
STL	StereoLitography
USB	Universal Serial Bus
Vca	Tensão corrente alternada
Vcc	Tensão corrente contínua
WSN	Wireless Sensor Networks
γ	Massa específica

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	54
Equação 2	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3	REVISÃO DA LITERATURA	20
3.1	Indústria 4.0	20
3.1.1	Internet of Things (Iot)	22
3.2	Estado da Arte – Impressão 3D.....	23
3.3	Estrutura básica de uma impressora 3D	34
3.3.1	Construção de uma impressora 3D	36
3.4	Manufatura aditiva aplicada à construção civil	40
3.5	Desafios da manufatura aditiva alinhados à sustentabilidade	42
4	MATERIAL E MÉTODOS	44
4.1	Desenvolvimento do protótipo de impressora 3D em escala de bancada	44
4.1.1	Projeto mecânico	46
4.1.2	Projeto eletroeletrônico.....	47
4.1.3	Firmware Marlin.....	49
4.1.4	Instalação e configuração do software de fatiamento.....	49
4.2	Sistema de Bombeamento	50
4.2.1	Misturador de argamassa	51
4.2.2	Bomba de injeção	52
4.2.3	Ensaio de calibração da bomba.....	54
4.3	Validação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada	55
4.4	Desenvolvimento das amostras de argamassa.....	57
4.4.1	Obtenção e caracterização dos materiais	57
4.4.2	Produção das amostras de argamassa	58
4.5	Ensaio no estado fresco.....	61
4.5.1	Índice de consistência.....	61
4.5.2	Absorção de água.....	62
4.5.3	Densidade da argamassa e Teor de ar incorporado	62
4.5.4	Extrudabilidade e construtibilidade	63
4.6	Ensaio no estado endurecido.....	64
4.6.1	Resistência à tração na flexão e à compressão	64

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1	Desenvolvimento das amostras.....	68
5.2	Ensaio no estado fresco.....	70
5.2.1	Calibração da vazão.....	70
5.2.2	Índice de consistência.....	71
5.3	Ensaio no estado endurecido.....	72
5.3.1	Resistência à tração na flexão.....	73
5.3.2	Resistência à compressão	74
5.4	Validação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada	75
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
7	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

O advento da evolução científica e tecnológica tem gerado o efeito da urbanização, que causa uma sobreposição espacial entre grupos populacionais muito pobres e com alta privação. Em contrapartida, a resiliência socioecológica urbana surge como uma condição de capacidade adaptativa de recuperar ou adquirir um equilíbrio no sistema urbano (CABRAL et al., 2019).

Seja por uma questão de conforto ou maior disponibilidade de empregos, a urbanização gera grandes desafios para o poder público, que por sua vez precisa gerenciar com eficiência, promovendo saúde, bem-estar, acessibilidade e recursos naturais à sociedade (LIANG et al., 2020). Uma das soluções possíveis é a implantação de cidades sustentáveis, que tem como foco promover recursos sociais e econômicos de forma igualitária e durável, assim como ambientes urbanos planejados (LA ROSA et al., 2020). No entanto, devido à dificuldade de aplicação das técnicas tradicionais, são necessários ajustes e alterações para alcançar esse planejamento (LA ROSA et al., 2020), bem como, integrá-lo à sustentabilidade com base em conceitos que visam contribuir diretamente para o aumento da resiliência urbana (BUSH et al., 2019).

Com a crescente pressão sobre as cidades, melhorar a resiliência urbana tornou-se um consenso global para alcançar o desenvolvimento urbano sustentável (Roberts et al., 2020). No setor da construção civil, o desenvolvimento sustentável é o principal atributo para reduzir os impactos ambientais negativos, por meio de técnicas inovadoras e sustentáveis (KARJI et al., 2019). Uma das inovações promissoras neste setor é a manufatura aditiva com vantagens sociais, econômicas e ambientais (HAGER et al., 2016; SAKIN et al., 2017).

O uso da manufatura aditiva na construção civil vem sendo amplamente discutido (HAGER et al., 2016; SAKIN et al., 2017), com destaque no contexto mundial devido à facilidade de implementação e à utilização de compósitos em diversas áreas do conhecimento, desde à saúde até às engenharias (GUO et al., 2019; LU et al., 2019). Esta tecnologia pode ser usada para criar desde protótipos para a realização de implantes médicos e dentários, até construções de grande escala como prédios e casas (MARANGHI et al., 2020).

No setor construtivo, o uso da manufatura aditiva emprega técnicas e metodologias nas edificações de forma a alcançar uma produção mais limpa (SALET et al., 2018). Entretanto, para a implementação da manufatura aditiva, é necessário superar o desafio do desenvolvimento de materiais cimentícios com características específicas, como permitir a extrusão no estado fresco e, ainda, propriedades mecânicas pertinentes no estado endurecido (HAGER et al.,

2016). Uma vez que estes desafios são superados, métodos de construção com materiais cimentícios, denominados *3D printing concrete* e *3D printing mortar*, tornam-se triviais (YUAN et al., 2019).

Dentre os benefícios da adoção da técnica da manufatura aditiva no setor construtivo, destacam-se as aplicações realizadas no local, onde o custo com transporte é reduzido e a minimização do desperdício dos insumos, a qual contribui diretamente para a criação de projetos mais eficientes, de forma a obter parâmetros que as técnicas convencionais não são capazes de desenvolver. Além disso, minimiza os riscos à saúde e aumenta a segurança no canteiro de obras (SAKIN et al., 2017).

Com todos esses benefícios, a manufatura aditiva pode ser considerada uma aliada ao desenvolvimento sustentável, visto que este tem como objetivo a redução dos impactos ambientais negativos gerados (KARJI et al., 2019). Uma das formas de atenuar esses impactos ambientais negativos, causados pelo setor da construção civil, é a produção mais limpa descrita na Agenda 2030, que possui plano de ação para a prosperidade do planeta, por meio de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que estimulam ações à esfera internacional (ONU, 2016).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e validar um protótipo de impressora 3D em escala de bancada, acoplada a um subsistema de bombeamento com capacidade de extrudar e suportar sobre posição de camadas, de forma a promover uma construção mais limpa.

2.2 Objetivos específicos

- Projetar e fabricar um protótipo de impressora 3D em escala de bancada;
- Acoplar o subsistema de bombeamento ao protótipo;
- Ajustar os parâmetros de velocidade de impressão e vazão da Com relação à extrudabilidade a à construtibilidade;
- Validar o protótipo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A manufatura aditiva, conhecida por impressão 3D, é uma tecnologia utilizada para construir objetos tridimensionais (LU et al., 2019). Tal tecnologia possui uma gama enorme de aplicações e diversas são as áreas beneficiadas por ela, que vai desde peças da indústria automobilística, componentes industriais, até desenvolvimento de protótipos utilizados na área da saúde. Este conceito está relacionado diretamente com a quarta revolução industrial, conhecida como Indústria 4.0.

3.1 Indústria 4.0

Desde 2011, a Alemanha estuda o conceito de Indústria 4.0, que visa aumentar a competitividade Industrial do país, devido à auto-otimização de seu sistema, que, segundo (ABELE et al., 2015; ŚLUSARCZYK, 2018; SUNG, 2018), pode reduzir custos, melhorar o desempenho, produtos e serviços por meio do avanço tecnológico e dos trabalhadores, apenas com a otimização de sistemas ciberfísicos que permitem a troca de dados em tempo real, descentralização e tomada de decisão adaptativa.

O termo Indústria 4.0 significa nada menos que uma “Quarta Revolução Industrial”: A primeira revolução industrial ocorreu na Inglaterra, no início do século XVIII, e foi potencializada pela invenção da máquina a vapor, minimizando, assim, a carga de trabalho no campo e operações manuais nas indústrias. A segunda revolução industrial ocorreu na Europa e nos Estados Unidos, e seu símbolo era realizar o conceito de produção em massa, por meio da pesquisa do tempo sobre atividades de trabalho e tecnologia de mecanização, e substituir a energia do vapor por química e eletricidade, melhorando o desempenho industrial (ŚLUSARCZYK, 2018; JABBOUR et al., 2018). A terceira revolução industrial se deu com os avanços da informática e da tecnologia eletrônica, que possibilitaram sistemas de controle lógico e programável, melhorando a eficiência e a qualidade da empresa.

Para a quarta revolução industrial, o objetivo foi aumentar o nível de operação e produtividade relacionados à *Internet* e algoritmos avançados, assim, foi possível aumentar o valor e o conhecimento na interação entre estratégias organizacionais e sistemas de produção (ŚLUSARCZYK, 2018; JABBOUR et al., 2018). A Figura 1 traz a evolução da indústria desde o final do século XVIII até os dias de hoje.

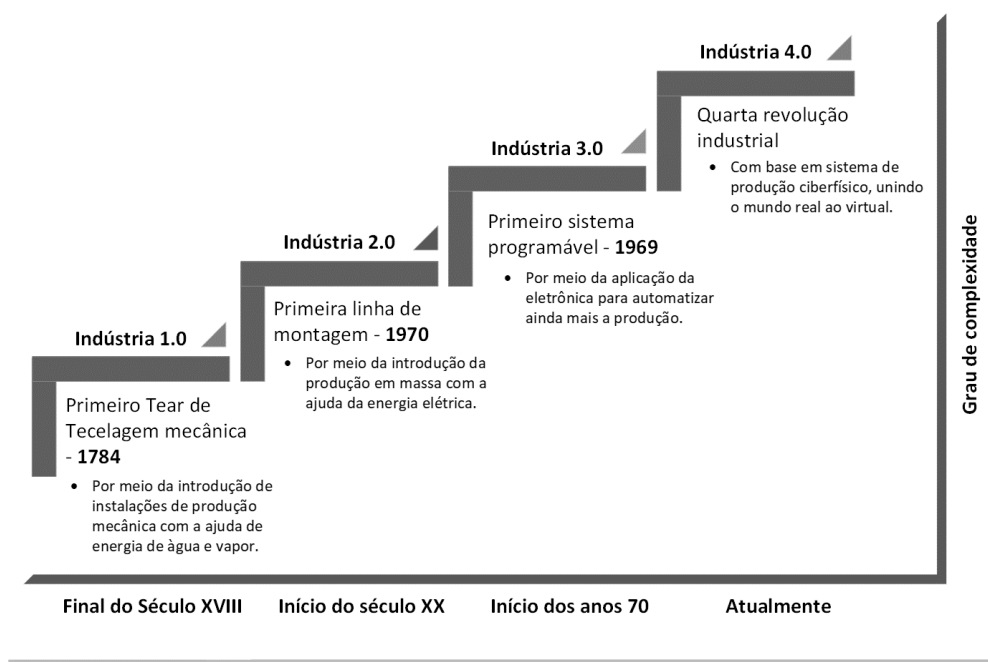


Figura 1 – Evolução Industrial.

Fonte: Adaptado de (ŚLUSARCZYK, 2018).

Essas três revoluções variaram de invenções baseadas em descobertas científicas inovadoras e suas primeiras aplicações em novos ambientes industriais, as invenções revolucionárias como a rede de telecomunicações sem fio de Marconi (a espinha dorsal das comunicações atuais). As redes de telecomunicações e a Iot, características principais da quarta revolução industrial, não são vistas como uma revolução na indústria, portanto, o conceito de Indústria 4.0 não é uma revolução tecnológica vinculada à descoberta científica, e pode não ter base científica (BASSI, 2017).

O investimento em tecnologias como a inteligência artificial, no processo de controle, permitiu realizar gradativamente a melhoria do sistema social e econômico, afetando os métodos de produção dos produtos e a percepção de valor pelos clientes (ŚLUSARCZYK, 2018; JABBOUR et al., 2018). O foco desta indústria emergente é usar a tecnologia como maior aliada para o crescimento organizacional, portanto, a tendência é automatizar o processo, o que ajuda a melhorar a eficiência produtiva e operacional. Isso pode ser alcançado usando a *Big Data*, *IA - Inteligência Artificial*, *Cloud Computing*, *Iot*, dentre outras.

Tecnologias como a manufatura aditiva, prototipagem rápida e a Internet das Coisas (ou Iot (do termo em inglês *Internet of Things*)) marcam o início da indústria 4.0, acrescentando às indústrias a possibilidade de conexão à nuvem e a replicabilidade de objetos de forma instantânea e eficiente.

3.1.1 Internet of Things (Iot)

A Iot é a tecnologia emergente mais importante, ficando em primeiro lugar entre outras, como a inteligência artificial e a robótica (NORD et al. 2019). A Internet foi desenvolvida com dados criados por pessoas, enquanto a Iot trata de dados criados por coisas (MADAKAM et al. 2015).

A Internet das Coisas é considerada uma extensão da rede mundial de computadores, a Internet, pois proporciona aos objetos do dia a dia (eletrodomésticos, veículos e até acessórios, como por exemplo, óculos e relógios) funções de computação e comunicação com a Internet. A aplicação da Internet das Coisas pode afetar todos os aspectos da vida diária humana (WANG et al., 2019). Eles podem ser divididos nas áreas transporte e logística, saúde, ambiente inteligente (incluindo casa inteligente) e aplicativos pessoais e sociais (ATZORI et al., 2010).

John Romkey apresentou o primeiro dispositivo IOT na conferência INTEROP '89, em 1990. Ele criou uma torradeira conectada a um computador, por meio de uma rede TCP/IP. Em setembro de 1999, Kevin Ashton, o cofundador e diretor executivo do Auto – ID Center, fez uma palestra com a P&G e apresentou a ideia de usar etiquetas eletrônicas nos produtos da empresa para promover a logística da cadeia de produção (BIGLIARDIA et al., 2022). Para atrair a atenção dos gestores, ele adicionou os termos "*Internet of Things*" ao título da apresentação e é considerado o criador do termo (ROZIK, 2016).

Desde 2005, as discussões sobre a Internet das Coisas se espalharam amplamente e começaram a atrair a atenção do governo, e tem havido questões relacionadas no que tange a privacidade e segurança de dados. Foi neste ano que a Internet das Coisas se tornou a pauta do *International Telecommunication Union* (ITU), a agência de tecnologia da informação e comunicação das Nações Unidas, que divulga um relatório anual sobre tecnologias emergentes (ALIZADEH et al., 2021). Portanto, depois da banda larga e da Internet móvel, a Internet das Coisas tem atraído a atenção dos órgãos e passa a ser considerada a "próxima etapa da tecnologia em comunicações 'sempre ativas' que garantem um mundo de dispositivos conectados" (ROZIK, 2016; LEE et al., 2019).

Entre 2008 e 2010, devido à maturidade das redes de sensores sem fio (RSSF) (do inglês Wireless Sensor Networks - WSN), que trazem avanços na automação residencial e industrial, assim como tecnologias que aproveitam as diferentes limitações dos equipamentos, como memória, energia e escalabilidade e robustez da rede, o termo Internet das Coisas ganhou

popularidade rapidamente (CO et al., 2021). Em 2011, o termo foi adicionado como uma tecnologia emergente, ao *Gartner Hype Cycle*, que representa graficamente a maturidade e adoção de tecnologias e aplicações, e fornece uma visão para a evolução das tecnologias ou aplicações ao longo do tempo. Algumas organizações relacionadas enfatizaram os seguintes conceitos: A Internet das Coisas deve se concentrar principalmente em "coisas", e o caminho para sua implantação completa deve começar com o aumento da inteligência da Internet das Coisas (KHANNA & KAUR, 2019).

Deste ponto de vista, surge algumas definições na literatura, uma delas, proposta pelo grupo de pesquisa europeu em IoT (*European Research Projects on the Internet of Things - IERC*), que a define como “baseada na normalização e interoperabilidade” (SINGH et al., 2019). No protocolo de comunicação operacional, as "coisas" físicas e virtuais têm identificação, atributos físicos e personalidades virtuais, e usam interfaces inteligentes, e estão perfeitamente integradas à rede de informações (LEE et al., 2019).

Então, aliando a tecnologia *IoT* com a construção civil, é possível o desenvolvimento de equipamentos como impressora 3D para melhorar e integrar o complexo planejamento e processo de execução, com todas as informações geométricas e específicas dos projetos (MECHTCHERINE et al., 2019).

3.2 Estado da Arte – Impressão 3D

A manufatura aditiva ganhou os primeiros olhares na década de 80, com o surgimento dos *softwares computer-aided designs* (CAD) (PHUYAL et al., 2020), o qual incentivou a modelagem em três dimensões (3D) de peças mecânicas de forma mais rápida e eficiente. O desenho de uma peça em modelo físico tridimensional permite ao projetista identificar interferências funcionais, além de possibilitar a movimentação da peça para observar sua montagem ou até mesmo o funcionamento do mecanismo projetado (H. ZHANG, 2021).

O marco no desenvolvimento e na inovação tecnológica é a prototipagem rápida (PR) (SCHMIDT et al., 2017), pois permite estudar processos de desenvolvimento de produtos com a realização de ensaios em ambientes computacionais controlados (RAJAGURU et al., 2020).

Entre as tecnologias presentes na prototipagem rápida existentes na atualidade salienta-se a manufatura aditiva via impressão 3D (LU et al., 2019). A redução de custos, desenvolvimento e o aprimoramento de técnicas são os principais fatores que tornam a

manufatura aditiva cada vez mais acessível e aplicada em diversas áreas do conhecimento (WILHITE et al., 2019). Dessa forma, a manufatura aditiva pode ser aplicada, por exemplo, estereolitografia (SLA), modelagem por deposição fundida (FDM), escrita direta à tinta (DIW), sinterização seletiva a *laser* (SLS) (GUO et al., 2019), *Contour Crafting* (SAKIN et al., 2017).

Mesmo com diferentes tipos de tecnologias, o funcionamento das impressoras 3D é baseado em um princípio comum. Basicamente, as impressoras 3D funcionam adicionando finas camadas de material, onde ocorre a sobreposição delas para formar o objeto final. As coordenadas do objeto formado pela impressora 3D são provenientes de um projeto desenvolvido em um software de modelagem 3D computacional (HOQUE et al., 2019).

A manufatura aditiva tem início com o modelo em 3D, ou seja, um projeto tridimensional computadorizado, geralmente criado a partir de um software de modelagem 3D (CAD). De acordo com suas especificações customizadas, é possível também obter o projeto pronto em um dos muitos repositórios de projetos 3D online (GUO et al., 2019). Na sequência, o projeto é enviado para a impressora 3D por meio de um software de fatiamento, por exemplo, *Computer-Aided Manufacturing* (CAM). Nesta etapa, ocorrem a configuração e o fatiamento em camadas horizontais para ser impresso. Em seguida, é gerado um código (GCODE) para ser enviado à impressora 3D e, finalmente, o objeto impresso é obtido (SAKIN et al., 2017).

A primeira máquina capaz de imprimir peças tridimensionais surgiu em 1983, criada por Charles Chuck Hull (Figura 2), registrando a patente em 1984. Entretanto, foi em 1973 que Ciraud registrou uma patente do método e equipamento capaz de solidificar pó metálico através de um raio *laser*, e em 1977 Swainson registra patente do método e do dispositivo, capaz de recriar a geometria do objeto em uma figura tridimensional, de forma aditiva por meio de feixes cruzados de radiação (THE FREE BEGINNER'S GUIDE, 2017).



Figura 2 – Primeira impressora para fabricação de objetos tridimensionais desenvolvida por Charles Chuck Hull.

Fonte: Adaptado de (THE FREE BEGINNER'S GUIDE, 2017).

Em 1981, Housholder registra patente de uma máquina na qual forma o objeto aplicando *laser*, seletivamente, camada por camada. Kodama, em 1981, mostra sua técnica de transformar um líquido polimérico em sólido, por meio da aplicação em camadas com raios ultravioletas. E assim, Hull aprimora essa técnica e nomeia como estereolitografia, fundando a 3D System em 1986, tornando-se a primeira empresa de impressão em 3D do mundo, comercializando, em 1987, a primeira impressora de estereolitografia, a SLA-1 (WANG et al., 2020). Já a técnica por deposição fundida, criada por Scott Crump em 1988, com patente registrada em 1989, tornou-se a base para a Stratasys Inc., empresa na qual Scott Crump cofundou com sua esposa, Lisa Crump (SU et al., 2021).

A 3D System e a Stratasys Inc. tornaram-se as duas maiores empresas na área de impressão 3D e prototipagem rápida do mundo, durante 20 anos. A partir de então, o desenvolvimento da manufatura aditiva foi impulsionado pela alta produtividade da indústria 4.0 (PHUYAL et al., 2020).

Com o objetivo de tornar a tecnologia da manufatura aditiva acessível a todos, Dr. Gordon idealiza o projeto RepRap (uma abreviação de replicação rápida), em 2005 (JONES et al., 2011). Tinha como base criar uma comunidade constituídas de pessoas que possuíam o *hobby* de fabricar peças e equipamentos em casa e assim construir sua própria impressora.

O projeto utiliza a técnica de Fabricação com Filamento Fundido (FFF), também conhecida como FDM, entretanto, o termo FDM é uma marca registrada da Stratasys Inc., por isso necessitou-se dar um novo nome à técnica. Participavam do projeto RepRap Bre Pettis, Adam Mayer e Zach Hoeken Smith e decidiram comercializar a tecnologia de forma profissional para os consumidores (MATIAS et al., 2015). Em 2009, os três sócios fundaram a Makerbot, apresentando ao mercado uma das primeiras impressoras 3D de preço acessível semiprofissional.

No entanto, com a facilidade e liberdade que o projeto RepRap trouxe, proporcionou a replicabilidade de impressoras 3D, que muitos designers, projetistas e engenheiros começaram a desenvolver esses equipamentos para outras finalidades. Khoshnevis, em 1996, registrou a patente do aparelho e método de manufatura aditiva voltados para a utilização de materiais de construção, possibilitando construir a primeira casa com 200 m² em 24 horas na cidade de Xangai, NA China, em 2014 (Figura 3), por meio da impressão 3D (GENNADIEVNA, 2019).

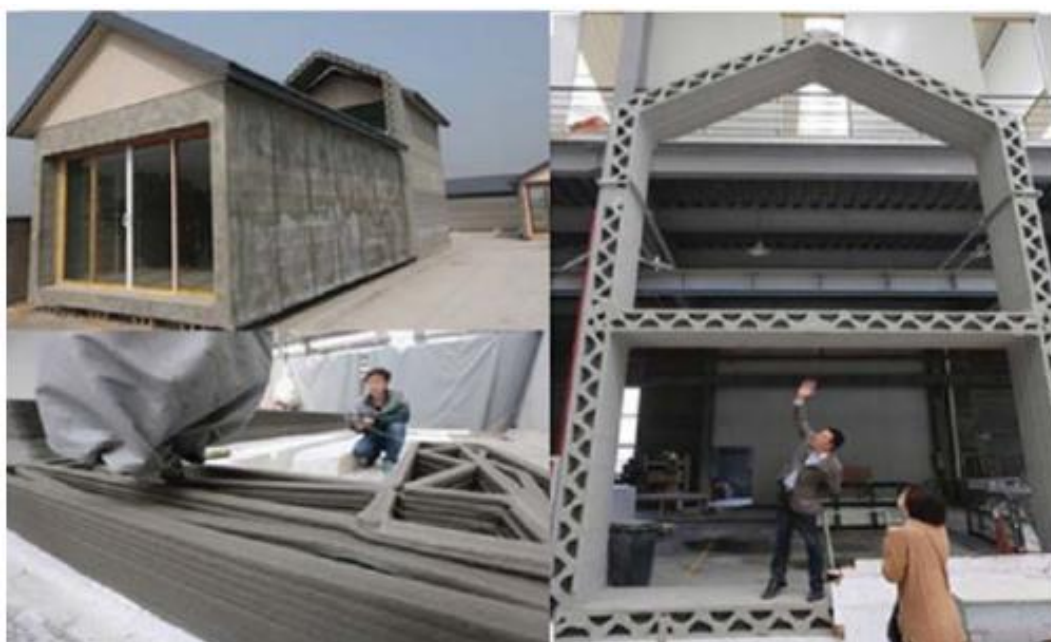


Figura 3 – Primeira casa impressa em Xangai na China em 2014 pela técnica Contour Crafting. Fonte: Adaptado de (GENNADIEVNA, 2019).

Em 2010, Khoshnevis registrou outra patente, “*Deployable contour crafting*”, um sistema acoplado a um veículo de porte grande para a execução da construção de um edifício. Desde então, Khoshnevis ficou conhecido por ser o criador da técnica de manufatura aditiva denominada *Contour Crafting* (SALET et al., 2018). A trajetória da manufatura aditiva está apresentada na Figura 4.

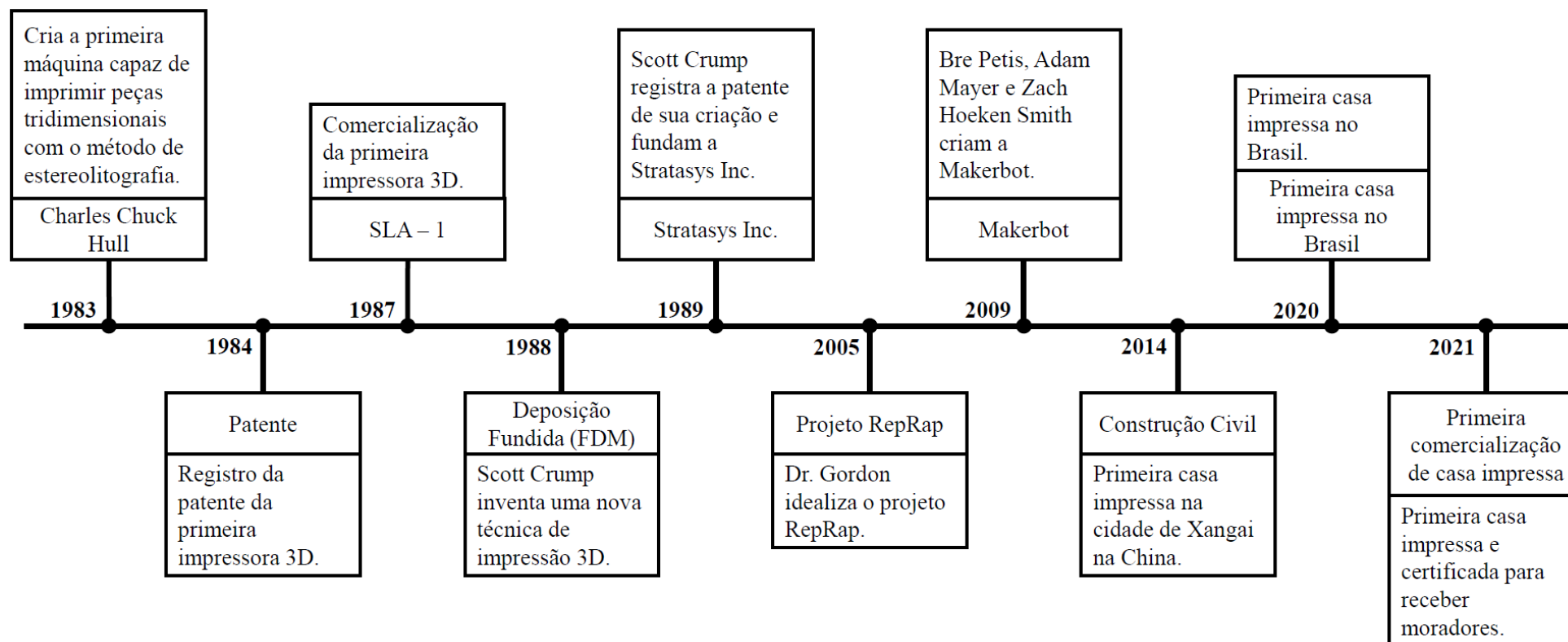


Figura 4 – Evolução da manufatura aditiva ao longo do tempo.

Fonte: (Autor, 2022).

Ainda com esta mesma facilidade, liberdade e cada vez mais adeptos ao projeto RepRap, de diferentes lugares do mundo, o mercado de prototipagem foi ampliado, gerando novos modelos e opções de impressoras 3D. Tal iniciativa foi de suma importância para a área de prototipação, uma vez que gerou aprimoramento da qualidade da produção, com diversas técnicas e diferentes materiais (AKTER et al., 2018; KAMBLE et al., 2018).

A análise comparativa entre as diferentes técnicas de impressão 3D volta-se para aspectos fundamentais, tais como materiais utilizados, precisão, acabamento, resistência mecânica (HAGER et al., 2016). Os métodos utilizados na manufatura aditiva podem contribuir para maior eficiência, maior liberdade para formas geométricas e redução de resíduos (LU et al., 2019). O Quadro 1 apresenta uma síntese das principais técnicas utilizadas na manufatura aditiva.

Quadro 1 – Principais técnicas de impressão 3D existentes e os materiais utilizados em cada uma delas.

TÉCNICAS	TECNOLOGIA	MATERIAIS UTILIZADOS
FDM – Deposição de filamento fundido	Extrusão	Termoplásticos, misturas e metais eutéticos.
SLS – Sinterização a <i>laser</i>	Granular	Ligas metálicas: titânio, alumínio, aço inoxidável.
SLM – Derretimento a <i>laser</i>	Granular	Termoplásticos, pós-metálicos e cerâmicos.
<i>Polyjet</i>	Polimerização	Resinas e foto polímeros combinados.
SLA – Estereolitografia	Polimerização Fotossensível	Foto polímeros e resinas.

Fonte: Adaptado de (SAKIN et al., 2017; GUO et al, 2019).

A evolução da manufatura aditiva originou o conceito *Smart Manufacturing System*, que consiste em proporcionar um sistema de fabricação inteligente por meio de um gerenciamento com foco em controle, monitoramento, digitalização e eficiência. Com isso, esse conceito utiliza os princípios das cidades inteligentes, como o uso de tecnologias de informação e comunicação incorporadas ao modelo da indústria 4.0 (PHUYAL et al., 2020). O Quadro 2 mostra os benefícios da manufatura aditiva, de acordo com alguns autores.

Quadro 2 – Benefícios na utilização da manufatura aditiva em construções em relação ao tripé da sustentabilidade.

ASPECTOS EM RELAÇÃO AO TRIPIÉ DA SUSTENTABILIDADE	BENEFÍCIOS EM COMPARAÇÃO COM OS MÉTODOS TRADICIONAIS	REFERÊNCIA
Aspectos ambientais	Redução da geração de resíduos da construção civil; Redução da poluição no meio ambiente; Promove a reciclagem com a incorporação de resíduos; Reduz desperdícios.	El-Sayegh et al. (2020); LU et al. (2019); Sakin et al. (2017); Hager et al. (2016).
Aspectos econômicos	Redução de custos de transporte armazenagens de insumo, matérias-primas e energia; Otimização do tempo; Maior precisão; Aumento na produtividade.	Sakin et al. (2017); Phuyal et al. (2020).
Aspectos sociais	Redução na geração de poluentes atmosféricos; Processos mais controlados e mais seguros; Evita riscos à saúde.	Hager et al. (2016); Phuyal et al. (2020).

Fonte: (Autor, 2022).

Diversos projetos de construção aditiva foram desenvolvidos ao longo dos anos (LABONNOTE et al. 2016), criando, assim, diversas técnicas aplicadas à construção civil. As mais utilizadas são a construção por contornos (*Contour Crafting*, em inglês) (KHOSHNEVIS & DUTTON, 1998; KHOSHNEVIS & BEKEY, 2003; KHOSHNEVIS, 2004; KHOSHNEVIS et al., 2006) a *D-Shape* (GIOVANNI et al., 2013) e a Impressão 3D em Concreto (*3D Concrete Printing*, em inglês) (LE et al., 2012; LE et al., 2012; LIM et al., 2012).

Comparando essas técnicas com a construção tradicional, destacam-se: Redução de custos de fabricação e de tempo da obra; Precisão da execução; Redução do impacto ambiental; Otimização do processo de gerenciamento de projetos e obras; Maior facilidade logística; e Possibilidade de redução do déficit social/habitacional (FLORÊNCIO, 2016). A trajetória da manufatura aditiva aplicada na construção civil está apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 – Estado da arte da manufatura aditiva empregada na construção civil.

ANO	AVANÇOS	Referência
2008	<ul style="list-style-type: none"> Criação da primeira impressora 3D em escala real pela empresa WinSun na China. 	El-sayegh et al. (2020)
2013	<ul style="list-style-type: none"> Impressão de lotes de peças (pré-fabricadas) para a realização de dez casas, pela empresa WinSun na China, em sua fábrica por meio de uma impressora com dimensão de 6 x 10 x 40 m (altura x largura x comprimento). 	El-sayegh et al. (2020) Ghaffar et al. (2018) Hager et al. (2016)
2014	<ul style="list-style-type: none"> Após o transporte das peças impressas em 2013 pela empresa chinesa, foram executadas as casas por meio da montagem das peças, incluindo os componentes como portas, janelas e coberturas, em apenas 24 horas. Construção do castelo Andy Rudenko's garden – em Minnesota, Estados Unidos – considerada a primeira estrutura de construção in situ, ou seja, realizada no próprio local. 	Ghaffar et al. (2018) Hager et al. (2016)
2015	<ul style="list-style-type: none"> A empresa WinSun realizou na China a construção com a aplicação da manufatura aditiva de uma mansão de 1100 m² e do primeiro prédio com dimensão de 6,6 x 40 x 10 m (altura x comprimento x largura). Em Amsterdã, Holanda, foi projetada e realizada pela DUS Architects a construção da Urban Cabin, em 24 horas por meio da técnica FDM utilizando material polimérico, bioplástico sustentável e reciclável, possui área útil de 8 m². Impressão de um hotel com dimensões 12,5 x 10,5 x 4 m (altura x comprimento x largura), realizado por Andrey Rudenko. Essa obra impressa teve duração interrompida de 100 horas, com a utilização de uma matriz cimentícia, com bom desempenho e ligação entre camadas. 	El-sayegh et al. (2020) Buchanan et al. (2019) Ghaffar et al. (2018) Rajan et al. (2018) Hager et al. (2016)
2016	<ul style="list-style-type: none"> A empresa chinesa WinSun também realizou o primeiro escritório impresso de 250 m² em Dubai, conhecido como “Office of the Future”. As peças foram produzidas com a técnica de manufatura aditiva na China e a execução do projeto em Dubai, em 17 dias. Houve um aumento na produtividade e na eficiência da obra que reduziu em quase metade de custos com mão de obra e resíduos de construção. Construção da primeira ponte realizada com a impressão 3D, localizada no parque urbano Castilla-La Mancha, na Espanha. A impressão total compõe oito peças foi realizada pelo Institute of Advanced Architecture, em Catalunha, Barcelona. A obra da ponte com dimensão de 12 metros de comprimento e 1,75 m de largura teve duração de dois meses. 	El-sayegh et al. (2020) Buchanan et al. (2019) Ghaffar et al. (2018) Rajan et al. (2018) Sakin et al. (2017)

2017	<ul style="list-style-type: none"> • Em Nantes, na França foi realizada a construção da YhnovaTM, uma habitação social de 95 m², com aplicação de manufatura aditiva para a impressão de paredes de concreto com preenchimento externo e interno de espuma de polímero, com duração de 54 horas de trabalho por meio de um robô de impressora 3D. • Finalização da execução de uma ponte de concreto protendido com peças impressas em laboratório para a obra de renovação de uma ciclovia na vila Germert, na Holanda, com dimensão de 8 m x 3,5 m de comprimento e largura, respectivamente, e vão livre de 6,5 m. O processo de impressão teve duração de 48 horas, utilizando dois sistemas de impressão com troca a cada duas horas, devido ao tempo de endurecimento do concreto ser de 2 a 3 horas, o que permitiu evitar falhas de impressão ou entupimento de material no sistema. • Na Europa, foi impresso em Copenhague, pela empresa 3D Printhuset, um prédio com um design que enfatiza liberdade geométrica e redução de linhas retas. A empresa lançou a residência Apis Cor House de 38 m² - localizada na capital da Rússia – executada no próprio local em 24 horas, utilizou tendas para isolar toda a obra da neve, a solução foi a limitação do concreto geopolimérico poder ser impresso acima de 5°C. • A empresa holandesa CyBe também desenvolveu uma impressora pela técnica Contour Crafting. Realizou obras impressas referentes a uma casa de 80 m² na Arábia Saudita, uma ponte na Holanda e um laboratório. 	<p>El-sayegh et al. (2020) Buchanan et al. (2019) Furet et al. (2019) Ghaffar et al. (2018) Poullain et al. (2018) Salet et al. (2018) Sakin et al. (2017)</p>
2019	<ul style="list-style-type: none"> • Construção da maior ponte em concreto impressa em Xangai, na China, desenvolvida pela Universidade de Arquitetura de Tsinghua, com o comprimento de 86 ft (pés) com duração de impressão de 450 horas. A análise econômica mostrou uma redução de custos de aproximadamente um terço. 	<p>El-sayegh et al. (2020)</p>
2020	<ul style="list-style-type: none"> • Primeira casa impressa utilizando a técnica contour crafting é construída no Brasil pela empresa 3D Home Construction. Com uma área útil de 66 m², foi impressa em 48 horas na cidade de Macaíba, no Rio Grande do Norte. 	<p>Martinelli (2020)</p>
2021	<ul style="list-style-type: none"> • Primeira casa do mundo impressa em 3D e certificada para receber moradores é comercializada em Riverhead – Nova York, por US\$ 299.999. 	<p>Kleina (2021)</p>

Fonte: (Autor, 2022).

O sistema de construção da técnica *contour crafting* é por meio da deposição do material, geralmente compósito de matriz cimentícia, realizada camada por camada e com a aplicação da automatização do processo de construção, que pode ser utilizada para a construção in situ, ou seja, realizada no próprio local. Além disso, essa tecnologia permite criar grandes elementos com maior flexibilidade e precisão (HAGER et al., 2016).

Atualmente, o desenvolvimento da matriz cimentícia tem como objetivo, dentre vários fatores, o atendimento aos novos desempenhos, as aplicações e os requisitos, como durabilidade, por meio da investigação das propriedades de materiais à base de cimento Portland, com finalidade de eliminar novas preocupações, em relação à sustentabilidade (HAMIDI et al., 2019).

No que se refere ao desempenho reológico, as propriedades de extrudabilidade e construtibilidade são essenciais para materiais cimentícios utilizados para impressão 3D, contudo, se mostram um pouco conflitantes devido à finalidade de cada propriedade. Já que a extrudabilidade determina se o material é capaz de ser bombeado sem que haja alguma obstrução (alta taxa de fluidez inicial) e a construtibilidade é a capacidade de o material ser depositado em camadas na vertical de forma estável (alta taxa de endurecimento inicial) (WENG et al., 2019).

Após definir as composições do material cimentício com capacidade de extrudabilidade e construtibilidade, é necessário definir a vazão de bombeamento e a velocidade de impressão. Os parâmetros de vazão do material cimentício e velocidades de impressão são cruciais para a técnica *Contour Crafting*. Uma vez que se a velocidade não for compatível com a vazão, poderá ocorrer trincas, acarretando a perda de resistência do material e, consecutivamente, sua confiabilidade (MARCHMENT et al., 2019).

Weng et al. (2019) prepararam oito compósitos cimentícios, sendo um deles capaz de ser bombeado sem bloqueio no processo de extrusão, durante o processo de bombeamento e impressão sem descontinuidade significativa. Ainda, foi possível estabelecer a velocidade de impressão de 2000 mm/min e de bombeamento de 650 rpm, sendo que o tempo de impressão foi de cinco minutos para a peça de 180 mm de altura, com vinte camadas.

Ma et al. (2020) imprimiram objetos na velocidade de 45 mm/s em bocal circular de 10 mm de diâmetro, afirmando que a combinação do bico, velocidade e material proposto melhorou significativamente o problema da fraca ligação entre as camadas, um dos pontos mais

preocupantes da impressão de concreto 3D baseado em cimento Portland comum. No Quadro 4 tem-se as velocidades utilizadas em diferentes pesquisas onde os objetos impressos não apresentaram vincos ou deformações.

Quadro 4 – Velocidades utilizadas em diferentes pesquisas nas quais não foram obtidos vincos ou deformações nos objetos impressos.

VELOCIDADE (mm/s)	DIÂMETRO BICO (mm)	VAZÃO (L/min)	AUTOR
50	30	1,35	Xiao et al. (2020)
60	10	(*)	Kruger et al. (2019)
75	20	(*)	Nerella et al. (2020)
75	12	0,45	Ma et al. (2019)
80	20	(*)	Long et al. (2019)

Fonte: (Autor, 2022).

(*) Não especificado.

Kruger et al. (2019); Nerella et al. (2020) e Long et al. (2019) não especificaram a vazão adotada. Segundo Perrot et al. (2021), determinar a vazão exata de material na saída da extrusora é uma tarefa essencial para controlar o processo de impressão 3D. Para Xiao et al. (2020), a qualidade da camada é influenciada não só pelas características do material, mas também pela velocidade de impressão e a vazão.

Xiao et al. (2020) realizaram um estudo sobre o efeito da velocidade de impressão e a vazão, fixando a velocidade de impressão em 42 mm/s e a vazão entre 8 a 28 mL/s, aumentando-a gradativamente de 2 em 2 mL/s. Notou que para as vazões menores ocorria a descontinuidade do material, gerando falhas, e para vazões maiores um espalhamento da camada, deformando-a, além disso, concluiu que as vazões 18, 20 e 22 mL/s, que correspondem a 1,08; 1,20 e 1,32 L/min, respectivamente, não obtiveram falhas.

A vazão influencia diretamente na velocidade, Souza et al. (2020) definiram três situações possíveis: alta vazão de material ou baixa velocidade, nesse caso, a largura da camada tende a ser maior que o diâmetro do bico; vazão e velocidade intermediárias, onde a espessura da camada será igual ao diâmetro do bocal e, por fim, baixa vazão ou alta velocidade, em que a largura da camada será ainda semelhante ou eventualmente menor que o diâmetro do bocal. De acordo com Tay et al. (2019), o teórico efeito da vazão e a velocidade de impressão estão representados na Figura 5.

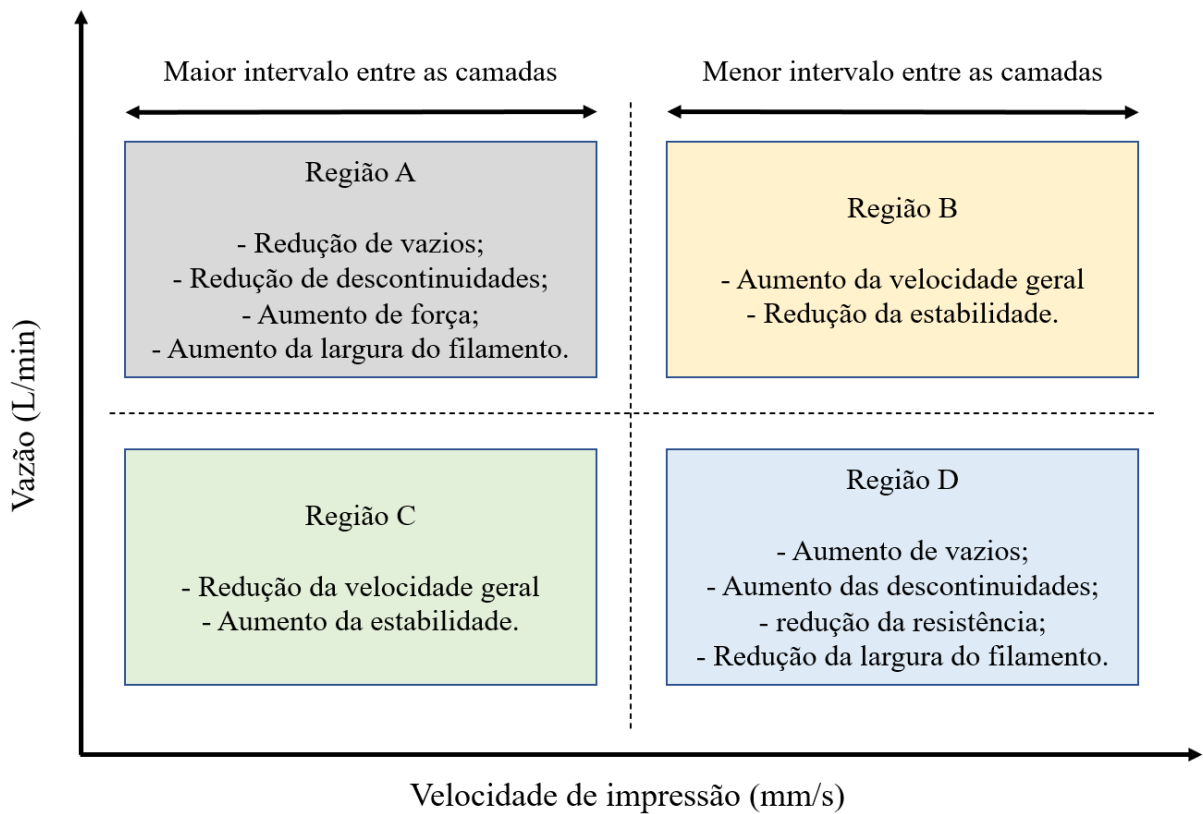


Figura 5 – Impacto da vazão e da velocidade de impressão na qualidade do filamento impresso.

Fonte: Adaptado de Hamidi et al. (2022).

3.3 Estrutura básica de uma impressora 3D

Robôs podem ser classificados a partir de vários critérios, tais como: autonomia do sistema de controle, mobilidade da base, estrutura cinemática, forma de acionamento, graus de liberdade e geometria do espaço de trabalho (SINGH et al. 2022). A Figura 6 mostra a classificação dos robôs, segundo a autonomia do sistema de controle.

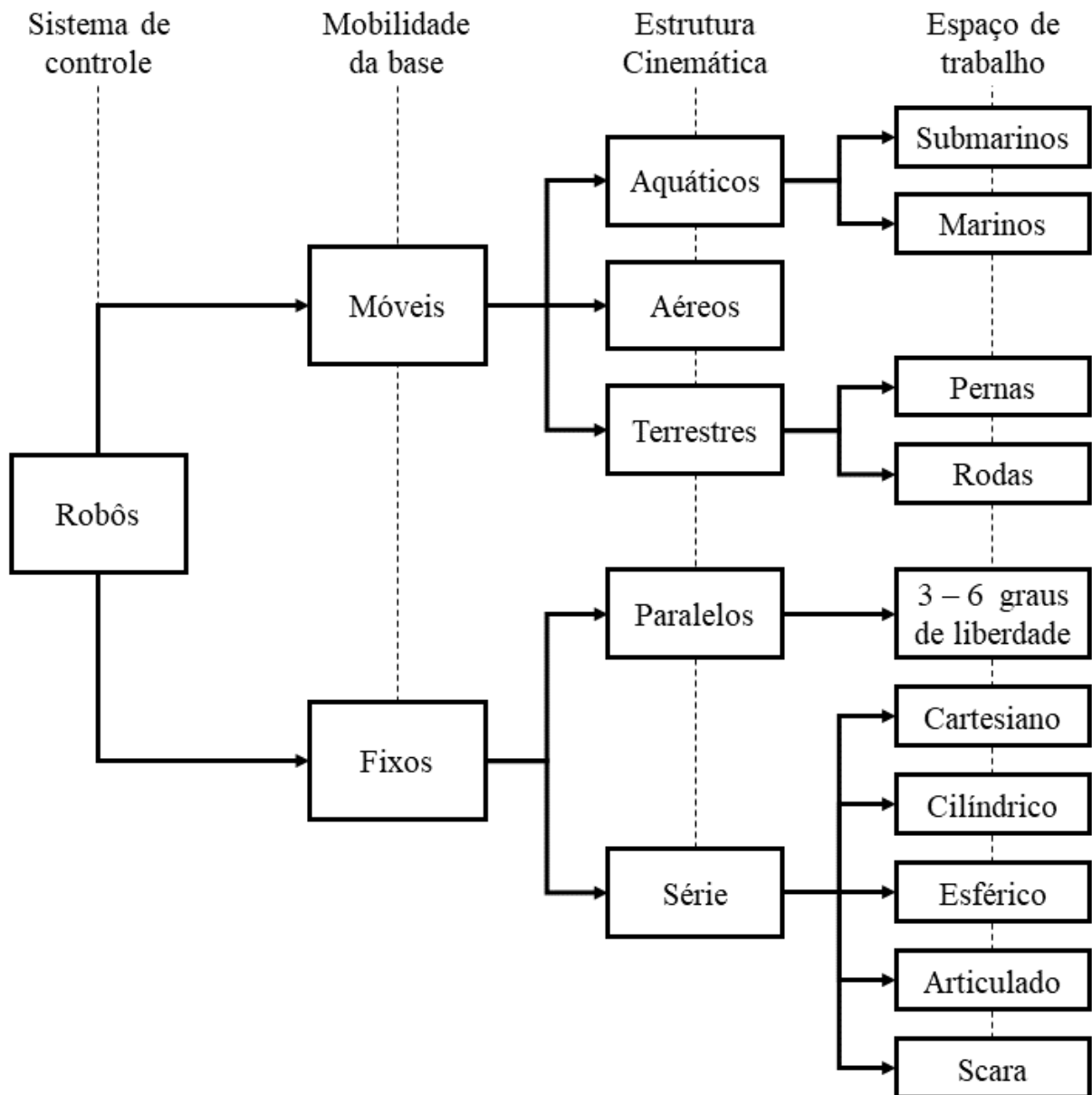


Figura 6 – Fluxograma da classificação dos robôs, segundo a autonomia do sistema de controle. Fonte: Adaptado de SINGH et al. (2022).

Panda et al. (2018), Long et al. (2019) e Xiao et al. (2020) desenvolveram robôs cartesianos, conhecido também como pórtico. Para o desenvolvimento de uma impressora 3D, no formato de um robô cartesiano/pórtico é necessário o cumprimento de três etapas básicas para o pleno funcionamento, sendo elas: mecânica, elétrica e programação.

O sistema mecânico inclui todas as peças que compõem a base da impressora, e sobre a qual se montam todos os demais elementos, sendo o responsável pelo movimento da impressora. Para a realização da impressão, as impressoras devem deslocar a cabeça de

impressão para cobrir todo o plano de impressão XY e o eixo Z, que permite imprimir camada após camada (KAMBLE et al., 2018). Uma boa estrutura é um aspecto totalmente essencial e fundamental para obter bons resultados nas impressões, é a etapa determinante da rigidez.

Ainda com relação à parte mecânica, é primordial que seja aplicada uma força para que ocorra o movimento do conjunto, que se dá pelos motores, chamados de motores de passos. Para transmitir essa força e proporcionar o movimento de todo o conjunto, utilizam-se fusos com castanhas e/ou correias dentadas, cujo passo, bem como os motores, definem a velocidade de deslocamento (HOQUE et al., 2019; KAMBLE et al., 2018).

A parte elétrica é composta por sensores que realizam a leitura das variáveis de temperatura e fim de curso; driver para o acionamento dos motores; botão de emergência e fonte de alimentação. A placa mãe é responsável por conduzir todos os periféricos, a maioria das impressoras utilizam o módulo eletrônico Ramps, por ser de baixo custo e possuir um microcontrolador de alto desempenho (HOQUE et al., 2019).

A programação é realizada por um software que roda no microcontrolador da placa mãe. Seu objetivo é traduzir o conteúdo do arquivo GCODE em sinais elétricos que ativam ou desativam componentes da impressora 3D. Resumidamente, o arquivo GCODE é uma lista de comandos e coordenadas que descrevem o modelo 3D a ser impresso (SAKIN et al., 2017).

O processo de construção de uma impressora 3D ocorre conforme descrito a seguir.

3.3.1 Construção de uma impressora 3D

A construção de uma impressora 3D baseia-se em cinco etapas básicas (Figura 7).

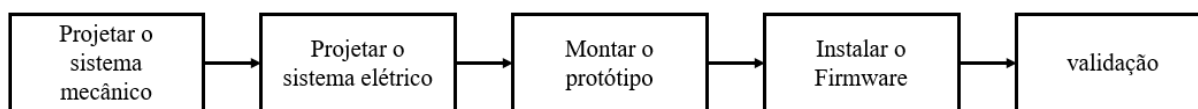


Figura 7 – Etapas básicas para construção de uma impressora 3D.

Fonte: (Autor, 2022).

Inicialmente é realizado o projeto mecânico por meio de *softwares* CAD, como o *AutoCAD®*; *Maya®*; *ZBrush®*; *Dassault Systèmes®*; *SolidWorks®*; *SketchUp®* e o *Blender*. Na sequência, o projeto elétrico através de *Software* CAD elétrico, como o *SolidWorks®*, *AutoCAD®*, *WOCA®*, *PRO elétrica®* (HOQUE et al., 2019). Com os projetos finalizados, inicia-se a montagem do equipamento, sendo sequenciada pela parte elétrica, a instalação do

Firmware, após efetuar os ajustes mecânicos e calibração dos sensores, para então realizar os testes de funcionalidade (HOQUE et al., 2019; KAMBLE et al., 2018). A seguir, serão descritos os componentes que fazem parte de uma impressora 3D.

3.3.1.1 *Microcontrolador*

Um sistema embarcado é um sistema de computador totalmente independente, geralmente usados para um único propósito e projetado para executar tarefas específicas. Esses sistemas têm seus próprios recursos de computação, como processamento, memória e portas de comunicação de entrada e saída (YOO et al., 2019).

A grande maioria dos sistemas embarcados possui microcontroladores que são usados desde sistemas relativamente simples (ar-condicionado, televisores e micro-ondas) até sistemas mais avançados (como aviões e satélite). Como padrão, este tipo de placa possui uma porta serial universal (*Universal Serial Bus* - USB) para comunicação com o computador, facilitando a configuração dos pinos para sua aplicação (GRAVEN et al., 2016).

O microcontrolador consiste em um microprocessador, memória e periféricos de entrada/saída, e pode ser programado para funções específicas, como controle de máquina e vários modelos de automação. Dentre as plataformas existentes para microcontroladores, destaca-se o Arduino, pela versatilidade e facilidade de programação, bem como o baixo custo. Mesmo para interações avançadas, o Arduino pode atender às expectativas (AMESTICA et al., 2019).

Os principais tipos de microcontroladores são: o Raspberry PI, definido como computador, porque possui processador, controlador de vídeo e conexões para mouse e teclado. O Arduino Uno é um dos modelos mais utilizados, com o maior número de Shields e um número considerável de portas disponíveis (AMESTICA et al., 2019).

O Arduino Nano possui um microprocessador ATME328, o qual sua alimentação pode ser fornecida por meio de uma conexão USB ou conector de alimentação externa. O Arduino Mega possui mais portas digitais em relação ao Arduino Uno, podendo ser utilizado para aplicações mais complexas, pois possui mais portas digitais (54), usadas como entrada ou saída, (16) pinos analógicos e memória. O modelo é baseado no microcontrolador Atmega2560, que possui as mesmas funções que outras placas Arduino e, por esses motivos, foi implementado este modelo neste projeto (AMESTICA et al., 2019; GRAVEN et al., 2016). Na Figura 8 é apresentado um Arduino mega.

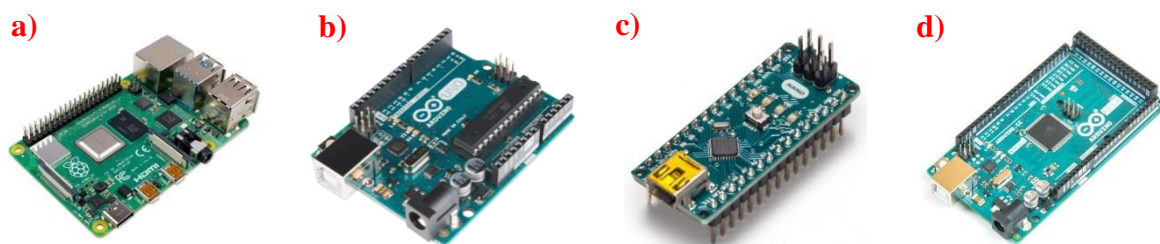


Figura 8 – Variantes do Arduino. (a) Raspberry PI, (b) Arduino Uno, (c) Arduino Nano (d) Arduino Mega.

Fonte: Adaptado de Kondaveeti et al. (2021).

A Shield RAMPS 1.4 (Figura 9) consiste em uma única placa que pode conter todos os circuitos eletrônicos necessários para a montagem de uma impressora 3D (COJUHARI et al., 2017). A RAMPS 1.4 suporta até 5 drivers para motor de passo, com conexão auxiliar, conexão do motor, chave fim de curso e conexão da extrusora e sua estrutura modular, que pode substituir rapidamente os componentes quando necessário. Por esses motivos, foi implementado esse modelo neste projeto (HSIEH, 2016; HOQUE et al., 2019; KAMBLE et al., 2018).

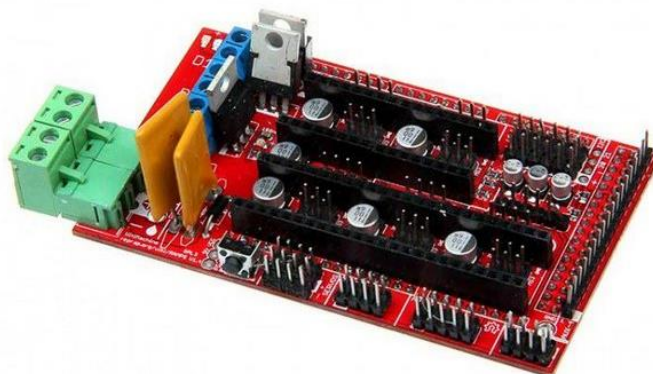


Figura 9 – Shield Ramps 1.4.

Fonte: Adaptado de Almeida et al. (2021).

3.3.1.2 Motores elétricos

Em máquinas elétricas, motor elétrico ou atuador elétrico é qualquer dispositivo que transforma energia elétrica em mecânica. É o mais usado de todos os tipos de motores, pois combina as vantagens da energia elétrica - baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando – com sua construção simples, custo reduzido, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos (PETRUZELLA, 2013).

O motor é constituído basicamente do rotor, ligado ao eixo transmite a energia mecânica

para a carga; estator, que contém as bobinas que geram os campos magnéticos do motor e o núcleo, conjunto de chapas metálicas que servem de estrutura de fixação das bobinas; ventilador, que é responsável por auxiliar a troca térmica do motor; rolamentos, que permitem que o eixo gire livremente com relação à carcaça, exibindo baixo atrito e pouco desgaste (LUKIC et al., 2019). Para realizar a movimentação de uma impressora é fundamental a utilização de motores de passo, conhecidos como Servo Motor (SONI et al., 2020).

O servo motor pode ser usado em uma variedade de aplicações, principalmente quando um objeto precisa ser movido de maneira precisa e controlável, mesmo com a força na direção oposta, ele tem a capacidade de mover os braços e manter uma postura (LI et al., 2020).

Ele consiste em um potenciômetro que é conectado ao eixo de saída do servo e usa um circuito de controle responsável por monitorar o potenciômetro e dar a partida no motor, visando obter uma posição ou velocidade pré-determinada através de um motor que movimenta as engrenagens e o seu eixo principal (LI et al., 2020).

Os motores de passo (Figura 10) ocupam uma posição única no campo dos motores controlados usados em aplicações de medição e controle, convertendo sinais elétricos em torque (LI et al., 2020). Sua principal vantagem é controlar variáveis como ângulo, posição, tempo e velocidade (ARANJO et al., 2012; LAI et al., 2017).

A diferença entre um motor de passo e outros motores é a realização de movimentos incrementais e precisos em malha aberta, rotações chamadas de passo (LI et al., 2020). São o tipo de mecanismo mais adequado para uso em impressoras 3D, facilitando a conectividade com o Firmware e software (SONI et al., 2020).



Figura 10 – Motor de passo.

Fonte: Adaptado de Almeida et al. (2021).

3.3.1.3 Firmware e software

Os softwares utilizados na manufatura aditiva podem ser divididos em três tipos, sendo eles Firmware, CAD e CAM. Existem muitas ferramentas CAM, como *Envision Labs*® (GE et al., 2010), *CreationWorkshop*® (BORELLO et al., 2018), *Fusion360*® (YAMAMURA et al., 2021), *software Repetier*® (VANDODARIA et al., 2021), *Simplify 3D*® (OLIVEIRA et al., 2020), entre outros.

Os softwares CAD começaram a ser desenvolvidos em 1957, mas ganhou toda a força na década de 80. Eles permitem desenhar objetos 2D e 3D diminuindo muito o desperdício de recursos (DANDAN et al., 2010). Os principais softwares de modelagem 3D CAD são: *AutoCAD*®; *Maya*®; *ZBrush*®; *Dassault Systèmes*®; *SolidWorks*®; *SketchUp*® e o *Blender*® (YUNYUN et al, 2017).

É necessário que o arquivo gerado pelo software CAD esteja preferivelmente em formato *STereoLithography* (STL), pois é o utilizado pela ferramenta CAM que, por sua vez, cria o algoritmo GCODE sendo reconhecido pelo firmware da impressora (HOQUE et al., 2019). Os softwares CAM convertem arquivos CAD (por exemplo, extensão stl) em linguagem de máquina, no caso específico das máquinas CNC, o código G, que converte o modelo 3D gerado no software CAD em camadas, para que cada uma corresponda ao que a impressora terá que movimentar, por meio dos motores, para imprimir a peça (HOQUE et al., 2019).

O *Firmware* refere-se ao programa instalado no microcontrolador. Além de interpretar as instruções do código G, o programa também pode gerenciar e controlar todos os componentes periféricos, como motores de passo, sensores de temperatura, ventiladores de refrigeração etc. (BAAZ & SAGGIOMO, 2021). Um dos métodos mais comuns para gerenciar todas as atividades da máquina em tempo real é o firmware *Marlin* (HOQUE et al., 2019; PONTAROLLI et al., 2021).

O firmware de qualquer controlador nada mais é do que um algoritmo que, após programado, o instrui a tomar decisões e realizar tarefas. Todos os equipamentos utilizados na indústria 4.0 necessita de um microcontrolador para realizar tarefas específicas como conectar o equipamento com a rede internet (PONTAROLLI et al., 2021).

3.4 Manufatura aditiva aplicada à construção civil

A manufatura aditiva aplicada no setor da construção civil é capaz de imprimir

estruturas de materiais cimentícios e, para isso, exige condições de processos que controlam os equipamentos utilizados. Geralmente, essas condições são alcançadas pelo gerenciamento sofisticado, baseados no *Building Information Model* (BIM) que, por sua vez, integra o complexo planejamento e processo de execução, com todas as informações geométricas e específicas dos projetos, (MECHTCHERINE et al., 2019), tornando-os detalhados e compatibilizados.

A transformação digital aplicada à manufatura aditiva na era da Indústria 4.0 ainda é considerada lenta, e seu potencial ainda não foi totalmente explorado no gerenciamento da cadeia de suprimentos, no entanto, traz mudanças ao setor da construção. A realidade virtual e a interação humano-computador também são vistas como os principais componentes da indústria 4.0 que permitem ambientes de construção digitalizados (DALLASEGA et al., 2018). Já os componentes a serem explorados pela manufatura aditiva, pelo conceito *Smart Manufacturing System*, são o gerenciamento do ciclo de vida do produto, o gerenciamento da cadeia de suprimentos, o design para fabricação e a montagem, incluindo o sistema de manufatura flexível e configurável, o ciclo de inovação rápida, dentre outros (PHUYAL et al., 2020).

A mudança do ciclo de vida de produtos com a aplicação de processos construtivos mais limpos pode alcançar benefícios diretamente aliados à sustentabilidade (SHEALY, 2016) e, por consequência, o desenvolvimento sustentável. O desenvolvimento sustentável no setor da construção civil é importante para a redução dos impactos ambientais e tem mostrado avanços com métodos e técnicas mais sustentáveis (KARJI et al., 2019).

Alguns métodos de construção foram evoluídos com a incorporação de conceitos os quais buscam a eficiência de gestão, tais como BIM, construção enxuta (SAIEG et al., 2018) e manufatura aditiva (HAGER et al., 2016; SAKIN et al., 2017), o que proporciona uma redução de resíduos e o aumento no controle de processos e segurança dos trabalhadores (SAIEG et al., 2018) que, por consequência, fomenta o desenvolvimento sustentável. Souza et al. (2020) observaram que os estudos relatam que a impressão 3D em edifícios é uma tecnologia que torna o processo construtivo mais limpo e pode ser classificado como ecologicamente correto, no entanto, há divergências e discussão sobre essa visão (WANGLER et al., 2016; LABONNOTE et al., 2016; SCHUTTER et al., 2018).

3.5 Desafios da manufatura aditiva alinhados à sustentabilidade

O grande desafio é de fato a criação de uma impressora 3D voltada para construção civil, pois eleva os projetos realizados com impressoras tradicionais com objetos pequenos, em casas de centímetros, para casas, pontes, prédios na casa de metros. Outro desafio é a capacidade de bombeamento do material (argamassa), uma vez que este precisa ser fluido o suficiente para ser bombeável e sólido o suficiente para suportar o peso das camadas superiores (MECHTCHERINE et al., 2019; LASLETT et al., 2020). Dessa forma, os processos inteligentes e automação se mostram essenciais para superar os novos desafios que surgem desde a concepção do design até a impressão em escala real (MECHTCHERINE et al., 2019), como, por exemplo, o emprego de softwares avançados CAD/CAM em conjunto com a plataforma BIM e certificação LEED (JALAEI et al., 2020).

Além de enfrentar esses desafios, a manufatura aditiva se mostra promissora para superar barreiras ambientais e sociais, e contribuir para o planejamento urbano sustentável, visto que os conceitos aplicados no setor urbano, que integram a construção da resiliência urbana baseada na sustentabilidade, são soluções para enfrentar os impactos ambientais, as mudanças climáticas, além de trazer desenvolvimento econômico e social (BUSH et al., 2019).

Nas últimas décadas, a manufatura aditiva se destaca na área da construção civil (LU et al., 2019), pois se mostra alinhada ao tripé da sustentabilidade, devido às vantagens sociais, econômicas e ambientais, relacionadas à possibilidade da impressão de elementos no próprio local (SAKIN et al., 2017), à sua capacidade de programação de máquinas para a realização de tarefas que pode reduzir os acidentes de trabalho (HAGER et al., 2016) e sua contribuição para a redução dos impactos ambientais (SAKIN et al., 2017). Além disso, o compósito de matriz cimentícia pode conter materiais que possam ser reciclados, tais como os resíduos de blocos cerâmicos e de fibras de celulose (EL-SAYEGH et al., 2020).

No contexto atual, a sustentabilidade aplicada para as construções de edificações se tornou um ponto chave para o desenvolvimento das cidades sustentáveis (JALAEI et al., 2020). Dessa forma, tornou-se notórias as grandes contribuições da manufatura aditiva para o meio ambiente, atrelado ao planejamento urbano. Também, há de se considerar que um dos objetivos da manufatura aditiva se mostra alinhado ao planejamento urbano, pois ambos têm a capacidade de remodelar espaços com o gerenciamento e o desenvolvimento da infraestrutura e serviços (BUSH et al., 2019).

A manufatura aditiva aplicada no setor urbano se destaca por apresentar um alto potencial construtivo, inclusive em larga escala, com previsões de atender demandas atuais dos projetos arquitetônicos e estruturais (MECHTCHERINE et al., 2019) e futuras, a saber, nos Emirados Árabes Unidos há previsões de impressão de casas até o ano de 2030 (RAJAN et al. 2018). Cabe ressaltar que essa tecnologia já foi aplicada na implantação de casas, prédios comerciais e habitacionais (EL-SAYEGH et al., 2020), estruturas complexas como um castelo (HAGER et al., 2016) e pontes (BUCHANAN et al., 2019; SALET et al., 2018), e até para a implantação de habitação social, investigada nos estudos de (POULLAIN et al., 2018; FURET et al., 2019).

À medida em que as pesquisas vêm aprimorando seus equipamentos, métodos construtivos e materiais, os pontos de fraqueza se dissolvem (LASLETT et al., 2020) e o planejamento das cidades apresentam evolução (GARCIA et al., 2020). Dessa forma, o setor da construção tem adotado cada vez mais os métodos mais eficientes e com menor impacto ambiental, e por consequência, contribuição a sustentabilidade (ARANGO et al., 2019), atendendo ao ODS de número 11, dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (MARANGHI et al., 2020).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização desta pesquisa foi fabricado um protótipo de impressora 3D em escala de bancada, por meio do desenvolvimento dos projetos mecânico e eletroeletrônico, acoplados a um sistema de bombeamento com capacidade de extrudar e realizar a sobreposição de camadas de materiais cimentícios.

As amostras de material cimentício (argamassa) utilizadas nesta pesquisa foram ensaiadas antes e após a extrusão, para efeito comparativo, de forma a verificar a funcionalidade do equipamento retirado com foco na capacidade de extrusão e sobreposição das camadas. Já a validação do protótipo ocorreu por meio da realização de ensaios nos estados fresco e endurecido do material impresso.

4.1 Desenvolvimento do protótipo de impressora 3D em escala de bancada

A fabricação do equipamento ocorreu no Laboratório de Usinagem e Solda da Universidade Cesumar na cidade de Maringá-PR e foi dividida em quatro etapas: mecânica, elétrica, instalação do software e configuração. A sequência metodológica utilizada na fabricação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada, assim como os materiais utilizados neste processo, está elucidada na Figura 11, e no Quadro 5, respectivamente.

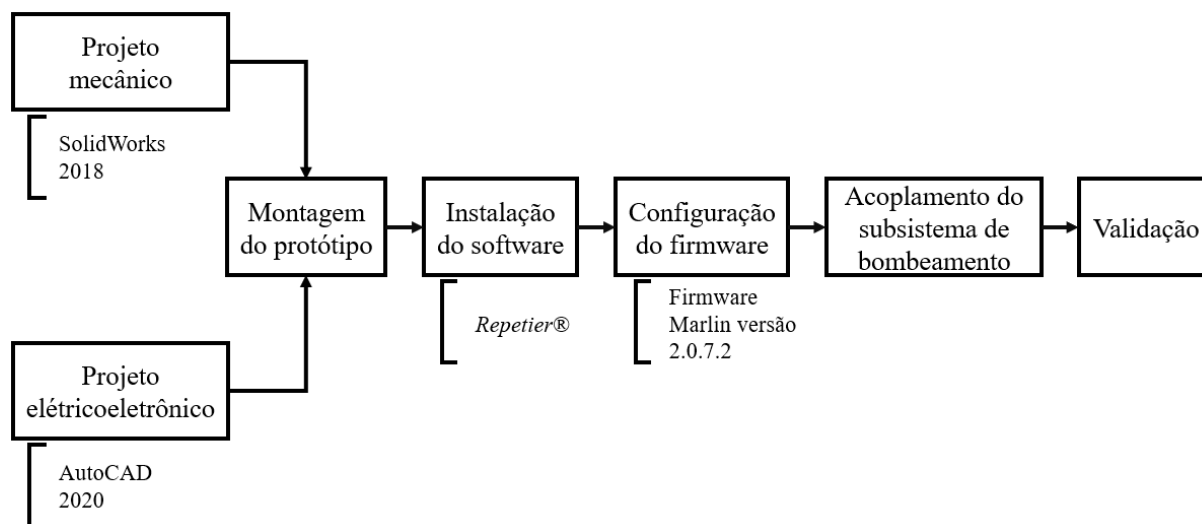


Figura 11 – Fluxograma da metodologia utilizada para a fabricação protótipo de impressora 3D em escala de bancada.

Fonte: (Autor, 2022).

Quadro 5 – Descrição (modelo e quantidade), dos materiais utilizados na fabricação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada.

DESCRIÇÃO	MODELO	QUANTIDADE
Acoplador flexível	8 x 10 mm	4
Arduino MEGA 2560	ATmega 2560	1
Botão de emergência	vermelho de Ø 40 mm	1
Botão pulso	22 mm NA	1
Caixa de passagem	500 x 400 mm	1
Castanha rosca trapezoidal	20 mm	4
Chapa de Aço	1000 x 1000 x 5 mm	2
Display LCD	128 x 64	1
Drivers	TB6600	5
Eixos lineares tipo T	500 x 20 mm	2
Eixos lineares tipo T	1100 x 20 mm	4
Fontes chaveada	24 Vcc / 30 A	2
Fuso trapezoidal passo 4 mm	20 mm / 1100 mm	3
Fuso trapezoidal passo 4 mm	20 mm / 500 mm	1
Mancal Ucf 204	20 mm	4
Metalon 2,5mm	40 x 40 x 600 mm	4
Motor de passo	NEMA 30 Kgf	4
Pillow blocks aberto	20 mm	12
Ramps	Versão 1.4	1
Relé	24 Vcc – 10 A	3
Sensor capacitivo	Normalmente Fechado (NF) – 24 Vcc	3
Sinaleiro	220 Vca - vermelha	1
Sinaleiro	220 Vca - verde	1
Sinaleiro	220 Vca - amarela	1

Fonte: (Autor, 2022).

A seguir, tem-se a descrição das etapas que foram realizadas para a fabricação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada.

4.1.1 Projeto mecânico

O projeto mecânico (Figura 12) foi realizado por meio do software CAD *SolidWorks*® versão 2018. A junção da estrutura foi realizada por meio de máquina de solda TIG RIV 122 – VONDER, com eletrodo revestido para aço de 2,5 mm.

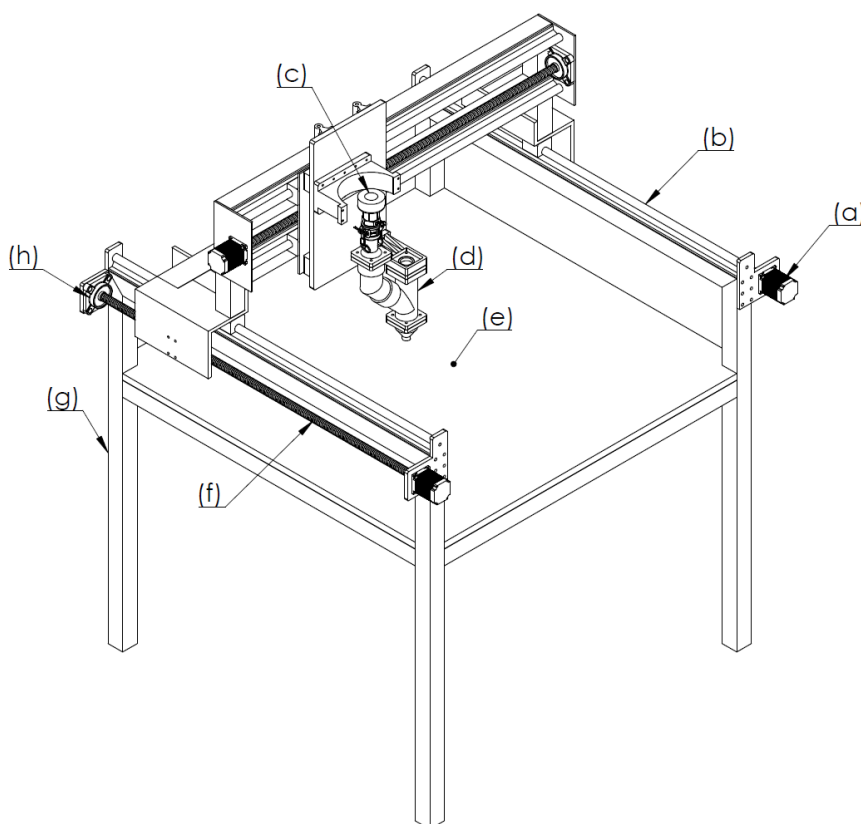


Figura 12 – Projeto para a fabricação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada obtido em software *SolidWorks*® versão 2018.

Fonte: (Autor, 2022).

a) Motor de passo; (b) Eixo linear tipo T; (c) Acoplador para mangueira; (d) Extrusora; (e) Mesa de impressão; (f) Fuso trapezoidal passo 4 mm; (g) Estrutura; (h) Mancal Ucf 204.

O sistema mecânico do protótipo de impressora 3D em escala de bancada permite o movimento em todas as direções. Optou-se por uma estrutura metálica, composta por metalon com dimensões 40 x 40 x 2,5 mm e chapas de aço de 0,5 mm por 100 x 100 mm, por ser de fácil aquisição e montagem. Foram utilizados 4 motores de passos NEMA 23 de 30 Kgf/cm², sendo 2 para o eixo Y, 1 para o eixo X e 1 para o eixo Z. Esses motores foram conectados a um

fuso trapezoidal de 20mm de diâmetro passo 4 e 1100 mm de comprimento, por meio de um acoplador flexível com diâmetro externo de 25 x 30 mm e interno de 8 x 10 mm, com capacidade máxima de torque de 35 Kgf/cm². O movimento dos motores foi transmitido aos eixos por meio de uma castanha de 20 mm de diâmetro conectada ao fuso. No Quadro 6, tem-se a descrição quantitativa dos materiais utilizados para a elaboração do projeto mecânico.

Para o deslizamento de todo o conjunto foram utilizados 6 eixos lineares de 20 mm de diâmetro com base tipo T para fixar na estrutura do protótipo de impressora 3D em escala de bancada. Os 4 eixos com 1100 mm de comprimento para os eixos X, Y e os 2 eixos de 500 mm para o eixo Z e os 12 *pillow blocks* de 20 mm de diâmetro, que juntos formaram o sistema de deslocamento do protótipo de impressora 3D em escala de bancada.

Quadro 6 – Quantitativo de materiais utilizados na etapa da realização do projeto mecânico para a fabricação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada.

DESCRIÇÃO	MODELO	QUANTIDADE
Acoplador flexível	8 x 10 mm	4
Castanha rosca trapezoidal	20 mm	4
Chapa de Aço	1000 x 1000 x 5 mm	2
Eixos lineares tipo T	20 mm / 1100 mm	4
Eixos lineares tipo T	20 mm / 500 mm	2
Fuso trapezoidal passo 4 mm	20 mm / 1100 mm	3
Fuso trapezoidal passo 4 mm	20 mm / 500 mm	1
Metalon 2,5 mm	40 x 40 x 600 mm	4
Motor de passo	NEMA 30 Kgf	4
Pillow Blocks aberto	20 mm	12

Fonte: (Autor, 2022).

4.1.2 Projeto eletroeletrônico

O projeto eletroeletrônico é o responsável pelo funcionamento do protótipo de impressora 3D em escala de bancada. Nesta etapa, foram utilizados cabos elétricos de 1,5 mm² (comando), bem como cabos de 0,75 mm² (sensores) e 2,5 mm² para os circuitos de potência

(220 Vca). Foi realizada a instalação de um painel para visualização das variáveis (tempo, temperatura) durante a impressão do objeto.

O acionamento dos motores ocorreu por meio da utilização de drivers externos, já a alimentação elétrica do circuito foi fornecida pela instalação de 2 fontes chaveadas com 24 Vcc e 30 A, sendo 1 para os motores e outra para a placa eletrônica Ramps 1.4.

Foram utilizados 3 sensores do tipo capacitivo *negative-positive-negative* (NPN), um para cada eixo, alimentados com tensão entre 6 e 36 Vcc. Devido ao fato da placa eletrônica Shield Ramps 1.4 utilizar tensão de 5 Vcc, adicionou-se 3 relés para fechamento do circuito, de forma a garantir a integridade do módulo e dos sensores. Abaixo (Quadro 7), tem-se o quantitativo e a descrição das peças que foram utilizadas no projeto eletroeletrônico.

Quadro 7 – Descrição quantitativa dos materiais utilizados no desenvolvimento do projeto eletroeletrônico do protótipo de impressora 3D em escala de bancada.

DESCRIÇÃO	MODELO	QUANTIDADE
Arduino MEGA 2560	ATmega 2560	1
Botão de emergência	Vermelho de Ø 40 mm	1
Botão pulso	22 mm NA	1
Caixa de passagem	500 x 400 mm	1
Display LCD	128 x 64	1
Drivers	TB6600	5
Fontes chaveada	24 Vcc / 30 A	2
Ramps	Versão 1.4	1
Relé	24 Vcc – 10 A	3
Sensor capacitivo	Normalmente Fechado (NF) – 24 Vcc	3
Sinaleiro	220 Vca - vermelha	1
Sinaleiro	220 Vca - verde	1
Sinaleiro	220 Vca - amarela	1

Fonte: (Autor, 2022).

O circuito de potência é necessário para alimentar as fontes de forma que haja segurança aos componentes eletrônicos e principalmente ao usuário. Todo o sistema foi alimentado com

tensão 220 Vca obtido pelo disjuntor eletromagnético da WEG de 32 A, que limitou a corrente consumida pelo circuito. Um sinaleiro de cor verde indicou que o protótipo de impressora 3D em escala de bancada estava conectado a uma fonte alimentadora de energia elétrica. Foi inserido um contator a fim de seccionar a tensão da rede ao circuito após o usuário pressionar o botão, onde um sinaleiro de cor amarela foi ligado indicando que todo o sistema estava energizado e pronto para uso. E, por fim, um último sinaleiro na cor vermelha foi utilizado de forma a indicar que o protótipo de impressora 3D em escala de bancada estava em funcionamento. Um circuito de segurança foi inserido, composto por um botão de emergência, um dispositivo elétrico WEG CP-D relé de segurança e controle de parada de emergência e um botão “Normalmente Aberto” (NA) pulsante, para rearme do circuito.

O quadro geral de alimentação, controle e potência foi instalado debaixo da mesa de impressão do protótipo de impressora 3D em escala de bancada, por ser um local em que não ocorre umidade. O quadro possui vedação hermética e possui botões de acionamento do equipamento (Liga/Desliga). É composto também por uma chave geral, a qual desabilita a tensão, e uma luz de sinalização verde, indicando a energização do equipamento. Foi inserida uma chave seletora a fim de habilitar os motores. Uma vez habilitados, uma luz de cor laranja era acesa, indicando que o sistema estava pronto para uso.

4.1.3 Firmware Marlin

Para controlar e processar as informações no protótipo de impressora 3D em escala de bancada, foi utilizado o *firmware Marlin* versão 1.8.5, tendo como base a plataforma de desenvolvimento integrado, em linguagem aritmética própria do Arduino para configuração. O *Marlin* possui boa adaptabilidade a equipamentos eletrônicos, fácil parametrização e modificação, e boa compatibilidade com o software Arduino utilizado.

O *firmware* pode ser atualizado a qualquer momento, sendo necessária uma interface USB entre o Arduino e o *Marlin firmware* para fazer o download da atualização. A mesma gravação é feita diretamente por meio da plataforma de desenvolvimento do Arduino.

4.1.4 Instalação e configuração do software de fatiamento

Um software de fatiamento serve para configurar e dividir o objeto em várias camadas, transformando-o em GCODE. Foi usado o *Repetier*®, que é o software *host* básico compatível

com a maioria dos *firmwares* usados mundialmente em impressoras 3D. Neste software, foram realizadas as configurações relacionadas ao tamanho do protótipo de impressora 3D em escala de bancada, mesa de trabalho, velocidade, quantidade, altura e densidade das camadas.

Após a realização das configurações de operação, torna-se possível realizar a impressão de um objeto ou modelo que possa ser importado para o software *Repetier®*. O Software apresenta o tempo estimado de impressão, número de camadas a serem impressas e número de filamentos a serem usados.

4.2 Sistema de Bombeamento

O sistema de bombeamento foi dimensionado para atender a demanda dos parâmetros de pressão e de velocidade máxima do protótipo de impressora 3D em escala de bancada. Esse sistema foi composto por dois equipamentos, sendo o misturador de materiais cimentícios modelo MIX 90 utilizado nesta pesquisa para a confecção da argamassa e a bomba de injeção B40. Após o preparo do material a ser impresso, este foi transferido para o reservatório da bomba de injeção modelo B40. O sistema de bombeamento teve por objetivo o transporte do material em estado fresco até o bico do protótipo de impressora 3D em escala de bancada, com o auxílio de uma mangueira com diâmetro de 1/2 polegada, para impressão do objeto 3D. Na Figura 13, tem-se o projeto técnico do sistema.

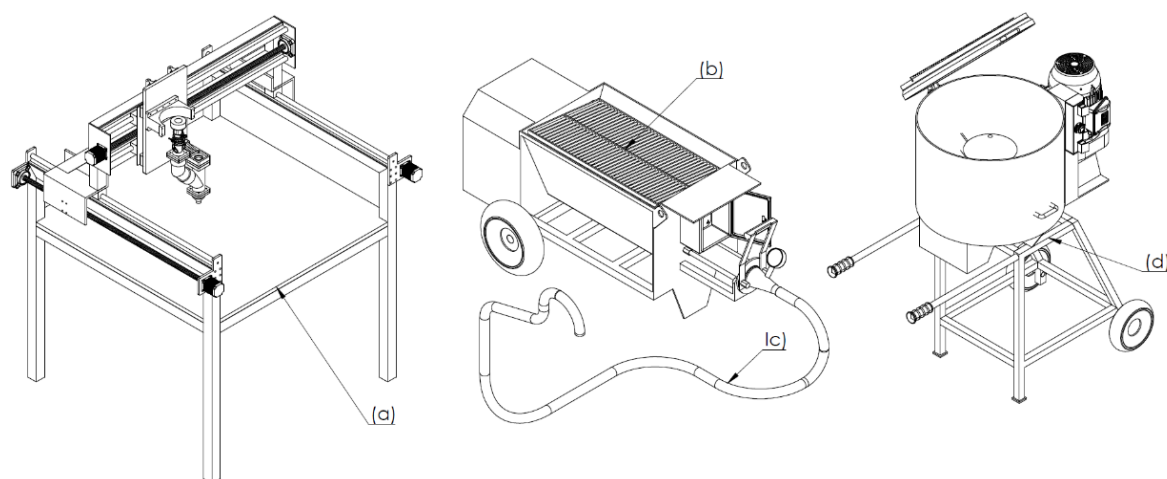


Figura 13 – Projetos realizados no software SolidWorks® versão 2018, do protótipo de impressora 3D em escala de bancada, misturador e sistema de bombeamento: (a) Protótipo de impressora 3D a escala de bancada; (b) Bomba B40; (c) Mangueira para transporte da argamassa; (d) Misturador de argamassa.

Fonte: (Autor, 2022).

A descrição para implantação do sistema de bombeamento para o protótipo de

impressora 3D em escala de bancada tem a sequência na descrição a seguir.

4.2.1 Misturador de argamassa

O misturador (Figura 14) utilizado nesta pesquisa foi o MIX 90 da Betomaq, cujos dados técnicos constam no Quadro 8.

Quadro 8 – Dados técnicos do misturador de argamassa modelo MIX90 da Betomaq.

TIPO DE MATERIAL A SER MISTURADO	ARGAMASSA INDUSTRIAL / TRAÇADA EM OBRA
Acionamento	Motor redutor 2,2 KW / 3 cv
Capacidade nominal	120 L
Granulometria máxima	6 mm
Rotação de saída	50 rpm
Peso aproximado	120 Kg

Fonte: (Autor, 2022).

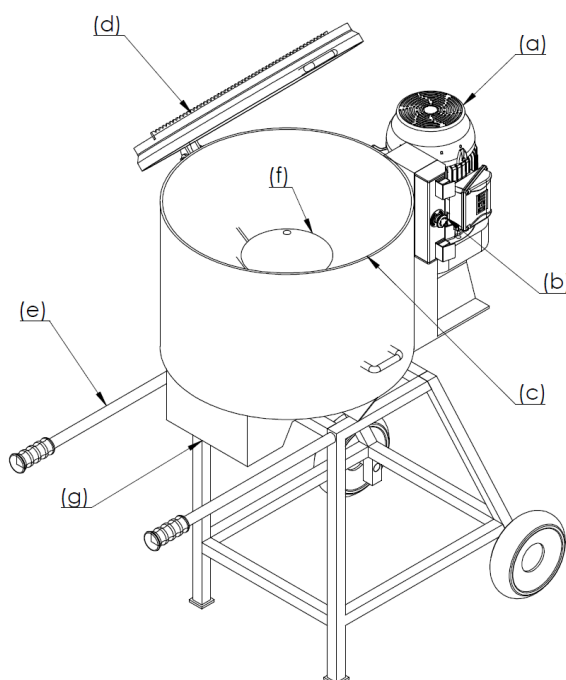


Figura 14 – Misturador de argamassa MIX90 da Betomaq: (a) Motor trifásico; (b) Botão de acionamento; (c) Reservatório; (d) Tampa; (e) Cabo para transporte; (f) Abas de mistura.

Fonte: (Autor, 2022).

O equipamento possui um sistema de engate para fácil remoção e limpeza, dotado de três braços e uma pá, ambos com o intuito de raspar o material, cuidadosamente configurados para a aplicação. O reservatório possui capacidade nominal de 120 L com abertura inferior tipo meia lua para a saída do material.

4.2.2 Bomba de injeção

O modelo da bomba de injeção utilizada na realização desta pesquisa foi o B40 da Betomaq, destinada ao bombeio de natas, solo cimento, argamassas fluídas, argamassa pastosas e concreto celular de granulometria máxima de $\varnothing 6$ mm, e possui caçamba de 125 L dotada de eixo horizontal agitador/alimentador (Figura 15). O Quadro 9 apresenta a descrição técnica da bomba adotada para a realização desta pesquisa.

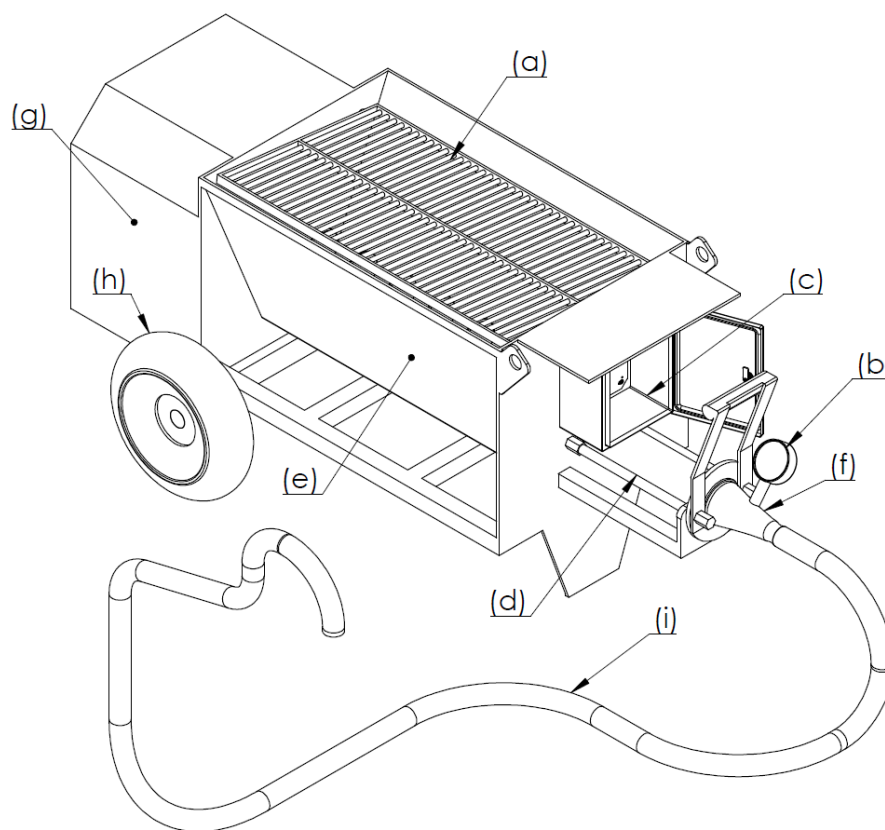


Figura 15 – Bomba de injeção modelo B40 Betomaq: (a) Grade de segurança; (b) Manômetro de pressão; (c) Quadro de energia; (d) Bomba helicoidal; (e) Caçamba; (f) Acoplamento da mangueira; (g) Cabine do motor; (h) Roda de borracha.

Fonte: (Autor, 2022).

Quadro 9 – Descrição técnica da bomba de argamassa modelo B40.

DESCRIÇÃO	TIPO
Capacidade da caçamba	125 L
Unidade bomba padrão	1L6
Acionamento	Motor redutor 3,7 KW (5 cv) 220 Vca
Capacidade teórica	40 Kg/min
Pressão nominal máxima de trabalho	20 BAR
Alcance máximo vertical	30 M (depende do material)

Fonte: (Autor, 2022).

O acionamento do sistema de bombeamento via unidade helicoidal 1L6 WF ocorreu com o auxílio de motor e redutor elétrico trifásico de 5,0 cv – 220/380 Vca. A variação da vazão se deu pelo inversor de frequência para uma produção teórica de 5 – 20 Kg/min e pressão máxima de 20 bar.

Nesta pesquisa foram adotadas duas vazões: uma de 5 Kg/min, que corresponde a uma rotação constante de 320 rpm (valor visualizado no parâmetro 02 do inversor); e outra vazão de 4 Kg/min, numa rotação de 250 rpm.

A argamassa foi bombeada por uma mangueira com ½ polegada de diâmetro até a extrusora. O bico extrusor utilizado foi projetado com uma abertura circular de 20 mm de diâmetro (Figura 16), por oferecer a conformidade das dimensões do objeto impresso em qualquer direção que se locomovesse, garantindo, assim, a confiabilidade das proporções estabelecidas.



Figura 16 – Bocal do protótipo de impressora 3D em escala de bancada com 20 mm de diâmetro: (a) Vista Frontal; (b) Vista Lateral.

Fonte: (Autor, 2022).

4.2.3 Ensaios de calibração da bomba

Este ensaio foi realizado para a obtenção do ajuste da vazão mássica e volumétrica. Utilizou-se um béquer, previamente calibrado com o uso de uma proveta com capacidade de 1000 mL (Figura 17). Adicionou-se água destilada à proveta até a marca de aferição. Após, o líquido foi transferido para o béquer, verificando-se, então, a marca em sua aferição. Adotou-se a densidade da água de 1 g/cm³.

Para início do ensaio, a bomba foi ajustada na vazão teórica de 5 L/min. O equipamento foi então acionado juntamente com o cronômetro, para anotar o tempo gasto para completá-lo até a marca de aferição.



Figura 17 – Calibração do béquer para ensaio de vazão volumétrica: (a) Proveta graduada 1000 ml com água destilada; (b) Béquer com a água destilada já calibrado; (c) Ensaio da vazão volumétrica com béquer calibrado em 1000 ml.

Fonte: (Autor, 2022).

Desta forma, por meio da Equação 1 as vazões volumétricas a serem utilizadas nesta pesquisa foram calculadas, sendo “Q” a vazão, “V” a massa (L) e “t” o tempo (min).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

No ensaio de vazão mássica, adotou-se a massa de 2 Kg. Em balança eletrônica (Prix, modelo 9098), cronometrou-se o tempo gasto para adição de uma massa correspondente a 2 Kg (Figura 18).



Figura 18 – Ensaio da vazão mássica.

Fonte: (Autor, 2022).

Utilizou-se a Equação 2 para as determinações das vazões mássicas, onde “Q” corresponde ao parâmetro da vazão, “M” à massa (Kg), e “t” ao tempo (min).

$$Q = \frac{M}{t} \quad (2)$$

4.3 Validação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada

Para a validação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada, fabricado nesta pesquisa, realizou-se a impressão de objetos, cujas dimensões são apresentadas na Figura 19.

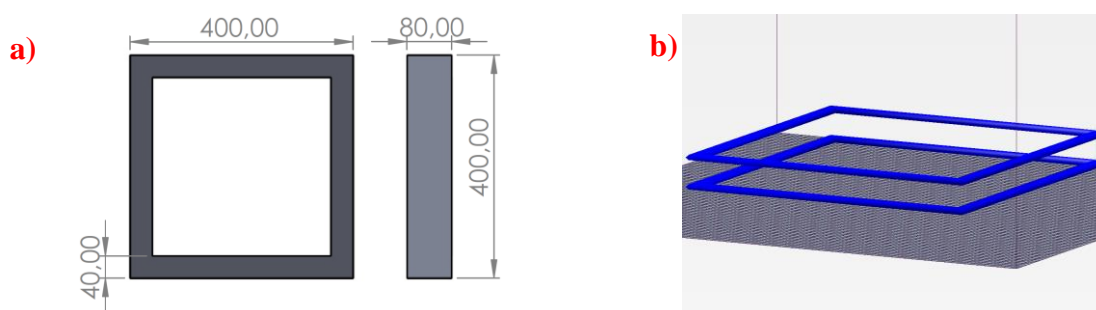


Figura 19 – Projeto para os objetos impressos em protótipo de impressora 3D em escala de bancada. (a) Desenho técnico do objeto impresso; (b) Objeto impresso fatiado no software *Repetier*®.

Fonte: (Autor, 2022).

Na realização do fatiamento dos objetos impressos, utilizados nesta pesquisa, bem como as configurações do protótipo de impressora 3D em escala de bancada, foi adotado o software *Repetier*® (Figura 20), aplicativo desenvolvido pela Hot-World GmbH & Co. KG.

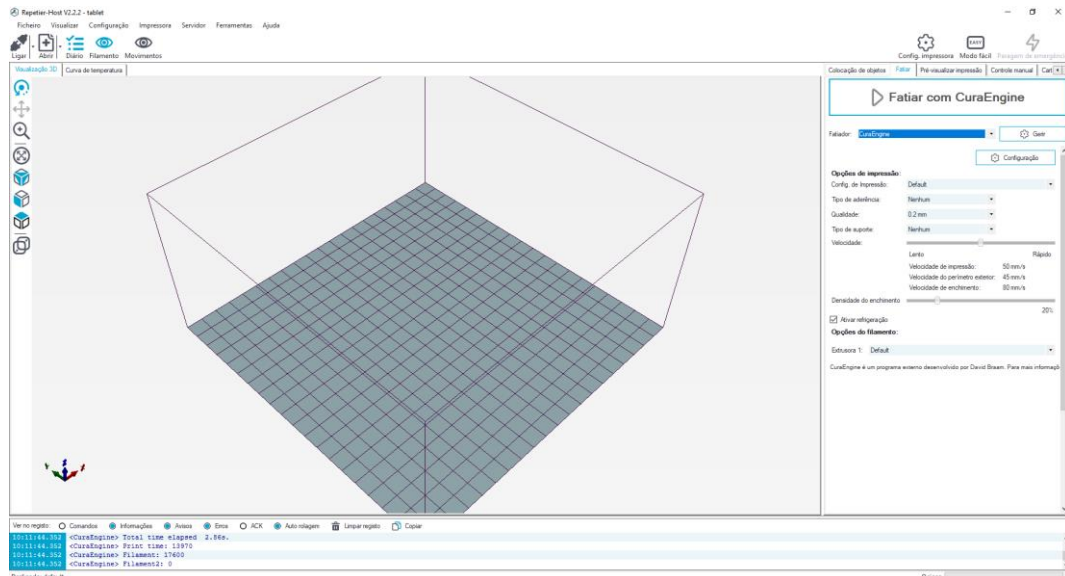


Figura 20 – Software de fatiamento *Repetier*®.

Fonte: (Autor, 2022).

Por meio do *software Repetier*® foi possível variar o preenchimento do objeto utilizado nesta pesquisa para validação do equipamento, indo desde 0% de preenchimento, realizando a impressão apenas do perímetro da peça, até um objeto sólido, com 100% de preenchimento. Adotou-se o preenchimento “linhas” com 0% de densidade (Figura 21b). Na Figura 21a observa-se todas as configurações e parâmetros no *software Repetier*®.

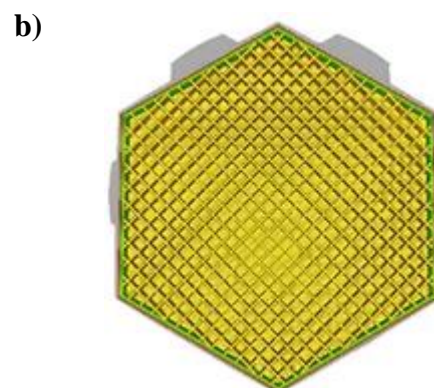
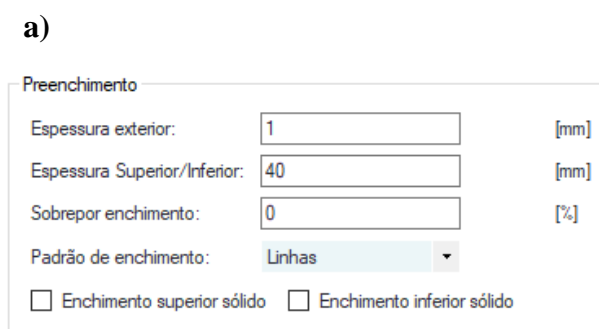


Figura 21 – Configuração do software de fatiamento *Repetier*®: (a) Configurações no software do preenchimento do objeto impresso; (b) Tipo de preenchimento do objeto impresso.

Fonte: (Autor, 2022).

O objeto com formas geométricas definido para a validação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada foi projetado com dimensões de 400 x 400 mm de largura e comprimento e 80 mm de altura. Dessa forma, o protótipo foi configurado para realizar camadas com 40 mm de altura, ou seja, para que os objetos fossem impressos, foi necessária a impressão de duas camadas sobrepostas, totalizando 80 mm de altura (Figura 19b).

4.4 Desenvolvimento das amostras de argamassa

As amostras de argamassa foram desenvolvidas de forma a obter uma consistência que permitissem ser extrudadas e ainda, que suportassem a sobreposição das camadas após serem impressas. Foram preparadas no misturador segundo a ABNT NBR 13281/2001.

Após o preparo no misturador, uma amostra foi retirada para a realização dos ensaios nos estados fresco e endurecido, denominada de Argamassa Referência (AR). Esta argamassa não passou pelo processo de extrusão. Para o material restante no misturador deu-se sequência à impressão pelo processo de extrusão. Estas amostras foram impressas com variações dos parâmetros de vazão do sistema de bombeamento e das velocidades de impressão do protótipo de impressão 3D em escala de bancada.

A seguir tem-se a descrição para o desenvolvimento das amostras de argamassa, iniciando-se pela obtenção e caracterização dos materiais utilizados nesta etapa.

4.4.1 Obtenção e caracterização dos materiais

Os materiais constituintes secos foram fixados na proporção 1:1,33 (cimento: areia), conforme Marchment et al. (2019), Mazhoud et al. (2019) e Yuan et al. (2019), variando o fator água/cimento (A/C) e a proporção, em porcentagem, em relação ao cimento e ao aditivo SP.

A composição das amostras de argamassa utilizada nesta pesquisa foi de 1:0,33:1,33:0,01 correspondendo ao cimento, água, areia e aditivo SP, respectivamente.

As pesagens das matérias-primas foram realizadas em balança eletrônica (Prix, modelo 9098). Para a dispersão mecânica, utilizou-se misturador MIX 90 da Betomaq, com capacidade de 100 L. Os materiais constituintes secos foram adicionados nas quantidades de 45 kg de cimento e 60 kg de areia, perfazendo um total de 105 Kg (Figura 22).



Figura 22 – Materiais constituintes secos no misturador.

Fonte: (Autor, 2022).

4.4.2 Produção das amostras de argamassa

Para a produção das amostras de argamassa, foram preparadas a partir da adaptação da norma ABNT NBR 16541/2016. Foi realizada a separação e pesagem dos materiais constituintes secos e adicionou-os ao misturador, mantendo o equipamento ligado por cinco minutos para homogeneização dos materiais. Em seguida, adicionou-se $\frac{2}{3}$ da água ao misturador em duas partes com intervalo de três minutos, mantendo-o ligado. Por fim, preparou-se uma solução com $\frac{1}{3}$ da água restante e adição do aditivo SP, inserindo-a no misturador por mais cinco minutos, totalizando em torno de 15 minutos.

Após a fabricação da AR no misturador, esta foi transferida ao compartimento da bomba de injeção (Figura 23a). O transporte da argamassa até a saída no bico (Figura 23b) do protótipo de impressora 3D em escala de bancada ocorreu por meio de mangueiras, tendo início o processo de extrusão. A Figura 24 apresenta a sequência metodológica para o preparo das amostras e do processo de extrusão.



Figura 23 – Sistema de bombeamento. (a) Compartimento da bomba de injeção para armazenamento da argamassa, (b) bico da extrusora.

Fonte: (Autor, 2022).

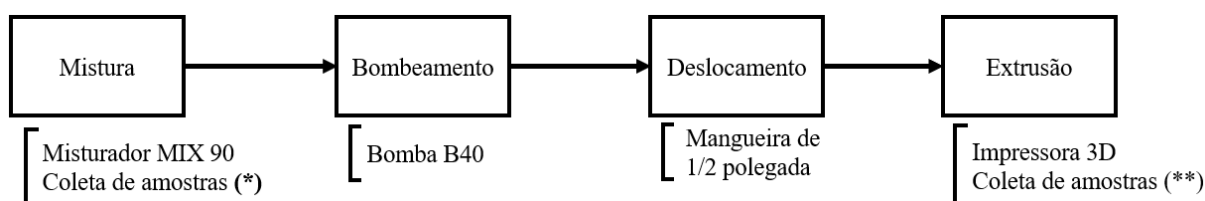


Figura 24 – Sequência metodológica utilizada para o preparo das amostras de argamassas.

Fonte: (Autor, 2022).

(*) – Coleta das amostras de argamassa AR - 1 e AR - 2 – sem extrudar

(**) – Coleta das amostras de argamassa AE1 (vazão de 5 Kg/min – AE1 - 10; AE1 - 30 e AE1 - 50). Coleta das amostras de argamassa AE2 (vazão de 4 Kg/min – AE2 - 30 e AE2 - 50).

O processo de coleta das amostras de argamassas no bico da extrusora ocorreu em duas vazões diferentes. Primeiramente, a bomba foi ajustada para operar numa vazão de 5 Kg/min, tendo o parâmetro de velocidade ajustado no protótipo de impressora 3D em escala de bancada em três diferentes velocidades de impressão: 10, 30 e 50 mm/s. As amostras de argamassas coletadas em cada velocidade foram denominadas de argamassa AE1 - 10 (Argamassa Extrudada com vazão 5 Kg/min e velocidade de 10 mm/s), AE1 - 30 (Argamassa Extrudada com vazão 5 Kg/min e velocidade de 30 mm/s) e AE1 - 50 (Argamassa Extrudada com vazão 5 Kg/min e velocidade de 50 mm/s).

Em seguida, ajustou-se a vazão da bomba de impressão 4 Kg/min. Para esta vazão o parâmetro de velocidade também foi ajustado no protótipo de impressora 3D em escala de bancada em três diferentes velocidades: 30 e 50 mm/s. As argamassas coletadas em cada

velocidade foram chamadas de argamassa, AE2 - 30 (Argamassa Extrudada com vazão 4 Kg/min e velocidade de 30 mm/s) e AE2 - 50 (Argamassa Extrudada com vazão 4 Kg/min e velocidade de 50 mm/s).

Com base na literatura, decidiu-se começar as impressões de forma decrescente, ou seja, maior vazão e velocidade disponível. Desta forma, a primeira coleta da amostra foi realizada para a vazão de 5 Kg/min e velocidade de 50 mm/s, seguida pelas velocidades 30 e 10 mm/s. Foi cronometrado o tempo no qual a água entrou em contato com o cimento no misturador, em que para as impressões na velocidade de 50 mm/s, o tempo medido desde o contato da água com o cimento até a coleta da amostra com 18,65 minutos, seguido do tempo de 51,38 e 67,16 minutos para as velocidades 30 e 10 mm/s, respectivamente. O mesmo processo foi realizado para a vazão de 4 Kg/min, iniciando com a velocidade de 50 mm/s e em seguida 30 mm/s nos tempos 18,65 e 51,38 min, respectivamente. Não foi realizada impressão com o sistema configurado com 4 Kg/min de vazão e velocidade em 10 mm/s.

Para cada configuração (AE1 - 10; AE1 - 30; AE1 - 50; AE2 - 30 e AE2 - 50) ajustada no protótipo de impressora 3D em escala de bancada, coletou-se amostra do material antes da impressão, totalizando 5 amostras. Também foram coletadas duas amostras diretamente no misturador, ou seja, sem extrudar, denominadas argamassas AR - 1 (Argamassa Referência coletada no misturador no tempo de 18,65 minutos) e AR - 2 (Argamassa Referência coletada no misturador no tempo de 51,38 minutos), a fim de comparação. Na Figura 25, tem-se o fluxograma com a sequência das coletas realizadas para as amostras de argamassas utilizadas nesta pesquisa.

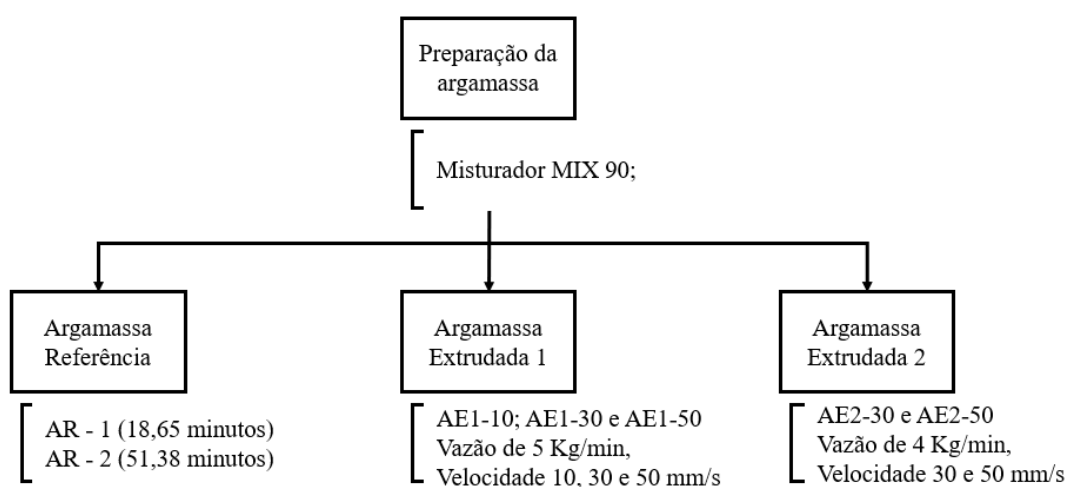


Figura 25 – Metodologia adotada para a realização das coletas das amostras de argamassas produzidas no protótipo de impressora 3D em escala de bancada.

Fonte: (Autor, 2022).

Após o desenvolvimento e coletas das amostras, deu-se sequência a realização dos ensaios no estado fresco.

4.5 Ensaios no estado fresco

Os ensaios descritos a seguir foram realizados para as amostras de argamassa: AR – 1; AR – 2; AE1 – 10; AE1 – 30; AE1 – 50; AE2 – 30 e AE2 – 50. Não foi realizado o ensaio para a amostra de argamassa AE2 – 10.

4.5.1 Índice de consistência

O índice de consistência foi realizado em todas as velocidades conforme descrito na ABNT NBR 13276/2016. Na Tabela 1, tem-se os tempos de misturas para as coletas realizadas.

Argamassa	Tempo da mistura (min)	Vazão (Kg/min)
AR – 1	18,65	Sem extrusão
AR – 2	51,38	Sem extrusão
AE1 – 10	67,16	5
AE1 – 30	51,38	5
AE1 – 50	18,65	5
AE2 – 30	51,38	4
AE2 – 50	18,65	4

Tabela 1 – Coletas para a realização do ensaio do índice de consistência para as argamassas AR – 1; AR – 2; AE1 – 10; AE1 – 30; AE1 – 50; AE2 – 30 e AE2 – 50.

Fonte: (Autor, 2022).

As coletas das amostras (em torno de 500 g de cada) das argamassas AE1 – 10; AE1 – 30; AE1 – 50; AE2 – 30 e AE2 – 50 foram realizadas diretamente no bico da extrusora e acondicionadas em um recipiente metálico (Figura 26) utilizado para o transporte até a mesa de abatimento. Assim, o ensaio foi realizado simultaneamente no tempo de impressão.



Figura 26 – Coleta das amostras de argamassas em recipiente metálico para a realização dos ensaios de índice de consistência.

Fonte: (Autor, 2022).

4.5.2 Absorção de água

O ensaio de determinação da absorção de água ocorreu como descrito na ABNT NBR 13277/2010, utilizando funil de Blücher (Figura 27) para a amostra de argamassa AR – 2.



Figura 27 – Funil de Blücher utilizado para ensaio da absorção de água.

Fonte: (Autor, 2022).

4.5.3 Densidade da argamassa e Teor de ar incorporado

Para a realização do ensaio de determinação da densidade da argamassa por meio da caracterização da massa e do volume e para o teor de ar incorporado, fez-se uso da ABNT NBR 13278/2005.

Estes ensaios foram realizados para a argamassa AR – 2, onde foi adicionada em recipiente cilíndrico (Figura 28).

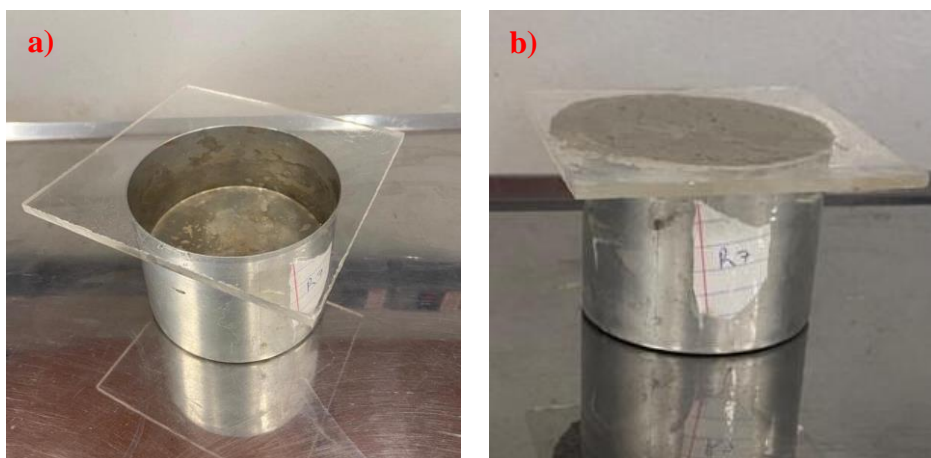


Figura 28 – Aparatos para realização do ensaio de densidade da argamassa. (a) Recipiente com água destilada para calibração do volume; (b) Recipiente com argamassa AR – 2 para determinação da densidade.

Fonte: (Autor, 2022).

4.5.4 Extrudabilidade e construtibilidade

Após a realização dos ensaios no estado fresco, deu-se sequência à impressão das amostras, conforme descrito no item 3.3, em duas camadas de 40 mm de altura cada. Em seguida, as amostras foram analisadas com relação às medidas geométricas (largura, altura e comprimento) com auxílio de um paquímetro cuja resolução é de 0,05 mm. As medidas foram coletadas nos pontos indicados na Figura 29, sendo que para a altura em cada camada foram realizadas coletas geométricas em 3 pontos diferentes.

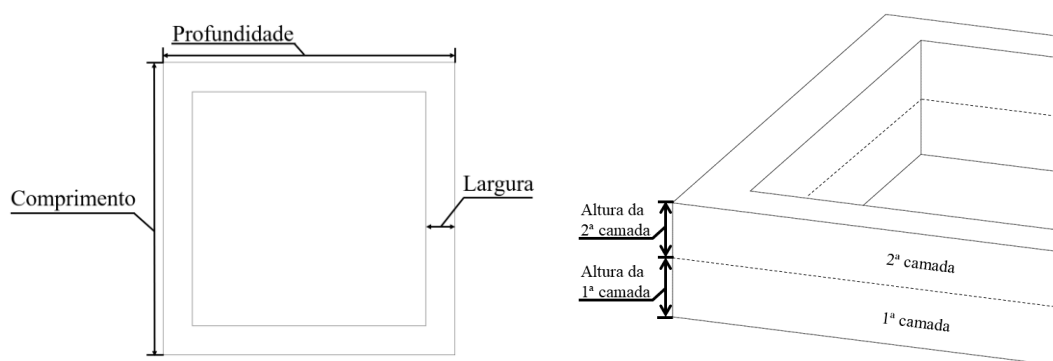


Figura 29 – Pontos do objeto impresso para medição e coleta de dados.

Fonte: (Autor, 2022).

Nas Tabelas 2 e 3 tem-se as impressões realizadas para as vazões de 5 e 4 Kg/min, respectivamente, nas diferentes velocidades de impressão, para todas as amostras AE1 e AE2.

Argamassa	Tempo da mistura (min)	Vazão (Kg/min)	Velocidade (mm/s)	Impresso	Medições
AE1	67,16	5	10	Sim	Não
	51,38	5	30	Sim	Sim
	18,65	5	50	Sim	Sim

Tabela 2 – Impressões realizadas com a vazão de 5 Kg/min para cada velocidade adotada. Fonte: (Autor, 2022).

Argamassa	Tempo da mistura (min)	Vazão (Kg/min)	Velocidade (mm/s)	Impresso	Medições
AE2	67,16	4	10	Não	Não
	51,38	4	30	Sim	Sim
	18,65	4	50	Sim	Sim

Tabela 3 – Impressões realizadas com a vazão de 4 Kg/min para cada velocidade adotada. Fonte: (Autor, 2022).

4.6 Ensaios no estado endurecido

As amostras de argamassas AR – 1, AE1 e AE2, nas respectivas velocidades, foram ensaiadas também no estado endurecido, com relação aos parâmetros mecânicos, conforme descrito a seguir.

4.6.1 Resistência à tração na flexão e à compressão

A amostra da AR – 1 foi coletada conforme ABNT NBR 12142/2010 em um molde prismático, cujas dimensões eram de 4 x 4 x 16 cm (Figura 30a). Com o auxílio de uma espátula, coletou-se a argamassa AR – 1 no tempo 18,65 min (correspondendo ao tempo em que foram impressas as argamassas AE1 – 50 e AE2 – 50), e realizou-se o total preenchimento do molde prismático, com pequenos impactos a fim de eliminar a presença de ar no corpo de prova (CP).

O ensaio de resistência para a argamassa impressa foi realizado por meio da adaptação da normativa ABNT NBR 13279/2005, sendo que antes de cada impressão foi posicionado o

molde prismático debaixo do bico extrusor, possibilitando a realização da extrusão do material até o preenchimento do molde prismático. Pequenos impactos no molde eram realizados a fim de eliminar a presença de ar no CP.

As seguintes amostras foram coletadas para a realização dos ensaios: AE1 – 10, AE1 – 30, AE1 – 50, AE2 – 30, AE2 – 50, totalizando 6 coletas, incluindo a argamassa AR – 1 coletada no tempo de 18,65 minutos. Os CP's foram rompidos aos 28 dias, conforme procedimento da normativa ABNT NBR 13279/2005.

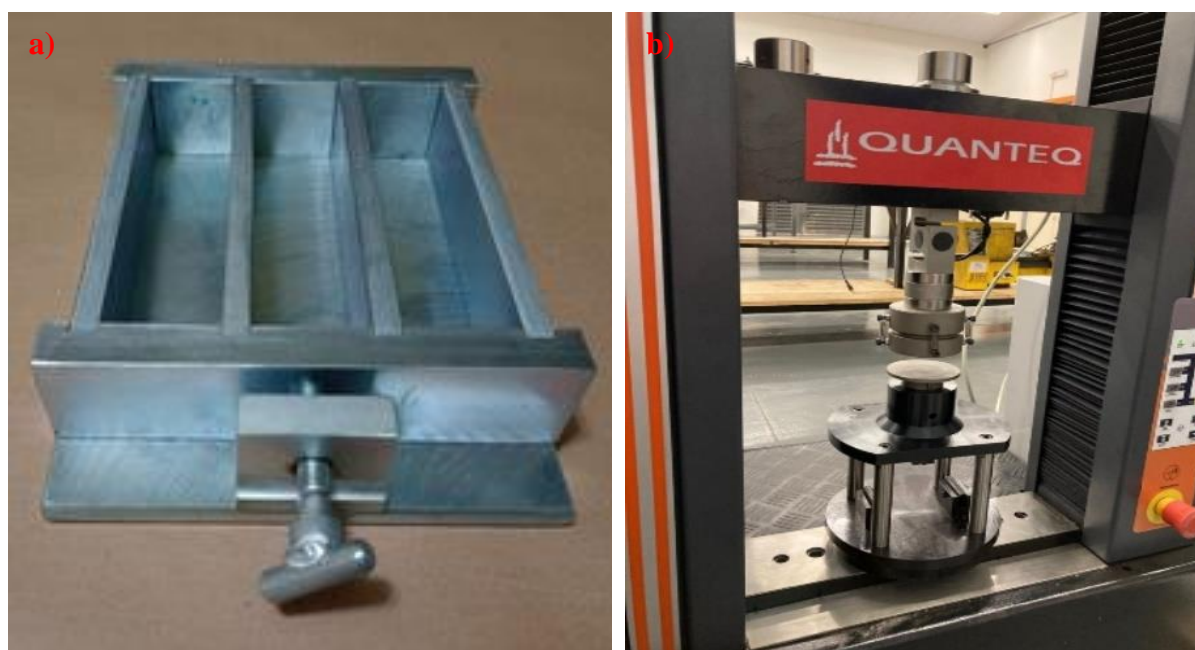


Figura 30 – Aparatos para realização do ensaio de resistência à tração na flexão e compressão. (a) Molde prismático utilizado para coletas das amostras de argamassas com dimensões de 4 x 4 x 16 cm; (b) Máquina de ensaio utilizada para os ensaios à tração na flexão e compressão.

Fonte: (Autor, 2022).

O ensaio foi realizado em triplicata, ou seja, foram coletados 3 corpos de prova (CP's) para cada amostra, totalizando 18 CP's (Figura 31). O ensaio de resistência à tração na flexão e compressão foi realizado em uma máquina de ensaios de 100 KN, modelo Q100000 CH028 NS003.



Figura 31 – CP's para ensaios mecânicos das amostras de argamassa. (a) AR – 1; (b) AE1 – 10; (c) AE1 – 30; (d) AE1 – 50; (e) AE2 – 30; (f) AE2 – 50.

Fonte: (Autor, 2022).

A Figura 32 apresenta os CP's posicionados na base da máquina de ensaio para início das atividades.

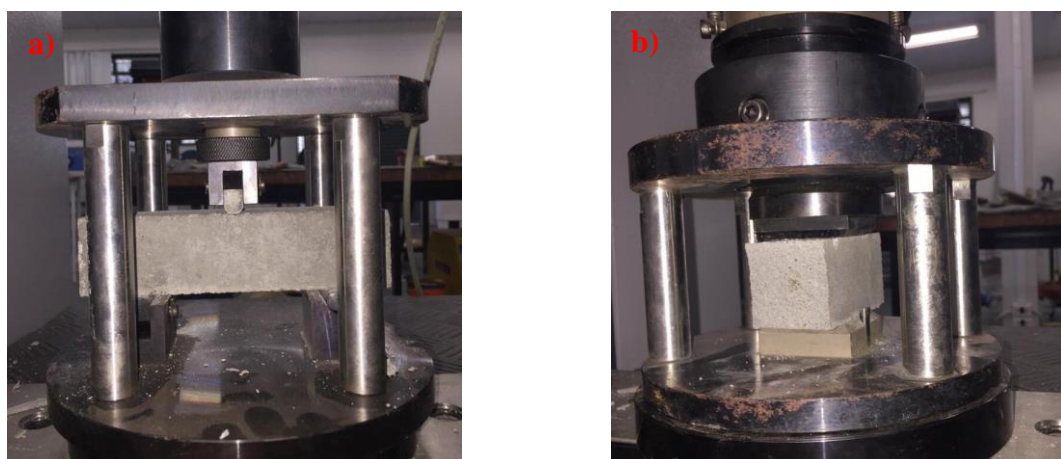


Figura 32 – CP posicionado para início do ensaio. (a) resistência a tração na flexão (b) resistência a tração na compressão.

Fonte: (Autor, 2022).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa são apresentados em três etapas, tendo início no desenvolvimento do protótipo de impressora 3D em escala de bancada. Na sequência, são apresentados os ensaios de extrudabilidade e construtibilidade e, posteriormente, os ensaios nos estados fresco e endurecido. O protótipo de impressora 3D em escala de bancada foi fabricado conforme os projetos mecânico e eletroeletrônico.

Para o sistema mecânico, foi considerado o peso e o deslocamento de todo o conjunto da extrusora por meio da utilização de 4 motores Nema 23 de 30 Kgf/cm²; sendo 2 para o eixo Y, 1 para o eixo X e 1 para o eixo Z. Esses motores foram escolhidos por oferecer maior confiabilidade, torque e facilidade de integração com a placa mãe Ramps 1.4.

Os cabos elétricos foram conectados e dimensionados conforme estabelece a ABNT NBR 5410/2004. Todo o sistema de controle e de potência foi montado em um quadro metálico hermético para garantir a segurança dos equipamentos que integram o sistema elétrico.

Com o sistema elétrico pronto foi instalado o *software Marlin* na placa mãe, habilitando, assim, o protótipo de impressora 3D em escala de bancada para conexão com o *software Repetier*® (AKTER et al., 2018). O equipamento foi conectado ao sistema de forma que as características, como área útil, controle de velocidade e torque dos eixos, tipo dos motores e sensores disponíveis no equipamento, foram habilitados no sistema.

Após a realização das configurações citadas, o equipamento tornou-se apto para a realização de impressões por meio do *software Repetier*®. Este aplicativo foi escolhido por ser gratuito, ter qualidade e praticidade e incluir o fatiador *CuraEngine*, de forma a permitir a preparação do objeto e o comando do protótipo de impressora 3D em escala de bancada (VANDODARIA et al., 2021). Com este software foi possível configurar o preenchimento do objeto, *infill*, que é utilizado para preencher o objeto impresso (VANDODARIA et al., 2021). Não somente isso, pode oferecer maior resistência e peso, além de estar diretamente ligado ao tempo de impressão. Para esta pesquisa, utilizou-se a configuração “linhas” com 0% de densidade por permitir a impressão apenas do perímetro do objeto.

Segundo Hoque et al. (2019), o *software Marlin* pode ser configurado de várias maneiras, conforme a impressora a ser desenvolvida, pois em cada equipamento construído são utilizados insumos diferentes. A Figura 33 apresenta o conjunto de equipamentos utilizado na montagem do protótipo de impressora 3D em escala de bancada para a realização desta

pesquisa.



Figura 33 – Conjunto de equipamentos utilizados na montagem do protótipo de impressora 3D em escala de bancada: (a) Bico extrusor; (b) Protótipo de impressora 3D em escala de bancada; (c) Misturador de argamassa; (d) Mangueira de transporte da argamassa; (e) Bomba de injeção de argamassa.

Fonte: (Autor, 2022).

O sistema de bombeamento foi composto por um misturador, para mistura dos constituintes e uma bomba, para auxílio no transporte da argamassa pelas mangueiras até o bico do protótipo de impressora 3D em escala de bancada, mantendo o fluxo e pressão constantes.

O formato do bico empregado, com 20 mm de diâmetro, foi baseado nos autores LONG et al., (2019); PANDA et al., (2018) e ZHANG et al., (2019).

5.1 Desenvolvimento das amostras

Para o desenvolvimento das amostras, os constituintes secos, areia e cimento, foram analisados quanto aos ensaios de massa específica segundo à ABNT NBR 16916/2021, conforme apresentado na Tabela 4.

Ensaio		Resultados	Referência
Massa específica	Areia	2631 Kg/cm ³	ABNT NBR 16916/2021
	Cimento	3144 Kg/cm ³	
Ensaio granulométrico	Areia	4,75 mm	ABNT NBR NM – ISO 3310-1/2010

Tabela 4 – Resultados dos ensaios físicos realizados nos constituintes secos para o preparo das amostras de argamassas AE1 e AE2.

Fonte: (Autor, 2022).

Já os resultados dos ensaios no estado fresco para as amostras de argamassas AE1 e AE2, segundo as normativas para a realização dos ensaios, são apresentadas na Tabela 5.

Ensaio		Resultados	Referência
Absorção de água		9,17%	ABNT NBR 16916/2021
Densidade argamassa		2275,86 Kg/m ³	ABNT NBR 13278/2005
Teor de ar incorporado		1%	ABNT NBR 13278/2005

Tabela 5 – Resultados dos ensaios no estado fresco realizados nas amostras de argamassas AR – 1 e AR – 2.

Fonte: (Autor, 2022).

O misturador utilizado nesta pesquisa foi indicado segundo o fabricante para dosagem e mistura de argamassas prontas ou traçadas na obra, visando uma melhor aglutinação dos materiais/aditivos. A bomba utilizada para a realização deste trabalho utiliza constituintes secos cujas partículas não sejam superiores a 6 mm, sendo, desta forma, ajustada a granulometria do agregado miúdo em uma peneira de malha 4,75 mm conforme disposto na ABNT NBR NM – ISO 3310-1/2010. O material passante na malha de 4,75 mm foi utilizado para o preparo das amostras utilizadas nesta pesquisa. Valor este que vai de encontro ao adotado por Dai et al. (2021), que utilizaram um bocal nas mesmas dimensões do bocal utilizado nesta pesquisa, uma vez que o tamanho das partículas influencia diretamente no diâmetro do bico da extrusora.

Os ensaios de absorção de água, densidade e o teor de ar incorporado foram realizados apenas com a argamassa AR – 1, de forma a garantir a reprodutibilidade do método. Assim, obteve-se 9,17% de absorção de água, representando uma redução percentual de 1,37 L. Ding et al., (2020b) utilizando agregados miúdos, reciclado e sem reciclagem, obtiveram 13,5% e 4,5%, respectivamente, para o ensaio de absorção. Consideraram esses resultados como sendo excelentes.

A densidade para a amostra AR – 1 foi de 2275,86 Kg/m³, e por meio destes resultados,

é possível pela ABNT NBR 13278/2005 determinar o teor de ar incorporado. A densidade teórica da argamassa foi de aproximadamente 2302,47 Kg/m³ e, conseqüente, o teor de ar incorporado na argamassa AR – 1, resultou em 1%. Baz et al., (2020) afirmam que teores de absorção de até 1% estão relacionados aos vazios formados pela entrada de ar observados no interior da argamassa. O teor de ar incorporado nas argamassas, apesar de favorecer a sua trabalhabilidade, atua de forma desfavorável em relação às resistências mecânicas (BAZ et al., 2020; Khalil et al., 2017).

5.2 Ensaios no estado fresco

Aqui são apresentados os ensaios para as determinações das vazões mássica e volumétrica desta pesquisa, e após essas determinações, as amostras de argamassa foram ensaiadas no estado fresco quanto à vazão e ao índice de consistência para as amostras AE1 – 10, AE1 – 30, AE1 – 50, AE2 – 30, AE2 – 50.

5.2.1 Calibração da vazão

As vazões volumétricas e mássicas foram calculadas conforme descrito no item 4.2.3. O tempo médio de enchimento do béquer na vazão teórica de 5 L /min foi de 24,6 segundos, resultando em 2,46 L/min. Para a vazão teórica de 4 L/min foram necessários 28,2 segundos para o enchimento do recipiente, resultando numa vazão de 2,18 L/min. Resultados esses que comprovam que a vazão volumétrica teórica descrita pela fabricante Betomaq não condizia com a vazão real do equipamento.

Para a determinação da vazão mássica, o tempo médio de enchimento do béquer na vazão teórica de 5 L /min, foi de 24 segundos, resultando em 5 Kg/min. Já para a vazão teórica de 4 L/min, foram necessários 30 segundos para o enchimento do recipiente, resultando numa vazão de 4 Kg/min. Assim, foram adotadas a vazão mássica de 4 e 5 Kg/min para a realização desta pesquisa.

A vazão de 4 Kg/min foi a menor vazão possível para o equipamento utilizado nesta pesquisa. A vazão de 5 Kg/min foi utilizada para fins comparativos na escolha da melhor impressão. Xiao et al., (2020) obtiveram sucesso quando definiram uma vazão de 1,35 L/min, ou seja, aproximadamente 2,47 Kg/min, resultando na impressão de um compartimento em tamanho real com dimensões de 2,5 x 2,5 x 3 metros.

5.2.2 Índice de consistência

O índice de consistência foi realizado com as velocidades na forma decrescente, ou seja (AE1 – 50; AE1 – 30; AE1 – 10; AE2 – 50 e AE2 – 30), visto que o referencial das pesquisas utilizadas como bases fez uso de velocidades acima dos 50 mm/s (Quadro 4). Na Figura 34, tem-se a realização do ensaio do índice de consistência para as argamassas AR – 1; AE1 – 10; AE1 – 30; AE1 – 50; AE2 – 30; AE2 – 50.

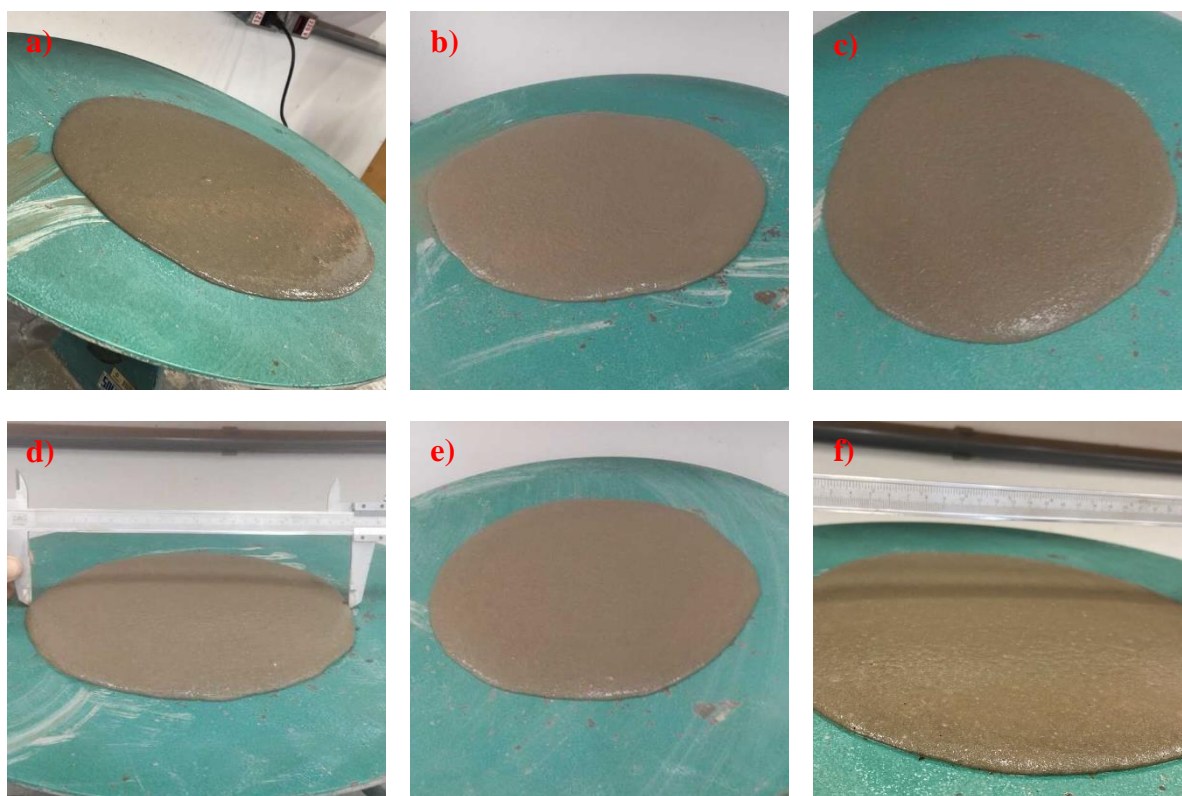


Figura 34 – Ensaio do índice de consistência para as amostras de argamassas. (a) AR – 1; (b) AE1 – 10; (c) AE1 – 30; (c) AE1 – 50; (c) AE2 – 30; (c) AE2 – 50.

Fonte: (Autor, 2022).

O diâmetro médio para o índice de consistência na amostra AR – 1, cuja amostra não passou pelo processo de extrusão, foi de 296,97 mm no tempo de 51,38 min e 255,72 mm quando o tempo de impressão foi de 18,65 min.

Não foi realizado o ensaio do índice de consistência para a amostra AE2 – 10, pois foi comprovado que para a amostra AE1 – 10, o objeto impresso não apresentou forma padronizada, sendo inviável sua utilização no protótipo de impressora 3D em escala de bancada. Na Figura 35, tem-se o diâmetro médio do índice de consistência das amostras AE1 e AE2 para as velocidades de 10, 30 e 50 mm/s.

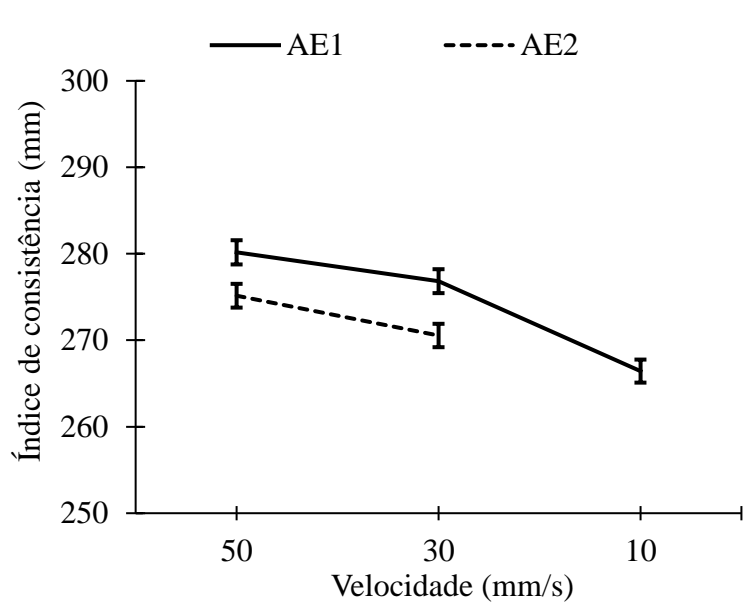


Figura 35 – Diâmetro médio dos índices de consistências para as amostras de argamassas AE1 e AE2.

Fonte: (Autor, 2022).

Observa-se que as amostras AE1 com vazão 5 Kg/min e AE2 com vazão 4 Kg/min obtiveram o mesmo comportamento, como o tempo na qual realizou a impressão foi maior na velocidade de 10 mm/s em relação à velocidade 50 mm/s, conclui-se que independente da vazão estabelecida, quanto maior for o tempo em que seja realizada a impressão, menor será o índice de consistência.

A diminuição do índice de consistência é notável, pois ocorrem reações químicas induzidas pela junção de cimento e do aditivo SP, em qualquer argamassa (GHAFAR et al, 2018; RASHID et al. 2020). Segundo Zhang et al. (2019), o tempo de impressão é diretamente proporcional ao índice de consistência, quanto maior for o tempo de impressão menor será o índice de consistência da argamassa.

É possível observar na Figura 35 que o índice de consistência nas amostras AE1 (5 Kg/min) foi maior, em média 1,95% quando comparadas às amostras AE2 (4 Kg/min), concluindo que quanto maior a vazão, maior será o índice de consistência (NAIR et al., 2021).

5.3 Ensaios no estado endurecido

Os ensaios no estado endurecido foram realizados para as argamassas AR – 1, AE1 e AE2. Todas foram analisadas com relação aos ensaios mecânicos apresentados abaixo, após 28

dias de cura.

5.3.1 Resistência à tração na flexão

Os CP's confeccionados conforme descrito em 4.6.1, para as amostras AR – 1; AE1 – 10, AE1 – 30; AE1 – 50; AE2 – 30; AE2 – 50, foram ensaiados com relação ao parâmetro de resistência à tração na flexão. Na Tabela 6, tem-se os valores determinados para as respectivas amostras.

Corpo de Prova	Argamassas					
	AR – 1	AE1 – 10	AE1 – 30	AE1 – 50	AE2 – 30	AE2 – 50
Média	7,42 MPa	6,92 MPa	7,49 MPa	7,00 MPa	7,26 MPa	8,36 MPa
Desvio padrão	0,72	0,22	0,70	0,15	0,41	0,94
Coefficiente de variação (%)	9,67	3,17	9,29	2,09	5,60	11,26

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão para os CP's das amostras de argamassas AR – 1; AE1 e AE2.

Fonte: (Autor, 2022).

A resistência à tração na flexão determinada para AR – 1 foi de 7,42 MPa. As amostras AE1 – 10, AE1 – 30, AE1 – 50, foram de 6,95; 7,49 e 7,00 MPa, respectivamente. Dai et al. (2021) utilizando um bocal circular com 20 mm de diâmetro, obtiveram valores de 8,53 e 6,51 MPa. Desta forma, os valores de resistência determinados para esta pesquisa estão dentro do esperado, uma vez que o bocal aqui utilizado foi de 12 mm.

Conforme apresentado na Tabela 6, tem-se que para a argamassa AE2, quando houve variação da velocidade de 30 mm/s para 50 mm/s, houve um aumento de 13%, comprovando que em velocidades maiores, a resistência dos corpos de prova aumenta, pois diminui a quantidade de vincos.

Nas mesmas condições de ensaio, Long et al. (2019) determinaram resistência à tração na flexão de 12 MPa na velocidade adotada de 80 mm/s, com bocal de 20 mm de diâmetro, e Ma et al. (2019) fixando a vazão em 0,450 Kg/min e velocidade em 75 mm/s obtiveram resistência de 6,51 MPa com bocal de 12 mm de diâmetro. Assim, tem-se que é possível que a velocidade aliada à vazão no equipamento está diretamente ligada à resistência do material, sendo este um fator determinante para ser adotado.

A amostra AE2 – 50 obteve uma resistência em torno de 16% maior quando comparada à amostra AE1 – 50. Segundo Marchment et al. (2019), pode ter ocorrido fusão entre as camadas dos corpos de prova devido a quantidade de água na mistura.

A vazão não alterou de forma significativa a resistência das amostras impressas na velocidade de 30 mm/s (AE1 – 30 e AE2 – 30), pois houve uma redução da resistência à tração na flexão de apenas 3% quando comparadas.

5.3.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com uma das partes oriundas dos corpos de prova resultantes do ensaio de resistência à tração na flexão. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para as amostras ensaiadas quanto a este parâmetro.

Corpo de Prova	Argamassas					
	AR – 1	AE1 – 10	AE1 – 30	AE1 – 50	AE2 – 30	AE2 – 50
Média	37,66 MPa	35,10 MPa	39,96 MPa	40,54 MPa	38,34 MPa	34,33 MPa
Desvio padrão	2,16	1,70	7,28	0,97	9,18	5,02
Coefficiente de variação (%)	5,73	4,84	18,23	2,40	23,95	14,62

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão para os corpos de prova das amostras de argamassas AR – 1, AE1 e AE2.

Fonte: (Autor, 2022).

A resistência à compressão para o CP da amostra AR – 1 foi de 36,69 MPa, indo de encontro ao determinado por Ma et al. (2019), que utilizando bocal circular com 12 mm de diâmetro, vazão de 0,450 Kg/min e velocidade de 75 mm/s, obtiveram 39,50 MPa, sendo este o maior valor determinado.

Para as amostras AE1 – 10, AE1 – 30, AE1 – 50, observa-se que a maior resistência à compressão foi na velocidade de 50 mm/s; 40,64 MPa. Nas amostras confeccionadas para AE2, a amostra AE2 – 30 apresentou 38,48 MPa, sendo maior quando comparado a amostra AE2 – 50.

Dai et al. (2021) obtiveram resistência de 46 MPa e Long et al. (2019) 55,00, 36,21 e 40,64 MPa, e observaram melhora na resistência à compressão de 18,6% no CP com idade de

28 dias. Marchment et al. (2019) justificam que as resistências entre 34 e 53,4 MPa estão associadas à dispersão de partículas de cimento aglutinado ao aditivo SP. Tem-se também que a vazão está diretamente associada à resistência do material, sendo que para a argamassa AE1 (vazão 5 Kg/min) independente da velocidade, foram obtidas maiores resistências com relação à compressão.

Para os CP's impressos a 50 mm/s, a resistência à compressão obtida foi de 40,64 MPa, tendo um aumento de 15% quando comparadas às amostras AE2 (vazão 4 Kg/min). Já os CP's impressos a 30 mm/s atingiram resistência à compressão de 40,04 MPa, ou seja, 4% maior à amostra de argamassa AE1 (5 Kg/min) na mesma velocidade.

Ma et al. (2019) obtiveram resistência à compressão de 40 MPa utilizando bocal circular de 12 mm de diâmetro, vazão de 0,450 Kg/min e velocidade de 75 mm/s; Dai et al. (2021) com bocal circular de 20 mm de diâmetro e Long et al. (2019), com um bocal circular de 20 mm de diâmetro na velocidade de 80 mm/s, obtiveram 39,50; 46 e 55 MPa, respectivamente, afirmando que o método de impressão abordado é viável para a utilização na construção civil. Justifica-se, desta forma, os resultados determinados nesta pesquisa.

5.4 Validação do protótipo de impressora 3D em escala de bancada

A validação do equipamento foi realizada após cada impressão, em todas as amostras de argamassas extrudadas (AE1 – 10, AE1 – 30, AE1 – 50, AE2 – 30, AE2 – 50), os objetos impressos foram analisados com relação às medidas geométricas (largura, altura e comprimento) com o auxílio de um paquímetro com resolução de 0,05 mm. Na Figura 36 tem-se as impressões realizadas para este ensaio.





Figura 36 – Impressões dos objetos para as amostras de argamassas. (a) AE1 – 10; (b) AE1 – 30; (c) AE1 – 50; (d) AE2 – 30; (e) AE2 – 50.

Fonte: (Autor, 2022).

A impressão do objeto apresentado no item 3.3 ocorreu na velocidade do protótipo de impressora 3D em escala de bancada, de forma decrescente, ou seja (AE1 – 50; AE1 – 30; AE1 – 10; AE2 – 50 e AE2 – 30), visto que o referencial das pesquisas utilizadas como base fez uso de velocidades acima dos 50 mm/s (Quadro 4). A Tabela 8 apresenta as variáveis de extrudabilidade e construtibilidade do objeto impresso, conforme Figura 29.

Parâmetros		AE1 – 30	AE1 – 50	AE2 – 30	AE2 – 50
Altura	1ª camada ($\pm 1,39$) (mm)	51,65	49,00	52,12	50,40
	2ª camada ($\pm 3,58$) (mm)	33,37	31,27	31,12	25,05
Largura	1ª camada ($\pm 10,75$) (mm)	99,62	85,28	84,73	73,37
	2ª camada ($\pm 17,10$) (mm)	132,75	106,78	107,38	91,47

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de extrudabilidade e construtibilidade das amostras de argamassas AE1 e AE2 nas velocidades 30 e 50 mm/s.

Fonte: (Autor, 2022).

Não foi realizada a impressão com a amostra AE2 – 10, pois após análise dos resultados obtidos para a amostra AE1 – 10, verificou-se que esta não apresentou formato para realização

das medidas, deduziu-se desta forma que não haveria parâmetros para mensurar. Devido à baixa velocidade do protótipo de impressora 3D em escala de bancada acrescentava um alto volume de argamassa em um mesmo ponto, fazendo com que ela espalhasse na mesa de impressão.

A largura do objeto projetado no item 4.3 Figura 19a foi de 40 mm, sendo que para todas as amostras houve variação entre 73,37 e 132,75 mm, ou seja, um aumento percentual de 83,42% a 231,87%, respectivamente. Com relação à altura do objeto projetado no item 4.3 Figura 19a, esta foi de 80 mm, isso para que fosse possível realizar a impressão de duas camadas com 40 mm de altura cada. O objeto impresso apresentou uma variação com relação à altura de 25,05 e 52,12 mm, ou seja, de uma redução de 37,28%.

Com base na Tabela 8, tem-se que a amostra com medidas mais próximas às projetadas foi a AE1 – 50, na qual a altura da primeira camada apresentou 49 mm, 22,50% maior, e a segunda camada de 31,27 mm, apresentando uma redução de 21,83% à projetada. Já a largura da primeira e segunda camada foi de 85,28 e 73,37 mm, quando comparadas ao valor projetado de 40 mm, com um aumento de 113,20% e 83,43%, respectivamente. A impressão da primeira camada da argamassa AE1 – 50, realizada com a extrusora alimentada pela bomba B40 da Betomaq, é mostrada na Figura 37.



Figura 37 – Impressão da primeira camada da argamassa AE1 – 50, com a bomba B40 Betomaq. Fonte: (Autor, 2022).

Nota-se a presença de vincos na argamassa AE1 – 50 bombeada, formados quando a

velocidade não corresponde à vazão do equipamento. Uma das formas de minimizar ou até eliminar os vincos, é aumentar a velocidade de impressão. Porém, o limite de velocidade máximo permitida para esse equipamento é de 50 mm/s. Segundo Nerella et al., (2018) se a vazão do material não estiver sincronizada com precisão na velocidade do cabeçote de impressão, a estrutura impressa não será contínua ou coerente. Nota-se, no Quadro 4, que autores como Kruger et al. (2019), Ma et al. (2019), Long et al. (2019) e Nerella et al. (2020) utilizam velocidades maiores que as adotadas aqui, relatando melhoras no processo de extrusão.

Buswell et al. (2018) definem a extrudabilidade como a capacidade de extrudar a mistura através de um bocal sem deformação transversal considerável, sendo que para este parâmetro não existem testes formais de referência, sendo atualmente avaliada por meio de inspeção visual. Conforme Le et al. (2012), a extrudabilidade é afetada pela forma e tamanho do bocal de extrusão, pelo movimento e pela posição do bocal em relação à camada anterior, fato destacado nesta pesquisa. Entretanto, a segregação de partículas na mangueira pode levar a bloqueios causados pelas partículas da mistura e/ou mistura insuficiente antes do bombeamento (BUSWELL et al., 2018).

A manufatura aditiva é particularmente sensível a pausas no processo de construção porque os componentes são criados através da estratificação sequencial de materiais que devem se unir para formar um componente homogêneo, portanto, há maior potencial em não formar o ligamento entre as camadas do que nos métodos mais convencionais (BUSWELL et al., 2018).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o desenvolvimento da sociedade, o padrão, a estética e os métodos convencionais de construção da arquitetura são gradualmente aprimorados. A aplicação da manufatura aditiva na construção civil pode completar o setor construtivo, e demonstra ser uma tecnologia capaz de promover o processo construtivo sustentável.

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver um protótipo de impressora 3D em escala de bancada, acoplada a um sistema de bombeamento para argamassa, de forma a promover uma construção mais limpa, com base nos resultados dos ensaios realizados, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

1. O protótipo de impressora 3D em escala de bancada foi concluído permitindo que todos os ensaios com as amostras de argamassa idealizados fossem realizados. As quatro etapas para a fabricação do equipamento sendo: mecânica; elétrica; instalação do software e configuração foram realizadas gradativamente conforme finalização da etapa anterior. O equipamento funcionou adequadamente superando as expectativas.
2. O acoplamento do sistema de bombeamento, no protótipo de impressora 3D em escala de bancada foi de suma importância. O sistema de bombeamento agregou agilidade e possibilitou trabalhar com maior volume de material. Foi realizada a validação da vazão volumétrica da bomba chegando a 2,46 e 2,18 L/min, correspondendo à vazão mássica de 5 e 4 Kg/min, respectivamente.
3. Para o desenvolvimento da argamassa, baseou-se na literatura, que utilizaram quantidades exatas de materiais constituintes secos, assim a proporção fixada neste trabalho foi de 1:1,33 (cimento: areia), com 0,33 no fator A/C e 0,01% na proporção do aditivo SP, em relação ao cimento. Com essas proporções, a argamassa atingiu os principais resultados esperados nesta pesquisa, a extrudabilidade e construtibilidade, e ainda possuir resistência mecânicas suficientes para aplicação na construção civil.
4. Os ensaios no estado fresco para as argamassas desenvolvidas obtiveram características parecidas com pesquisas de autores como: LONG et al. (2019); MA et al. (2020); MARCHMENT et al. (2019); MOEINI et al. (2020) e YUAN et al. (2019), cujo índice de consistência para a argamassa AE1, nas velocidades de 10, 30 e 50 mm/s, reduziu-se em 10,28%, 6,78% e 5,66%, respectivamente,

e a argamassa AE2 nas velocidades de 30 e 50 mm/s, reduziram em 8,90% e 7,35%, respectivamente, quando comparadas com a argamassa AR – 1. A absorção de água atingiu 93,79%, resultando em uma perda de aproximadamente 1 L de água para o sistema. Já a densidade da argamassa foi de 2302,47 Kg/m³ com um teor de ar incorporado de 1%.

5. Foram realizados dois ensaios nos estados endurecido, o ensaio de resistência à tração na flexão e na compressão. A avaliação na flexão teve um bom desempenho mecânico, pois apresentou resistência após 28 dias de cura, entre 6,95 e 7,49 MPa, para as amostras de argamassa AE1, e entre 7,26 e 8,35 MPa, para as amostras de argamassa AE2, valores que atendem aos padrões, visto que a argamassa AR – 1 atingiu 7,42 MPa de resistência à tração na flexão. Já a avaliação da resistência à compressão também apresentou um ótimo desempenho mecânico, apresentando resistência após 28 dias de cura, entre 36,21 e 40,64 MPa, para a argamassa AE1; e entre 34,71 e 38,48 MPa, para a argamassa AE2, e atingindo 36,69 MPa para a argamassa AR – 1. Portanto, a argamassa desenvolvida e avaliada é passível de ser utilizada na manufatura aditiva.

Sugere-se para estudos futuros, o estudo de diferentes traços, inclusive com o desenvolvimento de materiais compósitos com foco na sustentabilidade. Isso é importante, pois aprimora esta pesquisa, trazendo novas oportunidades de promover a tecnologia limpa na construção civil.

7 REFERÊNCIAS

- ABELE, E.; METTERNICH, J.; TISCH, M.; CHRYSSOLOURIS, G.; SIHN, W.; ELMARAGHY, H.; HUMMEL, V.; RANZ, F. (2015). Fábricas de Aprendizagem para Pesquisa, Educação e Treinamento. **Procedia CIRP**, 32, 1–6. 2015. DOI: <https://doi/10.1016/j.procir.2015.02.187>
- ABNT NBR 12142. (2010). Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT NBR 13276. (2016). Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Argamassa Para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos: Determinação do Índice de Consistência**. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT NBR 13277. (2005). Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da retenção de água**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT NBR 13278. (2005). Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT NBR 13279. (2005). Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT NBR 16541. (2016). Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Argamassa Para Assentamento e Revestimento de Paredes e tetos: Preparo da Mistura Para a Realização de ensaios**. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT NBR 16916. (2021). Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregado Miúdo: Determinação da Densidade e da Absorção de Água**. Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT NBR 16916. (2021). Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregado miúdo: Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT NBR 5410. (2004). Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT NBR NM – ISO 3310-1. (2000). Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação**. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT NBR NM 30. (2000). Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Mercosul. **Agregado fino: Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2000.
- AKTER, M. S.; KABIR, M. H. (2018). Temperature optimization of RepRap (Replicating Rapid-prototyper) 3D printer. **2018 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Material and Electronic Engineering (IC4ME2)**. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ic4me2.2018.8465657>

ALIZADEH, M.; TADAYON, M.; H.; JOLFAEI, A. Secure ticket-based authentication method for IoT applications, **Digital Communications and Networks**. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2021.11.003>.

ALMEIDA JR, P. D.; LIMA, L. M. A.; ALMEIDA, L. F. D. (2021). A 3D-printed robotic system for fully automated multiparameter analysis of drinkable water samples. **Analytica Chimica Acta**, 1169, 338491. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338491>

AMESTICA, O. E.; MELIN, P. E.; DURAN-FAUNDEZ, C. R.; LAGOS, G. R. (2019). An Experimental Comparison of Arduino IDE Compatible Platforms for Digital Control and Data Acquisition Applications. **IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/chilecon47746.2019.8986865>

ANDREW, J.; SRINIVASAN, S. M.; AROKIARAJAN, A.; NATH DHAKAL, H. (2019). Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: a critical review. **Composite Structures**, V. 224, P. 111007, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.111007>

ARANGO, D.C.; JARAMILLO, S.B.; MONSALVE, P.A.; HERNÁNDEZ, A.V.; BOTERO, L. F. B. (2019). Relationships between lean and sustainable construction: Positive impacts of lean practices over sustainability during construction phase. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 1322-1337, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.216>

ARANJO, B.; SOORI, P. K.; TALUKDER, P. (2012). Stepper motor drives for robotic applications. **IEEE International Power Engineering and Optimization Conference**. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/peoco.2012.6230890>

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. (2010). The Internet of Things: A Survey, **Comput. NETW.** 54 (15) 2787–2805. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.COMNET.2010.05.010>

BAAS, S.; SAGGIOMO, V. (2021). Ender3 3D printer kit transformed into Open, Programmable Syringe Pump set, **HardwareX**. (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00219>

BASSI, L. (2017). Indústria 4.0: Esperança, hype ou revolução? **IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)**. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/rtsi.2017.8065927>

BAZ, B.; AOUAD, G.; REMOND, S. (2020). Effect of the printing method and mortar's workability on pull-out strength of 3D printed elements. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 117002, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117002>

BIGLIARDIA, B.; BOTTANIA, E.; FILIPPELLI, S. (2022). A study on IoT application in the Food Industry using Keywords Analysis. **3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing**, Procedia Computer Science 200 1826–1835. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.383>

BORRELLO, J.; NASSER, P.; IATRIDIS, J.; COSTA, K. D. (2018). 3D Printing a

Mechanically Tunable Acrylate Resin on a Commercial DLP-SLA Printer. **Additive Manufacturing**. (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.019>

BUCHANAN, C.; GARDNER, L. (2019). Metal 3d printing in construction: a review of methods, research, applications, opportunities, and challenges. **Engineering Structures**, 180, 332-348. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>

BUSH, J.; DOYON, A. (2019). Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute? **Cities**, v. 95, p. 102483, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102483>

BUSWELL, R. A.; LEAL DE SILVA, W. R.; JONES, S. Z.; DIRRENBERGER, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>

CABRAL, L.; CÂNDIDO, G. (2019). Urbanização, vulnerabilidade, resiliência: relações conceituais e compreensões de causa e efeito. **URBE. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.002.AO08>

CHOUGAN, M.; MAROTTA, E.; LAMASTRA, F. R.; VIVIO, F.; MONTESPERELLI, G.; IANNIRUBERTO, U.; BIANCO, A. (2019). A systematic study on EN-998-2 premixed mortars modified with graphene-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116701, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116701>

CO, K., J.; ONG, A., V.; PERADILLA, M. (2021). WSN Data Collection and Routing Protocol with Time Synchronization in Low-cost IoT Environment, **Procedia Computer Science**, Volume 191, 2021, Pages 102-110, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.016>.

COJUHARI, I.; FIODOROV, I.; IZVOREANU, B.; MORARU, D.; BOTNARU, S. (2017). Automatic temperature control in 3D printing of the polymer details. **International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)**. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/sielmen.2017.8123287>

DAI, S.; ZHU, H.; ZHAI, M.; WU, Q.; YIN, Z.; QIAN, H.; HUA, S. (2021). Stability of steel slag as fine aggregate and its application in 3D printing materials. **Construction and Building Materials**, 299, 123938. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123938>

DALLASEGA, P.; RAUCH, E.; LINDER, C. (2018). Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review. **Computers in Industry**. 99, 205–225. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.03.039>

DANDAN H.; XIAOBING P. (2010). Research on the key technologies of CAD / CAM integrated system. **International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering**. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/mace.2010.5535721>

DING, T.; XIAO, J.; QIN, F.; DUAN, Z. (2020a). Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages. **Construction and Building Materials**, 248, 118654. 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118654>.

DING, T.; XIAO, J.; ZOU, S.; WANG, Y. (2020b). Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand. **Cement and Concrete Composites**, 103724. 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103724>

EL-SAYEGH, S.; ROMDHANE, L.; MANJIKIAN, S. (2020). A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 20, n. 2, p. 1-25, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00038-w>

FLORÊNCIO, E. Q. (2019). **A impressão 3D em concreto e seu impacto na produção da arquitetura: o futuro da construção civil?**. 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmica do Espaço Habitado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/5537>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2022.

FURET, B.; POULLAIN, P.; GARNIER, S. (2019). 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete. **Additive Manufacturing**, v. 28, p. 58-64, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.002>

GARCIA, M. J.; CHRISTIEN, L.; GARCÍA-ESCALONA, E.; GONZÁLEZ-GARCÍA, C. (2020). Sensitivity of green spaces to the process of urban planning. Three case studies of Madrid (Spain). **Cities**, v. 100, p. 102655, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2020.102655>

GE, L.; DONG, L.; WANG, D.; GE, Q.; GU, G. (2010). A digital light processing 3D printer for fast and high-precision fabrication of soft pneumatic actuators. **Sensors and Actuators: A Physical**. (2010), <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.02.041>

GENNADIEVNA, E. P.; VLADISLAVOVICH, P. M.; VLADISLAVOVICH, O. E.; BALTHAZAR, D. A. (2020). Research of design parameters influence of building wall, constructed with the help of 3d printer, on its stress state. **Journal of Applied Engineering Science**, 18(4), 565 - 570. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes0-28755>

GHAFFAR, S. H.; CORKER, J.; FAN, M. (2018). Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. **Automation in Construction**, v.93, p.1-11, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>

GIOVANNI, C.; ENRICO, D.; XAVIER, K.; VALENTINA, C.; LAURENT, P. (2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. **Acta Astronautica**, 93, 430–450. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034>

GRAVEN, O. H.; BJÖRK, J. (2016). The use of an Arduino pocket lab to increase motivation in Electrical engineering students for programming. **IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)**. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/tale.2016.7851800>

GUO, H.; LV, R.; BAI, S. (2019). Recent advances on 3D printing graphene-based composites. **Nano Materials Science**, v. 1, p. 101-115, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.03.003>

H. ZHANG. (2021). Research on Application of Computer Aided Design Photoshop in Environmental Art Design, **2nd International Conference on Big Data and Informatization Education (ICBDIE)**, pp. 437-440. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICBDIE52740.2021.00105>

HAGER, I.; GOLONKA, A.; PUTANOWICZ, R. (2016). 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? **Procedia Engineering**, vol. 151, 292 – 299, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>

HAMIDI, F.; ASLANI, F. (2019). Additive manufacturing of cementitious composites: materials, methods, potentials, and challenges. **Construction and Building Materials**, V. 218, P. 582-609, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.05.140>.

HOQUE, M. M.; JONY, M. M. H.; HASAN, M. M.; KABIR, M. H. (2019). Design and Implementation of an FDM Based 3D Printer. **International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2)**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ic4me247184.2019.9036538>

HSIEH, C.-T. (2016). Development of an integrated 3D printer and laser sculpting system. **11th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)**. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/impacto.2016.7800062>

JABBOUR, A. B.; JABBOUR, C. J.; FOROPON, C.; FILHO, M. G. (2018). When titans meet—can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? therole of critical success factors. **Technological Forecasting and Social Change**, 132. P. 18-25. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2018.01.017>

JALAEI, F.; MOHAMMADI, S. (2020). An integrated BIM-LEED application to automate sustainable design assessment framework at the conceptual stage of building projects. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, p. 101979, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101979>

JONES, R.; HAUFE, P.; SELLS, E.; IRAVANI, P.; OLLIVER, V.; PALMER, C.; BOWYER, A. (2011). RepRap – the replicating rapid prototyper. **Robótica**, 29(01), 177-191. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1017/s026357471000069x>

KAMBLE, P. S.; A. KHOJE, S.; A. LELE, J. (2018). Recent Developments in 3D Printing Technologies: Review. **Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)**. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/iccons.2018.8662981>

KARJI, A.; WOLDESENBET, A.; KHANZADI, M.; TAFAZZOLI, M. (2019). Assessment of Social Sustainability Indicators in Mass Housing Construction: A Case Study of Mehr Housing Project. **Sustainable Cities and Society**, v. 50, p. 101697, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101697>

KHALIL, N.; AOUAD, G.; EL CHEIKH, K.; RÉMOND, S. (2017). Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 382-391, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109>

KHANNA, A.; KAUR; S. (2019). Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, 157, 218–231. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.039>

KHOSHNEVIS B. (2004). Automated construction by contour crafting - related robotics and information technologies. **Automation in Construction**. 13(1), 5–19. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>

KHOSHNEVIS B.; DUTTON R. (1998) Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials, **Materials Technology**, 13:2, 53-56, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1080/10667857.1998.11752766>

KHOSHNEVIS, B.; BEKEY, G. (2003) Automated construction using contour crafting—applications on earth and beyond, **The International Association for Automation and Robotics in Construction**, pp. 489–494. 2003. DOI: <https://doi.org/10.22260/ISARC2002/0076>.

KHOSHNEVIS, B.; DOOIL H.; YAO, K.; THIA; ZHENGHAO, Y. (2006). Mega-scale fabrication by Contour Crafting. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, 1(3), 301. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijise.2006.009791>

KLEINA N. (2021). Primeira casa do mundo impressa em 3D está à venda nos EUA. **tecmundo**. 2020. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/210281-primeira-casa-mundo-impressa-3d-venda-eua.htm>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2021.

KONDAVEETI, H. K.; KUMARAVELU, N. K.; VANAMBATHINA, S. D.; MATHE, S. E.; VAPPANGI, S. (2021). A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations. **Computer Science Review**, 40, 100364. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100364>

KRUGER, J.; ZERANKA, S.; VAN ZIJL, G. (2019). An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 372-386, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.078>

LA ROSA, D.; PAPPALARDO, V. (2020). Planning for spatial equity-A performance based approach for sustainable urban drainage systems. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, p. 101885, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2019.101885>

LABONNOTE, N.; RONNQUIST, A.; MANUM, B.; RÜTHER, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. **Automation in Construction**, 72, 347–366. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>

LAI, C.-K.; CIOU, J.-S.; TSAI, C.-C. (2017). FPGA-based stepper motor vector control system design. **International Automatic Control Conference (CACS)**. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/cacs.2017.8284269>

LASLETT, D.; URMEE, T. (2020). The effect of aggregation on city sustainability rankings. **Ecological Indicators**, v. 112, p. 106076, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106076>

- LE, T. T.; AUSTIN, S. A.; LIM, S.; BUSWELL, R. A.; GIBB, A. G. F.; THORPE, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and Structures**, 45(8), 1221–1232. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- LE, T. T.; AUSTIN, S. A.; LIM, S.; BUSWELL, R. A.; LAW, R.; GIBB, A. G. F.; THORPE, T. (2012). Hardened properties of high-performance printing concrete. **Cement and Concrete Research**. 42(3), 558–566. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>
- LEE, C.; FUMAGALLI, A. (2019). Internet of Things Security - Multilayered Method for end to end Data Communications Over Cellular Networks. **IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/wf-iot.2019.8767227>
- LI, P.; ZHU, G.; ZHANG, M. (2020). Linear Active Disturbance Rejection Control for Servo Motor Systems with Input Delay via Internal Model Control Rules. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 1–1. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2020.2970617>
- LIANG, Y.; DU, M.; WANG, X.; XU, X. (2020). Planning for urban life: A new approach of sustainable land use plan based on transit-oriented development. **Evaluation and Program Planning**, p. 101811, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2020.101811>
- LIM, S.; BUSWELL, R. A.; LE, T. T.; AUSTIN, S. A.; GIBB, A. G. F.; THORPE, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. **Automation in Construction**. 262–268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>
- LIM, S.; BUSWELL, R. A.; VALENTINE, P. J.; PIKER, D.; AUSTIN, S. A. D. E.; KESTELIER, X. (2016). Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components. **Additive Manufacturing**, 12, 216–230. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.004>
- LONG, W. J.; TAO, J. L.; LIN, C.; GU, Y.; MEI, L.; DUAN, H.B.; XING, F. (2019). Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 118054, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118054>
- LU, B.; WENG, Y.; LI, M.; QIAN, Y.; LEONG, K. F.; TAN, M. J.; QIAN, S. (2019). A systematical review of 3d printable cementitious materials. **Construction and Building Materials**, 207, 477-490. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.02.144>
- LUKIC, M.; NINKOVIC, P.; STOJIC, D.; MILINKOVIC, M.; VEINOVIC, S. (2019). Static Excitation of the 7.5 MW Synchronous Motor for Compressor Drive. **18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/infoteh.2019.8717764>
- MA, G.; LI, Z.; WANG, L.; WANG, F.; SANJAYAN, J. (2019). Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 770-783, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008>
- MA, G.; SALMAN, N. M.; WANG, L.; WANG, F. (2020). A novel additive mortar

leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing. **Construction and Building Materials**, 244, 118305. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118305>

MADAKAM, S.; RAMASWAMY, R.; TRIPATHI, S. (2015). Internet of Things (Iot): A literature review. **Journal of Computer and Communications**, 3(5), 164–173. 2015. DOI: <https://doi.org/10.4236/JCC.2015.35021>

MARANGHI, S.; PARISI, M. L.; FACCHINI, A.; RUBINO, A.; KORDAS, O.; BASOSI, R. (2020). Integrating urban metabolism and life cycle assessment to analyse urban sustainability. **Ecological Indicators**, 112, 106074, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106074>

MARCHMENT, T.; SANJAYAN, J.; XIA, M. (2019). Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3d printing with mortar by effective bond area amplification. **Materials & Design**, V. 169, P. 107684, 2019. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2019.107684>

MARTINELLI J. (2020). Brasil constrói sua primeira casa modelo impressa em 3D! **Inova house 3D**. 2020. Disponível em: <https://www.inovahouse3d.com.br/post/brasil-constr%C3%B3i-sua-primeira-casa-modelo-impressa-em-3d>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2022.

MATIAS, E.; RAO, B. (2015). 3D printing: On its historical evolution and the implications for business. **2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)**, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/picmet.2015.7273052>

MAZHOUD, B.; PERROT, A.; PICANDET, V.; RANGEARD, D.; COURTEILLE, E. (2019). Underwater 3D printing of cement-based mortar. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 458-467, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.134>

MECHTCHERINE, V.; NERELLA, V. N.; WILL, F.; NÄTHER, M.; OTTO, J.; KRAUSE, M. (2019). Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. **Automation in Construction**, 107, 102933. 2019 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>

MOEINI, M.; HOSSEINPOOR, M.; YAHIA, A. (2020). Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119551, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119551>

NAIR, S.; PANDA, S.; TRIPATHI, A.; NEITHALATH, N. (2021). Relating print velocity and extrusion characteristics of 3D-printable cementitious binders: Implications towards testing methods. **Additive Manufacturing**. 46, 102127. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102127>

NERELLA V.N.; NÄTHER M.; IQBAL A.; BUTLER M.; MECHTCHERINE V. (2018). Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction. **Cement and Concrete Composites**. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.015>.

NERELLA, V. N.; KRAUSE, M.; MECHTCHERINE, V. (2020). Direct printing test for buildability of 3D-printable concrete considering economic viability. **Automation in Construction**, 109, 102986. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102986>

NORD, J. H.; KOOHANG, A.; PALISZKIEWICZ, J. (2019). The Internet of Things: Review and Theoretical Framework. **Expert Systems with Applications**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2019.05.014>

OLIVEIRA, F. M.; MELO E. I.; SILVA, R. A. B. (2020). 3D Pen: A low-cost and portable tool for manufacture of 3D-printed sensors. **Sensors and Actuators: B. Chemical**. (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128528>

ONU, Organização das Nações Unidas. **Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Traduzido pelo UNIC Rio e revisado pela CGDES do Ministério das Relações Exteriores do Brasil. Última edição em 11 de fevereiro de 2016. Disponível em:

<http://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/brasil_amigo_pesso_idosa/agenda2030.pdf>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2022..

PANDA, B.; PAUL, S. C.; MOHAMED, N. A. N.; TAY, Y. W. D.; TAN, M. J. (2018). Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar. **Measurement**, 113, 108–116. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.051>

PERROT, A.; PIERRE, A.; NERELLA, V. N.; WOLFS, R. J. M.; KEITA, E.; NAIR, S. A. O.; NEITHALATH, N.; ROUSSEL, N.; MECHTCHERINE, V. (2021). From analytical methods to numerical simulations: A process engineering toolbox for 3D concrete printing. **Cement and Concrete Composites**, 122, 104164. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104164>

PETRUZELLA F. D. (2013) Motores Elétricos e Acionamentos: Série Tekne. 1ª Edição. 372 Páginas. Porto Alegre – RS. **Bookman Editora**. 2013. ISBN: 9788580552577

PHUYAL, S.; BISTA, D.; BISTA, R. (2020). Challenges, Opportunities and Future Directions of Smart Manufacturing: A State of Art Review. **Sustainable Futures**, v. 2, p. 100023, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100023>

PONTAROLLI, A.; BIGHETI, J.; RISSO, S.; DOMINGUES, F.; FERNANDES, M.; GODOY, E. (2021). Automation and process control using microservices: a solution for the application of Industry 4.0. **Brazilian Journal of Development**, V. 7, N. 3, P. 23249-23268, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-168>

POULLAIN, P.; PAQUET, E.; GARNIER, S.; FURET, B. (2018). On site deployment of 3d printing for the building construction—the case of yhnovatm. **Matec web of conferences**, 163, 01001, 1-10. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/201816301001>

RAJAGURU, K.; KARTHIKEYAN, T.; VIJAYAN, V. (2020). Additive manufacturing—State of art. **Materials Today: Proceedings**, v. 21, p. 628-633, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.728>

RAJAK, D. K.; PAGAR, D. D.; KUMAR, R.; PRUNCU, C. I. (2019). Recent progress of

reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. **Journal of Materials Research and Technology**, 8(6), 6354–6374. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>

RAJAN, A.; AKRE, V.; NASSIRI, N.; ALALI, A. H.; SABT, Z. B. (2018). 3D Printing of Buildings in UAE: Success and Failure factors. **IEEE Fifth HCT Information Technology Trends (ITT)**. 2018. p. 368-372. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/CTIT.2018.8649541>

RASHID, A. A.; KHAN, S. A.; AL-GHAMDI, S. G.; KOÇ, M. (2020). Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. **Automation in Construction**. Volume 118. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103268>.

ROBERTS, D.; DOUWES, J.; SUTHERLAND, C.; SIM, V. (2020). Durban's 100 Resilient Cities journey: governing resilience from within. **Environment and Urbanization**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/0956247820946555>

ROZIK, A.; TOLBA, A.; EL-DOSUKY, M. (2016). Design and implementation of Sense Egypt platform for real-time analysis of IoT data streams. **Advances in the Internet of Things**, 6, 65-91. 2016. DOI: <https://doi.org/10.4236/ait.2016.64005>

SAIEG, P.; SOTELINO, E.; NASCIMENTO, D.; CAIADO, R. (2017). Interactions of Building Information Modeling, Lean and Sustainability on the Architectural, Engineering and Construction industry: A systematic review. **Journal of Cleaner Production**. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.030>

SAKIN, M.; KIROGLU, Y. C. (2017). 3D printing of buildings: construction of the sustainable houses of the future by bim. **Energy Procedia**, V. 134, P. 702-711, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.09.562>

SALET, T. A. M.; AHMED, Z. Y.; BOS, F. P.; LAAGLAND, H. L. M. (2018). Design of a 3D printed concrete bridge by testing. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 13, n. 3, p. 222-236, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>

SCHMIDT M.; MERKLEIN M.; BOURELL D.; DIMITROV D.; HAUSOTTE T.; WEGENER K.; OVERMEYER L.; VOLLERTSEN F.; LEVY, G., N. (2017). Laser based additive manufacturing in industry and academia. **Cirp Annals**, 66(2), 561-583, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.011>

SCHUTTER, G. D.; LESAGE, K.; MECHTCHERINE, V.; NERELLA, V. N.; HABERT, G.; AGUSTI-JUAN, I. (2018). Vision of 3D printing with concrete - Technical, economic and environmental potentials. **Cement and Concrete Research**. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>

SHEALY, T. (2016). Do Sustainable Buildings Inspire More Sustainable Buildings?. **Procedia Engineering**. 145, 412–419. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.008>

SINGH G.; BANGA V. K. (2022). Robots and its types for industrial applications, **Materials Today: Proceedings**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.426>.

- SINGH, A.; PAYAL, A.; BHARTI, S. (2019). A walkthrough of the emerging IoT paradigm: Visualizing inside functionalities, key features, and open issues. **Journal of Network and Computer Applications**, S1084804519302188. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.06.013>
- ŚLUSARCZYK, B. (2018). Industry 4.0: Are we ready? **Polish Journal of Management Studies**. 2018. DOI: <https://doi.org/10.17512/PJMS.2018.17.1.19>
- SOLTAN, D. G.; LI, V. C. (2018). A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 90, p. 1-13, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017>
- SONI, K. S.; MOHAMMAD, T. (2020). Design and assembly of fused filament fabrication (FFF) 3D printers. **Materials Today: Proceedings**. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.627>
- SOUZA, M. T.; FERREIRA, I. M.; GUZI DE MORAES, E.; SENFF, L.; NOVAES, D. O. A. P. (2020). 3D printed concrete for large-scale buildings: an overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects. **Journal of Building Engineering**, 101833. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101833>
- SU, X.; WANG, T.; GUO, S. (2021). Applications of 3D printed bone tissue engineering scaffolds in the stem cell field. **Regenerative Therapy**. Volume 16, Pág. 63-72, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reth.2021.01.007>
- SUNG, T. K. (2018). Industry 4.0: A Korea Perspective. **Technological Forecasting & Social Change**. P. 40-45. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2017.11.005>
- TAY, Y. W. D.; LI, M. Y.; TAN, M. J. (2019). Effect of printing parameters in 3D concrete printing: printing region and support structures. **Journal of Materials Processing Technology**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.007>
- THE FREE BEGINNER'S GUIDE – 3D PRINTING INDUSTRY. **3D Printing Industry- The Authority on 3D Printing & Additive Manufacturing** [online]. Copyright © Copyright 2017. Disponível em: <<https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide>>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2022.
- VADODARIA, S. S.; WARNER, E.; NORTON, I.; MILLS, T. B. (2021) Design data for the 3D printer modification to print gels and pastes and the corresponding firmware. **Data in Brief**. Volume 36. 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106974>.
- WANG L.; JIANG S.; ZHANG S. (2020). Mapping technological trajectories and exploring knowledge sources: A case study of 3D printing technologies. **Technological Forecasting and Social Change**, Volume 161. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120251>.
- WANG, X.; ZHA, X.; NI, W.; LIU, R. P.; GUO, Y. J.; NIU, X.; ZHENG, K. (2019). Survey on blockchain for Internet of Things. **Computer Communications**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.COMCOM.2019.01.006>

WANGLER, T.; LLORET, E.; REITER, L.; HACK, N.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M.; BERNHARD, M.; DILLENBURGER, B.; BUCHLI, J.; ROUSSEL, N.; FLATT, R. (2016). Digital concrete: opportunities and challenges. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 67-75, 2016. DOI: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16>

WENG, Y.; RUAN, S.; LI, M.; MO, L.; UNLUER, C.; TAN, M. J.; QIAN, S. (2019). Feasibility study on sustainable magnesium potassium phosphate cement paste for 3d printing. **Construction and Building Materials**, 221, 595-603. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.05.053>

WILHITE, R.; WÖLFEL, I. (2019). 3D Printing for veterinary anatomy: An overview. **Anatomia, histologia, embryologia**, v. 48, n. 6, p. 609-620, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/ahe.12502>

XIAO, J.; ZOU, S.; YU, Y.; WANG, Y.; DING, T.; ZHU, Y.; YU, J.; LI, S.; DUAN, Z.; WU, Y.; LI, L. (2020). 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing. **Journal of Building Engineering**, 32, 101779. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101779>

YAMAMURA, S.; IWASE, E. (2021). Hybrid hinge structure with elastic hinge on self-folding of 4D printing using a fused deposition modeling 3D printer. **Materials & Design**. Volume 203. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109605>.

YOO, S.; CHO, C.; LEE, K. H.; PARK, J.; JIN, S.; LEE, Y.; KIM, B. G. (2019). Structure of Deep Learning Inference Engines for Embedded Systems. **International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ictc46691.2019.8939843>

YUAN, Q.; LI, Z.; ZHOU, D.; HUANG, T.; HUANG, H.; JIAO, D.; SHI, C. (2019). A feasible method for measuring the buildability of fresh 3D printing mortar. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116600, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.326>

YUNYUN, Q.; ZHENG-HAO, G. E.; XIAOQIN, L. (2017). CAD/CAM system of cylinder indexing cam mechanism based on VB and Creo. **IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)**. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/itoec.2017.8122522>

ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; SHE, W.; YANG, L.; LIU, G.; YANG, Y. (2019). Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. **Construction and Building Materials**, 201, 278–285. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061>