

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

RAIMARA ARAÚJO LIMA

Determinação dos Ensaio de Laboratório e Parâmetros para a  
Normatização da Argamassa para Impressão 3D

Goiânia, GO, Brasil  
2023

RAIMARA ARAÚJO LIMA

## Determinação dos Ensaios de Laboratórios e Parâmetros para a Normatização da Argamassa para Impressão 3D

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Lajovic Carneiro.

Goiânia, GO, Brasil  
2023

Catálogo na Fonte - Sistema de Bibliotecas da PUC Goiás

L732d Lima, Raimara Araújo  
Determinação dos ensaios de laboratório e parâmetros  
para a normatização da argamassa para impressão 3D  
/ Raimara Araújo Lima. -- 2023.  
92 f.: il.

Texto em português, com resumo em inglês.  
Dissertação (mestrado) -- Pontifícia Universidade  
Católica de Goiás, Escola Politécnica, Goiânia, 2023.

Inclui referências: f. 84-92.

1. Argamassa. 2. Argamassa - Extrusão. 3. Processos  
de fabricação - Automação. 4. Impressão tridimensional.  
I. Carneiro, Marcos Lajovic. II. Pontifícia Universidade  
Católica de Goiás - Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Produção e Sistemas - 11/04/2023. III. Título.

CDU: Ed. 2007 -- 666.9.01(043)

# Determinação dos Ensaios de Laboratório e Parâmetros para a Normatização da Argamassa para Impressão 3D

RAIMARA ARAÚJO LIMA

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás em 12/12/2022.

Documento assinado digitalmente  
 MARCOS LAJOVIC CARNEIRO  
Data: 17/05/2023 09:19:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Marcos Lajovic Carneiro, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção e Sistemas

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 MARCOS LAJOVIC CARNEIRO  
Data: 17/05/2023 09:18:50-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Marcos Lajovic Carneiro, Dr.  
Orientador

Documento assinado digitalmente  
 HELENA CARASEK CASCUDO  
Data: 31/05/2023 10:06:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Helena Carasek, Dra.  
Avaliador Externo – IPEG

Documento assinado digitalmente  
 MARTA PEREIRA DA LUZ  
Data: 17/05/2023 13:24:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Marta Pereira da Luz, Dra.  
Avaliador Interno – PUC Goiás

Dedico este trabalho primeiramente à Deus, por ser essencial em minha vida, meu guia e socorro, presente na hora da angústia. Ao meu avô Francisco, que não está mais entre nós, mas continua sendo minha maior força na vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por mais essa benção concedida, por sempre me dar força para superar as dificuldades, mesmo parecendo impossíveis, por sempre me mostrar que tudo é possível ao crer. Agradeço à minha irmã mais velha Rayane Araújo Lima, por toda ajuda, paciência, apoio e inspiração durante toda essa jornada do mestrado.

Agradeço aos meus pais, Maria de Deus A. Lima e Evanildo Lima pelo apoio incondicional.

Agradeço ao professor Epaminondas Luiz F. Junior, por todo suporte e ensino, pela paciência com as correções dos trabalhos e acompanhamentos nos estudos em laboratório. Ao meu orientador Marcos Lajovic Carneiro pelos ensinamentos, correções e incentivos. Agradeço à banca examinadora por aceitar o convite e indicar sugestões de melhoria na dissertação. E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

Finalmente, gostaria de agradecer à CAPES e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da PUC-GO por todo apoio e estrutura fornecidos.

# EPÍGRAFE

*" Ora, àquele que é poderoso para fazer infinitamente mais do que  
tudo quanto pedimos ou pensamos, segundo o poder que opera em  
nós."*

(Efésios 3:20)

## RESUMO

O uso das tecnologias de automação pode fornecer ferramentas que melhoram o desempenho das empresas de construção civil por meio da otimização de seus processos. Estudos sobre a aplicação da impressora 3D na construção, têm crescido muito nos últimos anos devido às características únicas como redução de custo, versatilidade, mínimo desperdício e eliminação de fôrmas. O presente trabalho identifica dentre as pesquisas mais recentes características e parâmetros primordiais que os pesquisadores estão analisando como: as composições e granulometria da argamassa, atuações dos aditivos químicos, caracterização do comportamento reológico, trabalhabilidade, capacidade de impressão e propriedades mecânicas, para que a argamassa seja considerada adequada para uso na construção digital. Além do mais, apresenta de forma ilustrativa um esquema do processo de impressão da argamassa, desde a mistura até a construção final. Apresenta também os principais resultados alcançados por outros autores de testes da argamassa no estado fresco e endurecido, assim como também, resultados de ensaios específicos durante e após a extrusão.

Essa dissertação tem, portanto, como objetivo determinar os ensaios aos quais a argamassa para impressão 3D deve ser submetida para garantir características de resistência, qualidade e segurança. Para isso, foi realizado um levantamento dos ensaios da argamassa no estado fresco e endurecido para, então, propor tabelas para servir de consulta para projetar a impressão de uma casa popular.

O esquema de testes de forma hierárquica sugerido para avaliação da argamassa digital, mostrou-se positivo e essencial para a caracterização em cada etapa. A simulação de impressão 3D contribui eficazmente para escolher o formato do bico de extrusora assim como, uma velocidade no qual conseguirá imprimir uma casa de 35,53 m<sup>2</sup> com o menor tempo possível.

As características reológicas e mecânicas apontadas nessa dissertação, assim como parâmetros particulares da manufatura aditiva, contribuem para a padronização dos métodos de ensaio de uma construção 3D, de forma a apresentar qualidade.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Impressão 3D; Ensaio; Argamassa; Extrusão.

## **ABSTRACT**

*The use of automation technologies can provide tools that improve the performance of civil construction companies by optimizing their processes. Studies on the application of the 3D printer in construction have grown a lot in recent years due to the unique characteristics such as cost reduction, versatility, minimal waste and elimination of formwork. The present work identifies, among the most recent research, characteristics and primordial parameters that the researchers are analyzing, such as: compositions and granulometry of the mortar, actions of chemical additives, characterization of the rheological behavior, workability, printing capacity and mechanical properties, so that the mortar be considered suitable for use in digital construction. In addition, it presents an illustrative scheme of the mortar printing process, from mixing to final construction. It also presents the main results achieved by other authors of mortar tests in the fresh and hardened state, as well as the results of specific tests during and after extrusion.*

*This dissertation therefore aims to determine the tests to which the mortar for 3D printing must be submitted to guarantee resistance, quality and safety characteristics. For this, a survey of mortar tests in the fresh and hardened state was carried out to then propose tables to serve as a reference for designing the impression of a popular house.*

*The hierarchical test scheme suggested for the evaluation of the digital mortar proved to be positive and essential for the characterization at each stage. The 3D printing simulation effectively contributes to choosing the format of the extruder nozzle as well as a speed at which you will be able to print a house of 35.53 m<sup>2</sup> in the shortest possible time.*

*The rheological and mechanical characteristics pointed out in this dissertation, as well as particular parameters of additive manufacturing, contribute to the standardization of the test methods of a 3D construction, in order to present quality.*

*Keywords: Additive Manufacturing; 3D Printing; Testing, Mortar; Extrusion.*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	X
LISTA DE TABELAS .....	XI
LISTA DE QUADROS .....	XII
1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Lacuna de Pesquisa.....	15
1.2 Problema.....	15
1.3 Desafios na produção da Argamassa .....	16
1.4 Objetivos.....	16
1.4.1 Objetivos Geral.....	16
1.4.2 Objetivo Específico .....	16
1.5 Estrutura do Trabalho .....	17
1.6 Produção Intelectual .....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
2.1 Processos de Impressão da Argamassa.....	23
2.2 Particularidades da Argamassa 3D .....	23
2.3 Reologia.....	25
2.4 Composição .....	27
2.5 Granulometria .....	30
2.6 Aditivos.....	32
2.7.Capacidade de Impressão .....	33
2.8 Propriedades Mecânicas .....	35
2.9 Ensaios.....	36
2.9.1 Estado da Argamassa fresca - Ensaios de análise.....	36
2.9.2 Ensaios de Capacidade de Impressão .....	40
2.9.2.1 Teste de Bombeabilidade.....	41
2.9.2.2 Teste de Extrudabilidade .....	42
2.9.2.3 Teste de Construtibilidade .....	43
2.9.2.4 Ensaios Mecânicos.....	45
2.10 Como Elaborar Normas Técnicas.....	48
3. METODOLOGIA.....	52
4. RESULTADOS .....	54
5. CONCLUSÃO.....	80
6. TRABALHOS FUTUROS .....	81

REFERÊNCIAS .....84

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - TÊNIS IMPRESSO EM 3D .....	19
FIGURA 2. (A) FÍGADO HUMANO E (B) PRÓTESE IMPRESSA EM 3D .....	19
FIGURA 3 - ALIMENTOS FEITOS POR IMPRESSÃO 3D.....	20
FIGURA 4 - CASA CONSTRUÍDA EM MANUFATURA ADITIVA .....	20
FIGURA 5 - ILUSTRAÇÃO DO BICO DE EXTRUSÃO IMPRIMINDO MASSA CIMENTÍCIA .....	22
FIGURA 6- IMPRESSÃO 3D PARA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	22
FIGURA 7- OBJETO IMPRESSO APÓS 10 DIAS DE CURA.....	22
FIGURA 8- ESQUEMA DO PROCESSO DE IMPRESSÃO .....	23
FIGURA 9- ESQUEMA DAS PARTICULARIDADES DA ARGAMASSA.....	24
FIGURA 10 - TESTES DE EXTRUDABILIDADE EM SEÇÃO OVAL (A) E RETANGULAR (B): REALIZADO POR (A) MA ET AL. (2019) E (B) ARUNOTHAYAN ET AL, (2020).....	43
FIGURA 11- DISTÂNCIA DO BICO DA CAMADA IMPRESSA: (A) ZERO, (B) DOIS, (C) QUATRO MILÍMETROS .....	44
FIGURA 12- TESTE DE CONSTRUTIBILIDADE: REALIZADO POR (A) MA ET AL., (2019) E (B) ARUNOTHAYAN ET AL. (2020).....	44
FIGURA 13- ESQUEMA DE ELABORAÇÃO DE NORMA TÉCNICA.....	49
FIGURA 14- DIAGRAMA DO FLUXO DO TRABALHO .....	52
FIGURA 16- ESQUEMA DE TESTES INICIAIS PARA CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DE UMA ARGAMASSA 3D.....	62
FIGURA 17- ESQUEMA DE TESTE DE IMPRESSÃO PARA UMA ARGAMASSA 3D.....	64
FIGURA 18- ESQUEMA DO FLUXO DE TESTES MECÂNICOS PARA UMA ARGAMASSA 3D ....	66
FIGURA 19- GRÁFICO DE CORRELAÇÃO: ENSAIOS MECÂNICO.....	68
FIGURA 20- ESQUEMA DO FLUXO DE TESTES PARA UMA ARGAMASSA 3D.....	73
FIGURA 21- PLANTA BAIXA DA CASA DE 35,53 M <sup>2</sup> .....	75
FIGURA 22 – DIAGRAMA DE TEMPO PARA O CENÁRIO 1 .....	77
FIGURA 23 - DIAGRAMA DE TEMPO PARA O CENÁRIO 2.....	77

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1- PROPORÇÕES DE COMPONENTES DA MASSA CIMENTÍCIA IMPRIMÍVEL EM 3D.	28
TABELA 2- VARIAÇÕES GRANULOMÉTRICAS E DIMENSÕES DO BICO DE IMPRESSÃO .....	31
TABELA 3- PROPORÇÕES DE ADITIVOS QUÍMICOS .....	33
TABELA 4- RESULTADOS DOS TESTES NO ESTADO FRESCO.....	38
TABELA 5- RESULTADOS DOS TESTES DE BOMBEAMENTO .....	42
TABELA 6- RESULTADO DE TESTES MECÂNICOS APRESENTADOS POR DIVERSOS AUTORES .....	46
TABELA 7- COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA 3D .....	55
TABELA 8- VARIAÇÕES GRANULOMÉTRICAS E DIMENSÕES DO BICO DE IMPRESSÃO .....	57
TABELA 9- PROPORÇÕES DE ADITIVOS QUÍMICOS .....	57
TABELA 10- RESULTADOS DOS TESTES NO ESTADO FRESCO.....	60
TABELA 11- RESULTADO DE TESTES MECÂNICOS APRESENTADOS POR DIVERSOS AUTORES .....	61
TABELA 12- RESULTADO DE TESTES PROPOSTO PARA A CASA POPULAR .....	69
TABELA 13- MATRIZ DE DECISÃO .....	70
TABELA 14- RESULTADO DO ESTUDO DE CASO .....	79

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- PARÂMETROS DA ARGAMASSA 3D.....	14
QUADRO 2- PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS TÉCNICAS DE IMPRESSÃO.....	21
QUADRO 3- MODELOS REOLÓGICOS PARA FLUIDOS INDEPENDENTES DO TEMPO .....	27
QUADRO 4 - DEFINIÇÃO DE TERMOS/PARÂMETROS PARA A CAPACIDADE DE IMPRESSÃO 3D .....	34
QUADRO 5- EQUIPAMENTOS DE TESTES .....	37
QUADRO 6- PROPRIEDADE DOS MATERIAIS.....	56
QUADRO 7- DEFINIÇÃO DE TERMOS/PARÂMETROS PARA A CAPACIDADE DE IMPRESSÃO 3D .....	58
QUADRO 8- EQUIPAMENTOS DE TESTES .....	59
QUADRO 9- CRONOGRAMA – CASA IMPRESSA.....	79

## 1. INTRODUÇÃO

Uma técnica da indústria robótica, conhecida como manufatura aditiva, tem sido utilizada para manipular argamassa ou concreto por meio de extrusão e vem crescendo muito na última década. Segundo Zhang *et al.* (2019) e Arunothayan *et al.* (2020) as vantagens da manufatura aditiva na construção civil são:

- Melhorar a velocidade de construção / redução de tempo de construção (50% a 70%) (ZANG *et al.*, 2019);
- Melhorar a qualidade da construção;
- Eliminar a necessidade de fôrmas;
- Redução de custo de mão de obra (50% a 80%) (ZANG *et al.*, 2019);
- Redução de custo de materiais;
- Redução de desperdícios de materiais (30% a 60%) (ZANG *et al.*, 2019).

Os países desenvolvidos e alguns em desenvolvimento, como China e Rússia, já possuem um número significativo de experiências em confecção de objetos em argamassa para a construção. Foram construídas pontes, residências, peças de decoração, peças estruturais com inserção de aço entre outras (TAY *et al.*, 2017). Porém, apesar do crescente número de aplicações e experiências na área, a escala de utilização e produção, considerando o volume do setor da construção e seu potencial, ainda é ínfimo e pouco expressivo (TAY *et al.*, 2017). Os ajustes da argamassa para essa tecnologia ainda apresentam alguns desafios no processamento e em relação ao nível técnico (SALET *et al.*, 2018), devido à inexistência de códigos ou procedimentos para validação da mistura e dos novos materiais, assim como para a verificação das propriedades estruturais da argamassa utilizada para impressão 3D (SALET *et al.*, 2018; KAZEMIAN *et al.*, 2017).

Para que uma construção digital seja bem-sucedida, Perrot *et al.* (2016) afirmam que o material cimentício deve possuir características específicas para adequar aos parâmetros de impressão, essas características são apresentadas no Quadro 1.

<b>Parâmetros</b>	<b>Característica</b>	<b>Justificativa</b>
Viscosidade	Baixo	Para permitir o fluxo durante o deslocamento
Tensão de escoamento	Alto	Para evitar a deformação do material após a deposição das camadas
Tempo de endurecimento	Rápido	Para sustentar o peso das camadas subsequentes

Quadro 1- Parâmetros da argamassa 3D

Fonte: (Próprio Autor, 2022)

Os parâmetros do Quadro 1 foram indicados apenas com características qualitativas, para que a argamassa consiga ser transportada do reservatório até o bico da extrusora, ela precisa de uma viscosidade baixa. Para que as camadas não sejam deformadas após impressão, precisa de uma tensão de escoamento alta, assim ela consegue fluir por meio do bico de forma contínua.

Precisa também de um tempo de pega rápido, para conseguir sustentar as demais camadas.

Os seus valores numéricos dependem diretamente do comprimento do duto de extrusão da impressora, da velocidade de impressão, de fatores ambientais como temperatura e umidade e da composição da argamassa.

Além desses parâmetros apresentados, a granulometria da areia também deve ser controlada, para que a segregação da massa na mangueira e o entupimento do bico da extrusora sejam evitados.

Pesquisadores estudam misturas alternativas para atender as características do fluxo da massa, e então projetar seu comportamento (MEURER; CLASSEN, 2021). Além disso, estudos vêm sendo realizados para a verificação das propriedades no estado fresco da argamassa para impressão 3D, por meio de ensaios de mesa de fluxo, abatimento, *squeeze-flow*, assim como, associação de medidas de viscosidade plástica, tensão de escoamento e tixotropia. Em paralelo, amostras do material impresso também vêm sendo avaliadas por meio dos ensaios de resistência, adequando métodos e equipamentos utilizados em argamassa ou concreto comum.

Entretanto, a fixação de parâmetros de ensaios em estruturas dos materiais cimentícios impresso, ainda requerem validações mais precisas (SALET *et al.*, 2018). Com isso, a falta de diretrizes na forma de avaliar o processo e o material para impressão 3D pode gerar insegurança em consumidores finais e em investidores e, conseqüentemente, atrasar o desenvolvimento desse método construtivo, sobretudo em países onde esse tipo de tecnologia ainda está na fase inicial.

### **1.1. LACUNA DE PESQUISA**

A utilização da impressão 3D na construção civil, por se tratar de um método de construção diferente do tradicional apresenta alguns desafios, entre eles a necessidade de serem estudados os ensaios de verificações. Essa necessidade de verificação ocorre por não haver um conjunto de normas técnicas específicas para argamassa de impressão 3D, o que corresponde à lacuna de pesquisa abordada por este trabalho. Com isso, os pesquisadores enfrentam dificuldades em chegar a um resultado preciso para padronizar e qualificar os tipos de ensaios.

### **1.2. PROBLEMA**

A existência de várias teorias relacionadas aos tamanhos dos agregados e a grande quantidade de possibilidades de composição da argamassa e do concreto, trazem incerteza acerca do que deve ser adotado para sua composição. Dado isso, a falta da normatização da argamassa impressa 3D é um dos desafios enfrentados pelos pesquisadores. Entretanto, diversos artigos em periódicos apresentam ensaios realizados, no intuito de se obter um material imprimível. Segundo Yuan *et al.* (2019), atualmente não existem procedimentos e quantitativo eficaz para qualificar a capacidade de construção da impressão da argamassa com o tempo e apenas a observação da fissuração ou da deformação não é suficiente para garantir segurança e qualidade.

### **1.3. DESAFIOS NA PRODUÇÃO DA ARGAMASSA**

- Procedimento de validação do material;
- Verificação das propriedades estruturais da argamassa para impressão 3D.

### **1.4. OBJETIVOS**

#### **1.5. OBJETIVO GERAL**

Determinar quais são os ensaios a que a argamassa para impressão 3D deve ser submetida para garantir características de resistência.

#### **1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Apresentar os parâmetros e ensaios do estado-da-arte da técnica de manufatura aditiva na construção civil.
- Verificar se o conjunto de ensaios já publicados na literatura são suficientes para garantir a qualidade e segurança da argamassa para impressão 3D.
- Determinar sequência de testes para ensaio da argamassa para impressão 3D.

- Contribuir com dados e procedimentos para elaboração de um guia para a manufatura aditiva para construção civil.
- Aplicar as métricas do método construtivo de impressão 3D em uma simulação de impressão 3D.

## **1.7. ESTRUTURA DO TRABALHO**

A dissertação está estruturada em seis capítulos, sendo que no primeiro são abordados: a caracterização do problema, a justificativa, o problema da pesquisa, a definição dos objetivos, estrutura da dissertação e publicações já realizadas. No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica que fundamenta a pesquisa a partir das definições e características da MA, o processo de impressão da argamassa, suas particularidades e os ensaios realizados no estado fresco e endurecido. No terceiro capítulo abordada a metodologia com o detalhamento de como foi realizada a pesquisa. O quarto capítulo apresenta os resultados, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões sobre esse estudo e por fim, no sexto capítulo é apresentado sugestões para trabalhos futuros.

## **1.8. PRODUÇÃO INTELECTUAL**

Artigo publicado em congresso:

Lima, Raimara Araújo, Jr, E.L.F., Carneiro, M. L., Levantamento dos ensaios de laboratório para normatização da argamassa para impressão 3D. 41º Encontro Nacional de Engenharia de Produção ENEGEP 2021, congresso online, 18 a 21 de outubro, 2021.

Artigo publicado em revista:

Lima, Raimara Araújo. E., Jr, E.L.F., Lima, Renata Araújo, Carneiro, M. L., Características Reológicas para Argamassa 3D: Uma Revisão. Revista Engenharia e Tecnologia, 2022.

Lima, Raimara Araújo, E., Silva, A.P.M.G., Monteiro, M.L.X., Jr, E.L.F., Carneiro, M. L., Análise Comparativa de Misturas Produzidas com Areia Natural e Artificial nas Propriedades de uma Argamassa 3D. Revista Engenharia e Tecnologia, 2022.

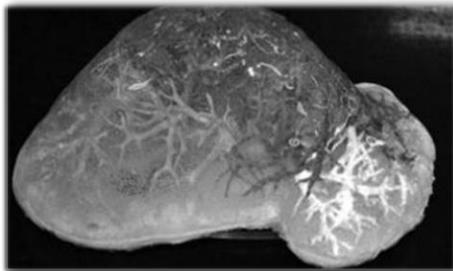
## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A Manufatura Aditiva (MA) é uma tecnologia inovadora e compõe um dos tópicos chave da indústria 4.0, ela teve início na década de 80 com o objetivo de produzir peças e modelos prototípicos. Uma de suas vantagens é a capacidade de criar qualquer forma em uma só etapa sem interrupções no processo construtivo, por meio de um procedimento automatizado que imprime objetos tridimensionais camada por camada, controlado por um modelo computacional (CAD) (MOHAN *et al.*, 2021). Essa inovação teve um aumento excepcional nos últimos anos, em função da sua versatilidade, rápida fabricação e baixo custo.

Devida a sua grande gama de aplicação, diversos seguimentos industriais vêm utilizando a MA, para produção de materiais como na moda (Figura 1), medicina (Figura 2), alimentação (Figura 3), construção civil (Figura 4), entre outros (SHAKOR *et al.*, 2019).



Figura 1 - Tênis impresso em 3D  
Fonte: (LOPES, 2016)



(a)



(b)

Figura 2. (a) Fígado humano e (b) Prótese impressa em 3D  
Fonte: (Lopes, 2016) (Duda, 2020)

A MA pode ser usada para imprimir formas complexas, como tecido humano ou vasos sanguíneos artificiais que são usados em revascularização do miocárdio. Por meio dessa tecnologia, dentistas estão criando modelo de dentes para substituir os dentes de paciente. Na indústria aeroespacial a MA é usada para imprimir aerofólios (THOMAS *et al.*, 1996; VAN NOORT, 2012).

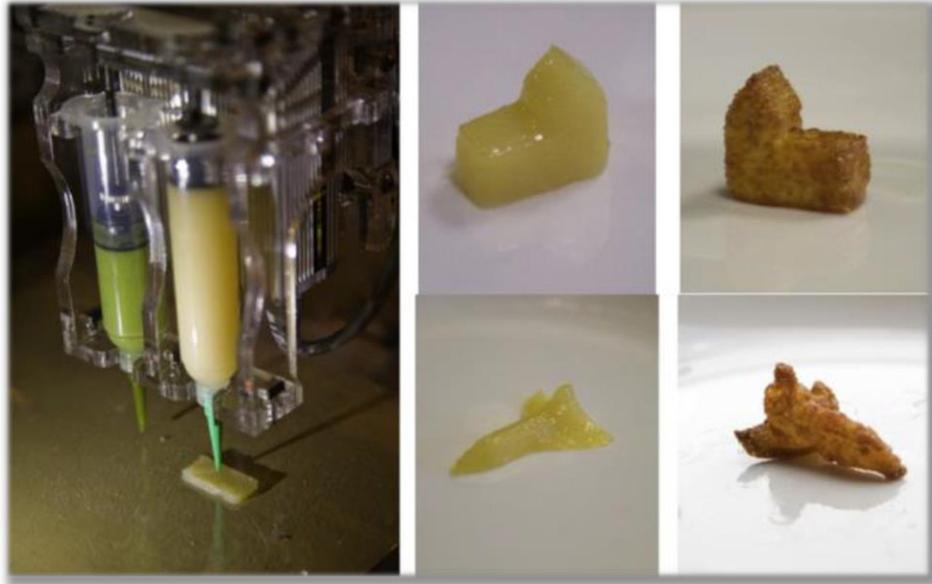


Figura 3 - Alimentos feitos por impressão 3D  
Fonte: (Duda, 2020)



Figura 4 - Casa construída em Manufatura Aditiva  
Fonte: (Lopes, 2016)

É importante referenciar o potencial que a MA terá no futuro da indústria da construção, embora se tratando de um conceito pouco conhecido (CRAVEIRO *et al.*, 2019). Kazemian *et al.* (2017) e Paul *et al.* (2018) verificaram em suas pesquisas que a MA na construção civil foi dividida em três categorias: *contour crafting*, *D-shape* e *concrete printing* (impressão de concreto). Os principais métodos de impressão e suas características encontradas na literatura são apresentados no Quadro 2.

<b>Método</b>	<b><i>Countour-crafting</i></b>	<b><i>D-Shape</i></b>	<b><i>Concrete Printing</i></b>
<b>Processo</b>	Extrusão	Jateamento	Extrusão
<b>Materiais</b>	Argamassa	Sólidos e agentes químicos	Concreto
<b>Velocidade</b>	Baixa	Média	Alta
<b>Dimensão</b>	Estrutura de larga escala	Estruturas médias	Estrutura de larga escala
<b>Vantagens</b>	Acabamento	Resistência	Velocidade
<b>Desvantagens</b>	Velocidade e resistência	Baixa resolução, grande quantidade de matéria prima	Necessidade de concreto de alta performance

Quadro 2- Principais características das técnicas de impressão

Fonte: (DUDA, 2020) - Adaptado

Percebe-se no Quadro 2, que os métodos de *Contour Crafting* e *Concrete Printing* são os mais adequados à indústria da construção civil devido à capacidade de construção em larga escala e por consumir menos matéria prima do que o *D-Shape*. Nesses dois métodos a impressão 3D acontece quando a argamassa ou concreto é transportado por meio de um sistema de bombeamento até o bico da extrusora, então o material é depositado com o formato de filamentos contínuos (LIN *et al.*, 2020), como ilustrado na Figura 5.

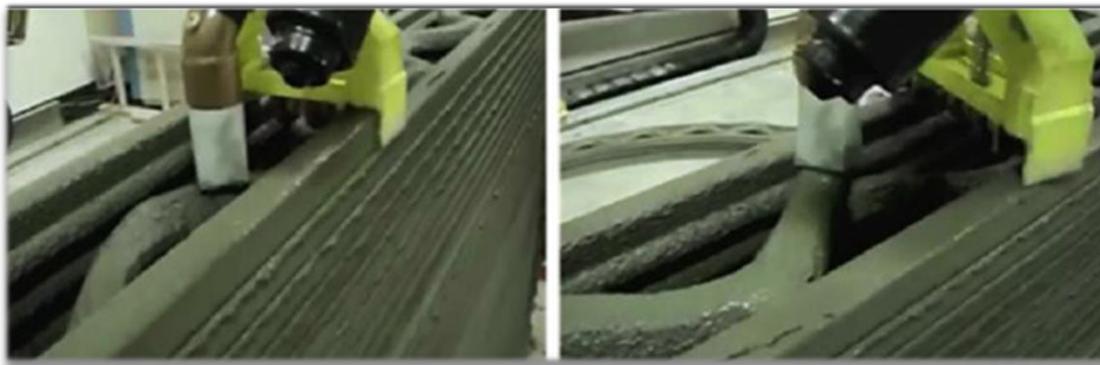


Figura 5 - Ilustração do bico de extrusão imprimindo massa cimentícia

Fonte: (Ghaffar *et al.*, 2018)

A Figura 6 apresenta o material sendo impresso pelo método de extrusão por dois braços robóticos imprimindo camada por camada. O objeto de argamassa foi impresso com o tamanho de 1,86 m × 0,46 m × 0,13 m (comprimento, largura, altura). A Figura 7 apresenta o objeto após 10 dias de cura.



Figura 6- Impressão 3D para construção civil

Fonte: (ZHANG *et al.*, 2018)

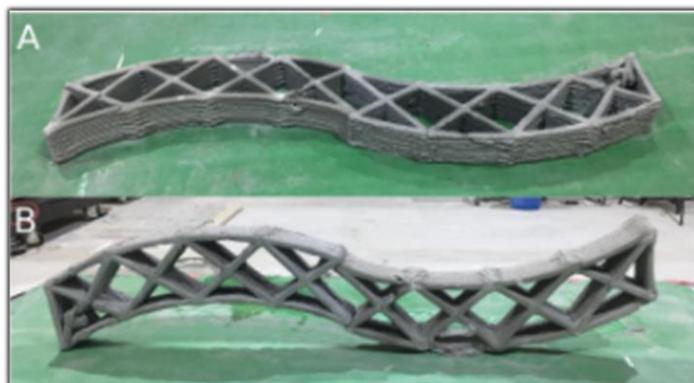


Figura 7- Objeto impresso após 10 dias de cura

Fonte: (ZHANG *et al.*, 2018)

Esse método tem proporcionado grandes vantagens para os processos construtivos, pois permite melhor precisão da quantidade do material necessário para execução, maior flexibilidade de *design*, redução do tempo de construção e dos impactos ambientais, e também redução da probabilidade de acidentes no trabalho. Desta forma, apresenta-se como uma alternativa para suprir o déficit habitacional em comunidades necessitadas (WANGLER *et al.*, 2019).

## 2.1. PROCESSOS DE IMPRESSÃO DE ARGAMASSA

O método de transporte da argamassa ou concreto mais usados na impressão 3D para a construção civil até o momento é método de extrusão, no qual o material cimentício é extrudado por meio de um bocal, em um sistema robótico com movimentos de direções cartesianas (KRUGER *et al.*, 2021). A Figura 8 apresenta uma sequência simplificada de etapas pela qual a argamassa percorre até a construção do objeto.

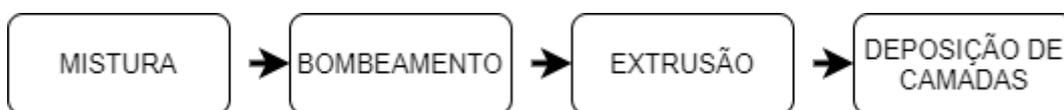


Figura 8- Esquema do processo de impressão  
Fonte: (Próprio Autor, 2022)

Nota-se que o seguimento de um processo de impressão consiste primeiramente em desenvolver uma mistura (argamassa) e posteriormente colocá-la em um reservatório no qual será bombeada por meio de uma mangueira até o bico da extrusora e, então, as camadas são extrudadas e depositadas subsequentemente, até finalizar a construção do objeto (HOU *et al.*, 2021). No entanto, as etapas do processo de impressão exigem características e parâmetros especiais da argamassa imprimível (argamassa para impressora 3D), que atendam às necessidades particulares de impressão, e essas particularidades serão discutidas nas sessões a seguir.

## 2.2. PARTICULARIDADES DA ARGAMASSA PARA IMPRESSÃO 3D

O método de construção da argamassa impressa, difere significativamente dos métodos tradicionais, devido à importância do controle das características reológicas da massa, ou seja, da viscosidade plástica e tensão de escoamento durante todo o período de impressão, especificamente em relação aos requisitos bombeamento e deposição das camadas. Além

disso, a ausência de fôrmas requer a produção de um material que garanta a estabilidade estrutural durante a construção (REITER *et al.*, 2020).

Para que o processo de impressão seja minimamente aceitável deve-se atender a dois quesitos:

(1) A argamassa precisa ser extrudada de forma suave e contínua com boa qualidade de superfície. Entende-se por suave e contínua, uma extrusão sem deposições abruptas, sem a presença de bolhas, entupimento ou qualquer outra forma de interrupção no processo. Considera-se uma superfície de boa qualidade aquela com aspecto liso e formato consistente;

(2) A deformação da largura das camadas impressas não pode ser superior a cerca de 10% da dimensão do bico (ZOU *et al.*, 2021), mantendo assim sua forma enquanto suporta as demais camadas sobrepostas (RAHUL *et al.*, 2019a). De acordo com Moeini *et al.* (2020), a extrusão satisfatória, a aderência entre camadas e a capacidade de manter a forma podem ser obtidas controlando a tensão de escoamento e a viscosidade da argamassa.

O tempo de pega está relacionado às fases do processo de endurecimento da argamassa, e na perspectiva da MA, é o tempo necessário para que a massa mantenha sua forma até receber camadas subsequentes (HOSSEINI *et al.*, 2019; SHAKOR *et al.*, 2019). Essa característica tem efeito particular na ligação entre as camadas impressas, bem como, na taxa de penetração entre elas. A Figura 9 ilustra resumidamente as quatro particularidades primordiais da argamassa a serem analisadas antes de iniciar a extrusão.

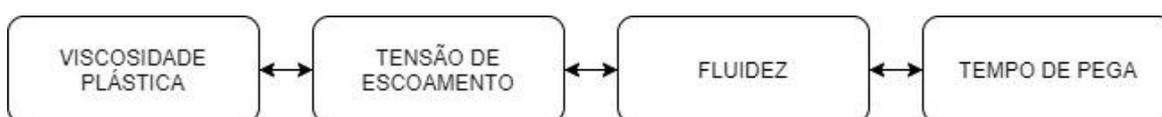


Figura 9- Esquema das particularidades da argamassa  
Fonte: (Próprio Autor, 2022)

A análise desses quatro parâmetros é obtida por meio da realização de ensaios preliminares que determinam as propriedades reológicas da argamassa a ser impressa.

Com eles é possível verificar se a mistura preparada é capaz de ser bombeada, manter sua forma depois de extrudada e assegurar que não ocorra nenhuma deformação superior a cerca de 10% da dimensão do bico (JOH *et al.*, 2020; RAHUL *et al.*, 2019b; ZOU *et al.*, 2021).

### **2.3. REOLOGIA**

Um dos grandes desafios da utilização da impressão 3D utilizando materiais cimentícios, é a determinação da capacidade de fluidez da argamassa. A fluidez de um material está intrinsicamente associada aos parâmetros de tensão de escoamento e viscosidade. Para que este equilíbrio entre tensão de escoamento e viscosidade plástica durante a impressão seja satisfatório, argamassa deve ser tixotrópica, ou seja, deve possuir alta tensão de escoamento em repouso e baixa viscosidade durante o escoamento (PANDA *et al.*, 2018). Os autores Guo *et al.* (2020) definem uma mistura tixotropia como: as formulações que floculam, ou seja, apresentam comportamento viscoso no estado de repouso, dentro de uma perspectiva aglutinante, no mesmo momento em que demonstram uma capacidade de defloculação, por meio de aplicação de forças de cisalhamento, com uma grande facilidade de reverter o reordenamento depois que esse permanece estático.

Nesse âmbito, a reologia estuda o fluxo e a deformação da matéria, descreve a alteração de um corpo sólido, líquido e gasoso sob ação de tensões (MASUERO; STOLZ, 2018). Ressalta-se que, as propriedades reológicas têm influência relevante no processo de construção e caracterização da trabalhabilidade do concreto e de argamassas, e assim, antever o comportamento do fluxo e estabilidade desses materiais antes da impressão é crucial, visto que as propriedades da argamassa no estado fresco tem grande influência na resistência mecânica, bem como na capacidade de impressão (JIAO *et al.*, 2017).

Devido à argamassa no estado fresco comportar-se como um material visco-plástico, ela desempenha um comportamento não newtoniano e, dessa maneira, o estudo da reologia é o método capaz de mensurar e descrever a transformação da viscosidade, elasticidade e plasticidade do material sob tensão de cisalhamento (HOU *et al.*, 2021). Figueiredo *et al.* (2019) e Nerella *et al.* (2019), afirmam que esses comportamentos são considerados como os de um fluido Bingham, logo, podem ter suas tensões de escoamento e viscosidades medidas. O método de Bingham tem sido extensamente utilizado para determinar o fluxo da massa impressa.

A literatura apresenta diversos modelos que propõem descrever o comportamento reológico dos fluidos. Uma síntese desses modelos e suas respectivas equações podem ser vistos no Quadro 3.

<b>Método</b>	<b>Equação</b>	<b>Descrição</b>
Newton	$\tau = \mu\gamma$	$\tau$ – Tensão de cisalhamento $\mu$ - viscosidade absoluta $\gamma$ - taxa de cisalhamento
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu\gamma$	$\mu$ - viscosidade plástica $\tau_0$ - tensão de escoamento $\gamma$ - taxa de cisalhamento
Ostwald	$\tau = K \dot{\gamma}^n$	K- índice de consistência n- índice de comportamento $\gamma$ - taxa de cisalhamento
Herschel-Bulkley	$\tau = K \dot{\gamma}^n + \tau_0$	K- índice de consistência n- índice de comportamento $\gamma$ - taxa de cisalhamento

		$\tau_0$ - tensão de escoamento
--	--	---------------------------------

Quadro 3- Modelos reológicos para fluidos independentes do tempo

Fonte: (Melo, 2008) - Adaptado

O material impresso possui características semi-sólidas e este flui quando determinada tensão de cisalhamento é aplicada. A tensão de escoamento, por sua vez, é a tensão de cisalhamento de pico exigido para iniciar o escoamento da pasta. Por outro lado, a tensão de escoamento dinâmica é a tensão de cisalhamento necessária para manter o fluxo, quando a pasta começa a fluir saindo da posição de repouso. Se a tensão de cisalhamento externa for removida, a pasta terá seu fluxo interrompido, o que ocasionará a floculação das partículas devido à interação entre a tensão de escoamento estática e as partículas da massa (REHMAN; KIM, 2021).

Assim como a argamassa convencional, a argamassa impressa em 3D também tem suas propriedades mensuradas por meio de reômetros convencionais. Para a construção impressa em 3D, o controle da tixotropia é relevante, pois esses fatores podem tornar o material muito rígido nas interfaces das camadas dificultando a aderência de uma camada a outra (PANDA *et al.*, 2019). Chen *et al.* (2020) concordam com esse argumento e denominam tais características como junta fria, que é o processo referido a adesão intercamada fraca entre a camada antiga e a nova.

## 2.4. COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA

A fim de ajustar as características aos parâmetros de impressão desejados, inúmeros tipos de materiais são incorporados à mistura cimentícia para melhorar e aperfeiçoar o desempenho da construção, produzindo, por exemplo, concretos e argamassas de alta resistência, concretos e argamassas leves, concretos resistentes a produtos químicos, entre outros (DAUNGWILAILUK *et al.*, 2021).

As composições usadas para a argamassa impressa tem sido um grande desafio para os pesquisadores para atender os parâmetros necessários para impressão como: fluidez, tempo de pega, extrusão, ligação entre camadas, capacidade de construção, deposição camada por camada, bem como, propriedades mecânicas. Principalmente encontrar um equilíbrio entre a capacidade de construção e fluidez (SEPASGOZAR *et al.*, 2020). A partir desse conceito, a Tabela 1 apresenta algumas proporções e componentes da argamassa imprimível encontrada na literatura.

Referência	Aglomerante					Cimento	Nanoma- teriais	Água
	Cinza volante (kg/m <sup>3</sup> )	Sílica ativa (kg/m <sup>3</sup> )	Pó de calcário (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Escória de alto forno (kg/m <sup>3</sup> )			
Figueiredo <i>et al.</i> (2019)	496,8- 583,5	-	95,5- 888,9	94,4- 294,4	524,7- 622,2	224,9 - 493,7		327,4 - 449,7
Lee <i>et al.</i> (2019a)	166	83	-	-	-	580		232
Joh <i>et al.</i> (2020)	172	79	-	1154	-	576		240
Zhang <i>et al.</i> (2021)	-	-	97	1258	-	600		270
Kazemian <i>et al.</i> (2021)	-	-	-	1379	-	600	0,3	244- 274

Tabela 1- Proporções de componentes da massa cimentícia imprimível em 3D  
Fonte: (Próprio Autor, 2022)

Pode-se observar na Tabela 1, que diversas misturas e proporções estão sendo testadas pelos pesquisadores, para certificar as propriedades reológicas e mecânicas da argamassa, (MEURER; CLASSEN, 2021). Deve-se também destacar que a maioria dos autores optam pela adição de cinza volante na mistura, visto que, essa adição melhora significativamente a propriedade de fluidez, além de ter menor custo e ser considerada

sustentável (RAHUL *et al.*, 2019a), e apenas os autores Kazemian e Khoshnevis, (2021) optaram pelo uso de nanomaterial (nano-argila).

Chen *et al.* (2019) verificaram o efeito do calcário e argila calcinada na extrudabilidade e reologia do concreto 3D, e concluíram que a adição desses, acelera consideravelmente a hidratação inicial do cimento, o que leva a um melhor desempenho mecânico nas fases iniciais. Zang *et al.* (2019) demonstraram que ao substituir 2% de ligantes por sílica ativa, aumenta a construtibilidade da argamassa em 117% em relação a argamassa de controle. Isso se explica porque a sílica ativa contribui com um bom efeito na tixotropia e reologia, como afirmam também os autores Guo *et al.* (2020). Esses autores constataram que o pó de escória pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas do material, contudo, o aumento ininterrupto do teor do pó, afeta as propriedades reológicas da argamassa e conseqüentemente aumenta o tempo de pega.

A argamassa não deve dispor de alto teor de areia, pois pode levar a segregação durante a extrusão e bloqueio da mangueira (REHMAN; KIM, 2021). Em contrapartida, Roussel (2018) afirma que o acréscimo excessivo de areia na mistura pode ocasionar o aumento das ligações físico-químicas entre as partículas cimentícia e dessa forma apresentar valores maiores de tensão de escoamento.

A utilização de materiais reciclados na mistura das argamassas podem favorecer a produção da argamassa 3D, atendendo aos requisitos das propriedades reológicas bem como da capacidade de extrusão (ZOU *et al.*, 2021).

Atualmente alguns pesquisadores optam pela utilização de nanomateriais, com o intuito de modificar o comportamento da argamassa no estado fresco e facilitar a impressão (SONG; LI, 2021). Como citado por Chougan *et al.* (2020), a adição de partículas de nano-atapulgita (argila) ocasiona um aumento significativo na tensão de escoamento, além de melhorar a capacidade de construção das camadas. Kruger *et al.* (2019) por sua

vez, concluíram que 1% de nano-sílica é a dosagem ideal para aumentar a tixotropia da argamassa.

Segundo Soltan e Li (2018), a substituição da areia por nano-sílica na argamassa pode manter a fluidez, e de outra forma, a adição de nano-argila diminui o tempo de pega e a fluidez, contudo, melhora significativamente a capacidade de construção.

Deve-se também atentar para o teor de água na argamassa. A baixa proporção de água torna o material seco, com baixa viscosidade, e conseqüentemente apresenta uma baixa capacidade de construção de camadas (ROUSSEL, 2018).

## **2.5. GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS**

O ajuste granulométrico na composição da argamassa também tem sido outro desafio enfrentado pelos pesquisadores, devido à grande variedade de dimensões de bico de extrusora.

Segundo Liu *et al.* (2019), é fundamental caracterizar os agregados, determinando as suas dimensões máximas, visto que eles contribuem fortemente na bombeabilidade, trabalhabilidade, porosidade, desempenho mecânico, retração e durabilidade da argamassa. Zareiyani e Khoshnevis (2017), afirmam que quanto menor a dimensão dos agregados na mistura, maior será a resistência à compressão. Panda *et al.* (2019), constataram em seus experimentos um aumento na tensão de escoamento e na construtibilidade das camadas, devido à granulometria mais fina da sílica ativa adicionada na mistura.

Segundo Yuan *et al.* (2019), no que tange a granulometria, não é indicado conter em sua mistura agregados graúdo, ou seja, dimensões acima de 4,75 mm em razão de aumentar a distância entre as partículas de cimento e, por conseqüência, provocar a redução da tensão de escoamento, o que levará a segregação da pasta na mangueira pelo qual é

transportada e, conseqüentemente, pode ocasionar o bloqueio do bico da impressora. A Tabela 2 expõe as faixas de agregados e as respectivas dimensões do bico mais utilizados nas pesquisas.

Referência	Granulometria do Agregado (mm)	Tamanho do Bico (mm)
Figueiredo <i>et al.</i> (2019)	0,5	40x10
Meurer e Classen, (2021)	4	Ø 45
Lee <i>et al.</i> (2019a)	0,16- 0,2	Ø 25
Joh <i>et al.</i> (2020)	0,16- 0,2	Ø 40
Shakor <i>et al.</i> (2019)		Ø14, Ø20 e
	0,3	35x10
Zahabizadeh <i>et al.</i> (2021)	1	60x12
Nerella <i>et al.</i> (2019)	0,06- 2	30x18,72
Ashraf <i>et al.</i> (2021)	1	Ø 24,5
Chen <i>et al.</i> (2021)	4,75- 20	55x55
Chen <i>et al.</i> (2020)	2	40x13,5

Tabela 2- Variações granulométricas e dimensões do bico de impressão  
Fonte: (Próprio Autor, 2022)

Nota-se na Tabela 2 que, há uma grande variabilidade granulométrica utilizada nas composições, em virtude da forma do bico de extrusora ser variável como: retangular, quadrada, circular ou ovalar (BUSWELL *et al.*, 2018). Percebe-se também que, grande parte dos autores optam pela utilização dos agregados miúdos, em função de obter um fácil escoamento sem ocasionar obstrução do bocal da extrusora (LEE *et al.*, 2019a). Dentre as dimensões listadas, apenas os autores Chen *et al.* (2021) utilizaram agregado graúdo, no qual foi empregado uma impressora 3D de grande porte para impressão de concreto, especificamente para construção de grande escala.

## 2.6. ADITIVOS

Os aditivos químicos têm um efeito positivo para a construção digital, em consequência do seu efeito de dispersão das partículas do ligante, dessa forma, reduzem a tensão de escoamento e viscosidade plástica da argamassa (Rehman e Kim, 2021). Os autores Qian e De Schutter, (2018) complementam esse argumento ao concluir que, a adição de superplastificantes como naftaleno sulfonato formaldeído e policarboxilato éster, diminui o comportamento tixotrópico e a tensão de escoamento dinâmica do concreto, em virtude da dispersão criada por consequência da absorção sobre as partículas do ligante.

Nesse mesmo sentido, pesquisadores também observaram que os agentes modificadores de viscosidade, aumentam a viscosidade plástica, a tensão de escoamento, a capacidade de extrusão, no entanto, uma dosagem excessiva desse aditivo dificulta a hidratação da pasta cimentícia (CHEN *et al.*, 2019), alterando significativamente o tempo de pega e a resistência inicial da argamassa.

Além dos superplastificantes e modificadores de viscosidade, os aceleradores de pega têm sido bastante utilizados nas composições da argamassa 3D, a pretexto de ocasionar um rápido aumento inicial da tensão de escoamento, o qual contribui com o processo da extrusão, assim como também, na habilidade retardar o efeito de alguns aditivos, e desta forma, acelerando a hidratação do cimento. Ainda nesse contexto, aditivos redutores de água também são utilizados para regular as propriedades reológicas de massa de cimento (VARELA *et al.*, 2021). A Tabela 3 apresenta os tipos e teores de aditivos utilizados por alguns autores em suas pesquisas:

Referência	Modificador de Viscosidade (%)	Acelerador de pega (%)	Retardador de pega (%)	Superplastificante (%)
Figueiredo <i>et al.</i> (2019)	0,35- 2,67	-	-	2,70- 9,98
Lee <i>et al.</i> (2019a)	0,29	-	-	1,43
Shakor <i>et al.</i> (2019)	-	0,67	0,53	0,67

Joh <i>et al.</i> (2020)	0,29	-	-	1,43
Shakor <i>et al.</i> (2020)	-	0,5- 0,6	0,53	-
Xiao <i>et al.</i> (2020)	-	0,0- 3,0	-	0,75- 0,83

Tabela 3- Proporções de aditivos químicos

Fonte: (Próprio Autor, 2022)

Observa-se que os aditivos superplastificantes foram empregados por todos os autores listados na Tabela 3, o que indica que esses aditivos químicos têm contribuído positivamente para a impressão 3D da argamassa. Por conseguinte, os agentes modificadores de viscosidade também são aditivos que favorecem a mistura pois, dispõem de particularidades no qual influência na capacidade de extrusão.

## 2.7. CAPACIDADE DE IMPRESSÃO

A capacidade de impressão corresponde ao comportamento da massa fresca durante e após a impressão, e também está ligada à relação entre a composição da massa e o tipo do bico. Ela indica a capacidade de se produzir filamentos com características controladas, com o intuito de verificar se a massa desenvolvida é viável para o equipamento (HOU *et al.*, 2021). Após a caracterização reológica, para assegurar uma impressão adequada, a mistura deve atender aos parâmetros indicados no Quadro 4

Quadro 4 - Definição de termos/parâmetros para a capacidade de impressão 3D

Parâmetro	Descrição
Bombeabilidade	Capacidade de transporte da argamassa do armazenamento até a extrusora. Desse modo, a bombeabilidade deve assegurar a facilidade do transporte de forma que interrupção e segregação massa devem ser evitadas. (WENG <i>et al.</i> , 2018)

Extrudabilidade	Refere-se a qualidade e facilidade de um material a ser extrudado de forma contínua, uniforme, suave e intacto através do bico da extrusora sem causar entupimento (HOU <i>et al.</i> , 2021)
Construtibilidade	Capacidade das camadas serem empilhadas sem que ocorram deformações verticais nas camadas inferiores (REHMAN e KIM, 2021)

Quadro 4 - Definição de termos/parâmetros para a capacidade de impressão 3D  
Fonte: (Próprio Autor, 2022)

Rahul *et al.* (2019a) retrataram a extrudabilidade pela distância máxima que uma camada pode ser extrudada sem qualquer segregação, falha ou bloqueio. De acordo com Moeini *et al.* (2020), uma baixa qualidade da extrusão, pode ocasionar menor ligação entre as camadas, devido a uma troca de umidade entre elas, o que conseqüentemente favorece para uma junta porosa com baixa resistência às forças normais e ao cisalhamento; o que defende a grande importância dos testes de impressão.

Ashrafi *et al.* (2021) afirmam que, uma capacidade de construção insuficiente (capacidade de empilhamento de camadas frescas) pode acarretar na deformação das camadas extrudadas nas direções verticais e horizontais, e conseqüentemente alterar a geometria da amostra, bem como ocasionar o colapso da mesma. Em conformidade com Nerella *et al.* (2020), há três parâmetros essenciais aplicado a construtibilidade que caracterizam a capacidade de construção: 1) a altura da parede impressa, 2) a quantidade (volume) de camadas a ser impressa, e 3) o intervalo de tempo de impressão entre uma camada e outra. Esses autores ratificam que a geometria das camadas também influencia na construtibilidade.

## 2.8. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Pesquisadores em diversos países têm se dedicado a elaboração de técnicas construtivas que visam garantir a maior durabilidade, melhor desempenho e maior tempo de vida útil das edificações. A vida útil (VU) de uma edificação pode ser definida como uma medida temporal da durabilidade de um edifício ou de suas partes, ou seja, o período de tempo em que estes elementos se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, considerando a devida realização dos serviços de manutenção (NBR 15575, 2021).

Por se tratar de um elemento construtivo constantemente utilizado na construção civil, a argamassa precisa que suas propriedades sejam apropriadas para alcançar o seu desempenho, ou seja, a mesma deve atender aos requisitos de aderência, capacidade de absorver deformações, estanqueidade e resistência mecânica (GARCÍA-CUADRADO *et al.*, 2017). Durante a vida útil de uma edificação, as estruturas do concreto são expostas a diversas solicitações, como as cargas do sistema, as cargas acidentais e ainda a fatores ambientais, que também são considerados adversos à durabilidade das estruturas, como a penetração de cloreto, ciclos de congelamento-descongelamento, reação álcali-agregado, ataque por sulfatos e carbonatação (JIN *et al.*, 2017).

Pelà *et al.* (2017) afirmam que, a obtenção de um resultado de qualidade da argamassa depende inteiramente da correta identificação de alguns parâmetros mecânicos para a caracterização de uma mistura apropriada para alvenaria, particularmente, esses testes mecânicos são realizados por máquinas de ensaio universais, basicamente constituída por mesa móvel ou travessão móvel, dispositivos de fixação dos corpos de prova, colunas de sustentação e a base. A força aplicada ao corpo de prova é então medida, juntamente com a deformação da amostra durante a aplicação da carga. Sendo assim, os ensaios de flexão, tração e compressão, devem ser realizados baseados nos testes feitos em argamassa

comum, para então chegar a uma argamassa capaz de tornar-se segura e precisa para uma edificação.

É importante ressaltar que, dentro da engenharia estrutural, as características mecânicas do concreto ou argamassa são parâmetros bastante críticos, e é importante prever a falha da argamassa impressa no processo de impressão. As especificidades de endurecimento e durabilidade desses materiais dependem especialmente de sua estrutura como um todo. Para isso foi proposto um modelo com uma sequência completa de testes para validação da argamassa 3D (seção de resultados). As argamassas devem ser submetidas à sequência de teste, desde os ensaios reológicos até os ensaios mecânicos, logo que, a reologia e os requisitos de impressão estão correlacionados (WENG *et al.*, 2018).

## **2.9. ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA ARGAMASSA DE IMPRESSÃO 3D**

### **2.9.1 ESTADO DA ARGAMASSA FRESCA**

As características frescas, especialmente a reologia, no que tange a viscosidade plásticas e tensão de escoamento, assim como a fluidez, são importantes para a impressão da argamassa (PANDA *et al.*, 2017). Segundo Nerella *et al.* (2019), atualmente não existe padrões estabelecidos para realizar testes reológicos e mecânicos, nem mesmo diretrizes para estabelecer um traço apropriado ao uso de argamassa na construção digital.

Atualmente vários métodos e equipamentos têm sido utilizados para avaliar a reologia e a fluidez da argamassa (VARELA *et al.*, 2021).

A viscosidade plástica e a tensão de escoamento podem ser examinadas utilizando reômetros, em alguns estudos a viscosidade também foi avaliada por meio de aferições do fluxo em funis em V (ROUSSEL *et al.*, 2018). Para a análise da fluidez alguns autores empregam o método de teste de abatimento ou mesa de fluxo, contudo, o teste de mesa de fluxo é mais priorizado devido os resultados destes, se relacionarem com a tensão de

escoamento. Por conseguinte, esses testes podem indicar se um concreto ou argamassa é edificável ou não (construtibilidade), ou seja, se as camadas podem ser impressas e depositadas subsequentes sem perigo de colapso (MECHTCHERINE *et al.*, 2018). O Quadro 5 ilustra os métodos e equipamentos comumente mais utilizados na literatura.

Ensaio	Referência	Equipamento
Reologia	Moeini <i>et al.</i> (2020)	Reômetro Anton Paar MCR 302
	Yuan <i>et al.</i> (2019)	Reômetro Rotacional
	Panda <i>et al.</i> (2017)	Viskomat XL
	Varela <i>et al.</i> (2021)	Reômetro modular
	Abebe e Lohaus (2017)	Funil V
	Weng <i>et al.</i> , (2018)	Viskomat XL
	Joh <i>et al.</i> (2020)	Reômetro (Brookfield DV-III)
	Ma <i>et al.</i> (2018)	Funil V
Fluidez	Lee <i>et al.</i> (2019a)	Mini cone
	Ma <i>et al.</i> (2018)	Mesa de fluxo
	Ji <i>et al.</i> (2019)	Mini cone
	Rahul <i>et al.</i> (2019a)	Mesa de fluxo
	Joh <i>et al.</i> (2020)	Mesa de fluxo
	Ashrafi <i>et al.</i> (2021)	Mesa de fluxo
Tempo de Pega	Shakor <i>et al.</i> (2019)	Vicat
	Ashrafi <i>et al.</i> (2021)	
	Pott e Stephan, (2021)	
	Li <i>et al.</i> (2018)	
	Polat <i>et al.</i> (2017)	
	Sharma <i>et al.</i> (2020)	

Quadro 5- Equipamentos de testes

Fonte: (Próprio Autor, 2022)

Observa-se no Quadro 5 que, os autores investigaram o comportamento reológico da argamassa utilizando reômetros de diversos tipos. Apenas os autores Ma *et al.* (2018) e Abebe e Lohaus (2017) optaram por utilizar o funil V para avaliar a viscosidade, realizando o ensaio teste do funil. A fluidez, por sua vez foi investigada com o ensaio de abatimento em que foi utilizado o aparelho de teste mini cone e por meio do método de

consistência, empregou-se o equipamento mesa de fluxo. Para o teste do tempo de pega, todos os autores referenciados, utilizaram o teste de agulha Vicat.

Após uma investigação criteriosa em ensaios especificamente para parametrizar a reologia e a fluidez de argamassas de impressão 3D, a Tabela 4 apresenta os resultados desses testes, contendo diferentes tipos de aditivos.

<b>Aditivos</b>	<b>Referência</b>	<b>Viscosidade Plástica (Pa.s)</b>	<b>Tensão de Escoamento (Pa)</b>	<b>Tempo de Pega (Min)</b>	<b>Fluidez (mm)</b>
Redutor de Água	Lee <i>et al.</i> (2019a)	21	420	-	145
	Rahul <i>et al.</i> , (2019a)	-	1.500- 2.500	Início: 142- 252 Final: 298- 476	-
	Joh <i>et al.</i> (2020)	19,6	413	-	148
	Zhang <i>et al.</i> (2019)	3,8- 4,5	178,5- 359,8	-	192,5- 269
	Yuan <i>et al.</i> (2019)	5,8- 8,3	250- 590	Início: 15-60 Final: 60- 600	-
	Lee <i>et al.</i> (2019b)	141	670	Início: 424 Final: 602	160- 170
	Comminal <i>et al.</i> (2020)	6,9- 8,11	619- 652	-	-
	Shakor <i>et al.</i> (2019)	-	-	Início: 75- 85 Final: 90- 225	-
Ativador alcalino	Guo <i>et al.</i> (2020)	5,50- 8,80	6,76- 106,97	Início: 18- 151 Final: 30- 228	-
Calcário pulverizado-celulose-lima	Ashrafi <i>et al.</i> (2021)	-	-	Início: 75,3- 86 Final: 143	232,5

Tabela 4- Resultados dos testes no estado fresco

Fonte: (Próprio Autor, 2022)

Observa-se na Tabela 4, os resultados de testes reológicos, fluidez e tempo de pega da argamassa impressa relatados na literatura, contendo o mesmo tipo de aditivos na mistura e com valores aproximados, entretanto a utilização do aditivo redutor de água aumenta a resistência mecânica em relação à mistura sem aditivos, além de diminuir a probabilidade de ocorrências de patologia devido à perda de água excessiva, como o surgimento de porosidade, que prejudicaria a durabilidade da construção (CHEN *et al.*, 2021). Os autores Shakor *et al.* (2019), Yuan *et al.* (2019), Comminal *et al.* (2020) diferente dos

demais, utilizaram na argamassa um retardador de pega; de outro modo, os autores Joh *et al.* (2020), Lee *et al.* (2019) e Comminal *et al.* (2020), optaram por usar os modificadores de viscosidade para favorecer o material cimentício durante à impressão. Rahul *et al.* (2019a) declaram que, com a tensão de escoamento de 1.500-2.500 Pa a massa consegue atender aos requisitos de bombeamento, extrusão e capacidade de construção, assim, Panda *et al.* (2019) corroboram ao afirmar que as camadas inferiores devem possuir uma alta tensão de escoamento, para que a massa impressa possa suportar às cargas das camadas posteriores, formando uma altura total de 1 m após a sobreposição de diversas camadas.

Quanto ao endurecimento da argamassa, Yuan *et al.* (2019) afirmam que o tempo de pega inicial satisfatório é de 30-50 minutos e o tempo de pega final satisfatório é de aproximadamente 1 hora. O tempo de pega prolongado pode melhorar a impressão do material e consegue mais camadas empilhadas consecutivamente (GUO *et al.*, 2020).

A fluidez, em virtude de ser considerada uma das propriedades primordiais, Zou *et al.* (2021) asseguram que, para uma extrusão admissível, a argamassa fresca precisa ter uma fluidez entre 168 mm a 201 mm (medida de espalhamento no ensaio de fluidez). Alonso *et al.* (2017) por sua vez, argumentam que, independentemente da mistura da argamassa, quanto maior o seu espalhamento, menor será a tensão de escoamento estático. Alonso *et al.* (2017) ainda acrescentam que, o diâmetro alcançado como resultado das medições ou espalhamento da amostra concede informações a respeito da trabalhabilidade da argamassa. Um diâmetro menor que 140 mm indica consistência seca, valores maiores que 200 mm indicam uma consistência fluida, o que sugere uma amplitude mais apropriada para impressão. Ma *et al.* (2020) alegam que um diâmetro favorável para a impressão da argamassa seria 180 mm, entretanto, em seus ensaios obtiveram resultados moderadamente maior que 200 mm.

## 2.9.2. ENSAIOS DE CAPACIDADE DE IMPRESSÃO

Atualmente, ainda não existe diretrizes normativas para validar os parâmetros de tais métodos. Os trabalhos realizados pelos pesquisadores avaliam a qualidade desses parâmetros por meio de inspeção visual. Para apresentar resultados satisfatórios nestes três processos, a argamassa 3D deve ser diferente das argamassas convencionais, visto que a argamassa deve atender as exigências do processo de impressão.

Essa deve possuir fluidez e tempo de pega suficiente para percorrer todo o sistema de bombeamento e extrusão. Além disso, deve possuir resistência suficiente para suportar uma quantidade mínima de camadas sobrepostas antes da interrupção do processo para secagem, de modo a não prejudicar a velocidade da construção. Quando esses três requisitos são atendidos, o material é considerado apto para construção (XIAO *et al.*, 2021).

Rehman e Kim, (2021) afirmam em seus estudos que a maior parte dos métodos de ensaio para capacidade e qualidade de impressão tem sido empíricos, e analisados de forma qualitativa. Com relação à extrusão, são determinados como “favoráveis”, quando não há bloqueio ou segregação ou “não favoráveis” quando há bloqueio e a impressão é descontinuada. Hou *et al.* (2021) entenderam que quanto mais próximo o tamanho das camadas estiver do tamanho do bico da extrusora, melhor será a impressão.

Moeini *et al.* (2020) relataram em sua pesquisa que, diferenças nas variações de largura das camadas eram devidas às divergências na reologia das misturas. Segundo Weng *et al.* (2018) estudar as composições da argamassa investigar as características das misturas, tanto para os parâmetros de bombeabilidade quanto para construtibilidade, estão relacionados ao desempenho reológicos. Conforme Rahul *et al.* (2019b) e Kazemian *et*

*al.* (2017), uma alta tensão de escoamento é primordial para evitar as deformações das camadas impressas, pois assim, é assegurada a solidez da forma antes do endurecimento.

### 2.9.2.1. TESTE DE BOMBEABILIDADE

A pesquisa de sistemas de bombeamento utilizados em laboratórios ainda é limitada e geralmente a distância de bombeamento não é especificada e em alguns casos é ignorada, devido ao tamanho pequeno dos objetos impressos (XIAO *et al.*, 2021). Segundo Xiao *et al.* (2021), a argamassa tem sua reologia alterada com o aumento da distância do bombeamento, vazão e tempo. De outro modo, os parâmetros adotados para um bombeamento de grande escala, é mais desafiador de serem atendidos, quando utilizado a mesma proporção de composição de argamassa, para impressão realizada em laboratório. Ou seja, para uma construção de grande escala, o tempo de endurecimento da massa deve ser maior do que o tempo em escala de laboratório, para atender os requisitos de transporte devido ao tamanho da mangueira utilizado.

Figueiredo *et al.* (2019) prepararam seis misturas para a realização do teste de bombeabilidade, para isso utilizaram uma mangueira de 5 m. Os resultados estão resumidos na Tabela 5.

Misturas	$\sigma_0^1$ [kPa]	$\tau_0^2$ [kPa]	Bombeamento dos 5 metros de mangueira
A	34,74	4,41	✓
B	39,03	4,87	x
C	29,22	0,90	x
D	35,96	2,51	x
E	25,63	2,16	✓
F	34,26	2,49	✓

<sup>1</sup> Tensão de escoamento

<sup>2</sup> Tensão de cisalhamento

## Tabela 5- Resultados dos testes de bombeamento

Fonte: (Figueiredo et al. (2019) -Adaptado

Segundo os autores, três composições não foram capazes de serem bombeadas devido ao bloqueio da bomba de deslocamento linear e, conseqüentemente, não foi possível o bombeamento por toda extensão dos cinco metros da mangueira. Esses pesquisadores afirmam que esses bloqueios provavelmente foram causados pelos dimensão máxima dos agregados utilizados na composição, no qual apresentaram-se incompatíveis com o sistema de bombeamento. E ainda asseguram que incapacidade de bombear não ocorreu devido às tensões de cisalhamento e escoamento excessivo, logo que, ambas estavam na mesma faixa que as demais composições. Dessa forma, as únicas consideradas aprovadas no teste de bombeamento foram A, E e F.

### **2.9.2.2. TESTE DE EXTRUDABILIDADE**

Por meio de inspeção visual são analisadas as amostras se há segregação e trincas ao longo dos filamentos das camadas extrudadas. Esse processo pode ser afetado principalmente pela distribuição e quantidade das composições secas na mistura (aglomerantes). Ma *et al.* (2018) afirmam que, a melhor extrudabilidade é identificada por uma maior distância sobre o qual a camada pode ser extrudada sem separação e bloqueio.



Figura 10 - Testes de extrudabilidade em seção oval (a) e retangular (b): Realizado por (a) Ma *et al.* (2019) e (b) Arunothayan *et al.* (2020)

A Figura 10 apresenta a impressão em um teste de extrudabilidade, demonstrando como os autores Ma *et al.* (2019) e Arunothayan *et al.* (2020) realizaram os testes de extrudabilidade, utilizando bico da extrusora com formato oval e diâmetro de 12 mm e bico retangular com dimensão de 30 x 15 mm, respectivamente. A Figura 10a mostra a extrudabilidade bem como uma capacidade de construção considerada adequada contendo à adição de 0,5% de fibra de basalto, por outro lado o mesmo teste utilizando 0,7% de fibra de basalto em sua composição não se mostrou favorável a impressão. A Figura 10b ilustra cinco camadas impressas uma ao lado da outra, com comprimento de mais ou menos 250 mm cada, os autores concluíram que essa composição com 2% de fibra de aço mostrou-se adequada a impressão, pois não ocorreu nenhum bloqueio ou segregação durante o processo de impressão.

### 2.9.2.3. TESTE DE CONSTRUTIBILIDADE

À medida que aumenta o número das camadas depositadas no processo de impressão da argamassa, o risco de colapso também cresce, pois a tensão das camadas aumenta à proporção que aumenta o número de camada depositadas. O teste de construtibilidade

caracteriza-se por determinar a capacidade do material impresso de resistir à deformação durante o empilhamento das camadas. Neste contexto, vários fatores podem influenciar no processo. Panda *et al.* (2018) constataram que a aderência entre as camadas e a qualidade da impressão é afetada pela altura do bico da extrusora. Nos estudos destes autores, os resultados dos ensaios evidenciaram que altura do bico com 4, 2 e 0 mm (Figura 11) resulta em uma resistência de união de camadas de 1,5, 1,8 e 2,3 MPa, respectivamente.

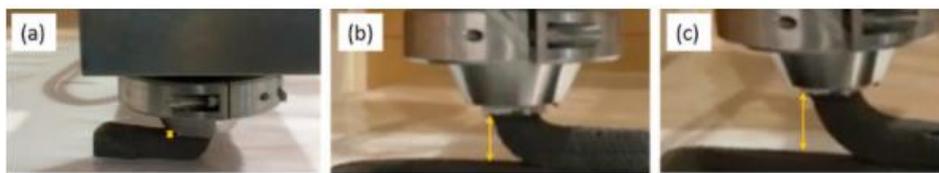


Figura 11- Distância do bico da camada impressa: (a) Zero, (b) Dois, (c) Quatro milímetros

Fonte: (Panda *et al.*, 2018)

Ma *et al.* (2019) afirmam que ao utilizar o bico com dimensão de 8 x 25 mm, a altura ideal a ser utilizada é 10 mm com velocidade de 50 mm/s.

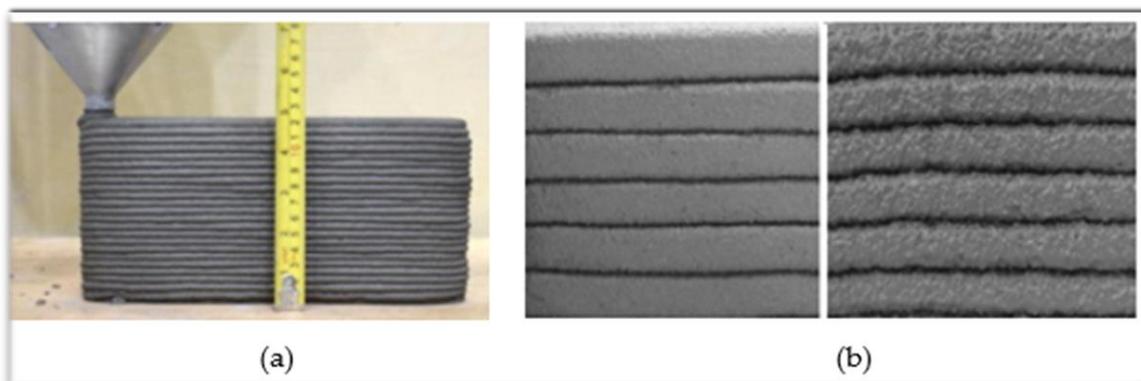


Figura 12- Teste de construtibilidade: Realizado por (a) Ma *et al.*, (2019) e (b) Arunothayan *et al.* (2020)

O teste de construtibilidade apresentado na Figura 12, foi realizado por Ma *et al.* (2019) e Arunothayan *et al.* (2020), e a partir dele nota-se que composições com proporções iguais ou inferior a 0,5% de fibra de basalto são consideradas misturas ideais para o teste

de construtibilidade, visto que, nenhuma deformação vertical ou deformação excessiva nas camadas inferiores foi presenciado, considerando a altura do bico igual a 5 mm. Arunothayan *et al.* (2020) apresentam em seu teste de construtibilidade, conforme Figura 12b, sete camadas impressas empilhadas com altura do bocal de 15 mm. Seus resultados também foram considerados ideais para impressão, pois não houve falhas nem distorções das camadas.

### 2.9.3. ENSAIOS MECÂNICOS

Para tornar as propriedades mecânicas da construção realizada com impressão 3D tão resistente e durável quanto à construção convencional, é necessário uma alta aderência entre camadas, e para isso, as características dos materiais como a granulometria do agregado, tipo de cimento Portland, tipo de aditivos, bem como as proporções ou composição da mistura, como a relação água/cimento, além dos parâmetros mecânicos de impressão como a velocidade e o intervalo de tempo de impressão, devem ser criteriosamente controlados, pela realização de ensaios mecânicos (DRESSLER *et al.*, 2020).

A Tabela 6 apresenta os resultados de testes mecânicos encontrados na literatura, comparando resultados com e sem reforço de fibras na composição.

Reforço	Referência	Resistência à Compressão MPa	Resistência à Tração MPa	Resistência à Flexão MPa
	Zhang <i>et al.</i> (2021)	59		9,7
Fibra de polipropileno	Rahul <i>et al.</i> (2019b)	61	–	12
	Wolfs <i>et al.</i> (2019)	30	3,8	4,8
	Lee <i>et al.</i> (2019a)	22,54	3	–

	Lee <i>et al.</i> (2019b)	44,58	3,77	
	Ma <i>et al.</i> (2020)	–	2,1	
	Panda <i>et al.</i> (2017)	36	1,42	9,80
–	Zhang <i>et al.</i> (2019)	62		10,5
	Panda <i>et al.</i> (2018)	36	1,63	5,05
	Panda <i>et al.</i> (2019)	56	0,65	–
	Weng <i>et al.</i> (2018)	60	–	4,4
	Wi <i>et al.</i> (2021)	50	–	5,8
Fibra de basalto	Ma <i>et al.</i> (2019)	39,6	5,26	6,51
Fibras metálicas	Joh <i>et al.</i> (2020)	31	4,5	18,5
Fibra híbrida de polipropileno	Daungwilailuk <i>et al.</i> (2021)	60	5	–

Tabela 6- Resultado de testes mecânicos apresentados por diversos autores  
Fonte: (Próprio Autor, 2022)

Percebe-se que a amostra com maior resistência à compressão foi analisada por Rahul *et al.* (2019b), eles utilizaram uma impressora com bico retangular 30 x 30 mm e imprimiram a uma velocidade de 44 mm/s, usando como reforço fibra de polipropileno. Por outro lado, argamassa não contendo reforço de fibras em sua composição, os resultados de ruptura após 28 dias do tempo de cura, teve um valor médio de 46,27 MPa, o que demonstra que esses resultados foram considerados válidos, pois os mesmos atendem a exigência mínima de 25 MPa aos 28 dias determinados pela norma NBR 7215/2016.

Os resultados do teste de flexão dessa composição ficaram entre os que atingiram maior resistência. Zang *et al.* (2019), por sua vez, utilizaram um bico circular de diâmetro 20 mm, porém não usaram nenhum tipo de fibra como reforço, entretanto conseguiram uma resistência à compressão máxima de 62 MPa. Por outro lado, o resultado dos testes que

apresentou menor resistência a compressão foi realizado por Lee *et al.* (2019a), esses por sua vez utilizaram um bico circular com diâmetro de 25 mm com velocidade de impressão de 50, 75, 100 e 125 mm/s, sem nenhum tipo de reforço.

Joh *et al.* (2020) relatam que a resistência à tração das amostras com e sem reforços não foram significativamente diferentes, sem reforço de fibras metálicas atingiram as resistências de 4,5, 3,2 e 1,8 MPa enquanto a amostra reforçada teve resistência de 4,4, 3,3 e 1,2 MPa.

A resistência à flexão dos corpos de prova sem reforço, foram menores do que as amostras reforçadas com resultado de 6,1 e 6,5 MPa, enquanto com reforço de reforço de fibra esses corpos de prova atingiram a resistência de 11,0 e 18,5 MPa, nota-se que esses valores de flexão foram os maiores apresentados na tabela.

Uma alta fluidez também pode afetar a resistência à compressão da argamassa, devido à formação de microestrutura porosa, em consequência da maior relação água/cimento (KUMAR, 2019). Devido à fragilidade do concreto/argamassa digital, alguns autores argumentam que para aumentar a tenacidade e a resistência do concreto, a estratégia mais usada como reforço da 3DMP, é adicionar fibra de alto desempenho (SENF *et al.*, 2015). Com isso, Daungwilailuk *et al.* (2021) declaram que o objetivo das fibras de polipropileno é reduzir significativamente o surgimento de fissuras nas superfícies nas camadas impressas. Além de usada como reforço mecânico bastante relevante na edificação digital, as fibras evitam o desenvolvimento de microfissura, de modo a aumentar a resistência à flexão. Alguns autores asseguram em seus estudos que a adição de nano-sílica resultou em um aumento da resistência à flexão e compressão em 88% e 55%, respectivamente (XIAO *et al.*, 2021). Porém, o excesso de fibra na mistura, aumenta a fração de porosidade (ARUNOTHAYAN *et al.*, 2020).

Wolfs *et al.* (2021), Lee *et al.* (2019a) e Wi *et al.* (2021) afirmam que as amostras impressas apresentam menor resistência à compressão do que as amostras moldadas, devido a pequenos vazios na interface das camadas, e em contrapartida, a resistência a flexão era maior nas amostras impressas do que nas moldadas. Segundo os autores, tais particularidades podem ser atribuídas à proporção da mistura e aos parâmetros e direção de impressão, assim confirma os resultados obtidos por Feng *et al.* (2015). Lee *et al.* (2019a) comprovaram em seus estudos que a resistência à tração entre as camadas foi influenciada pela altura do bico.

## **2.10 ELABORAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS**

Não obstante ao conhecimento desses levantamentos dos processos de impressão de uma argamassa e suas particularidades, existe a necessidade de verificações técnicas específicas para massa impressa. Os resultados empíricos de ensaios da massa fresca não são suficientes para garantir as propriedades necessárias para o processo de impressão e a resistência necessária no estado endurecido. É preciso que sejam observadas as propriedades físicas que descrevem o comportamento reológico ou mecânico do material (FIGUEIREDO *et al.*, 2019).

Contudo, não existe ainda um padrão para essas medições, o que limita sua ampla aplicação da técnica. Nesse âmbito, é importante entender em quais circunstância levaria a criação de uma norma técnica e como elaborar uma.

O processo de elaboração de uma norma técnica ABNT é iniciado quando existe uma demanda de necessidades devido a inexistência de especificações técnicas. Essa necessidade pode então ser apresentada por qualquer pessoa, organismo ou empresa que estejam envolvidos com o tema a ser normalizado. O método para a elaboração de uma norma técnica pode ser simplificado por meio da Figura 13.

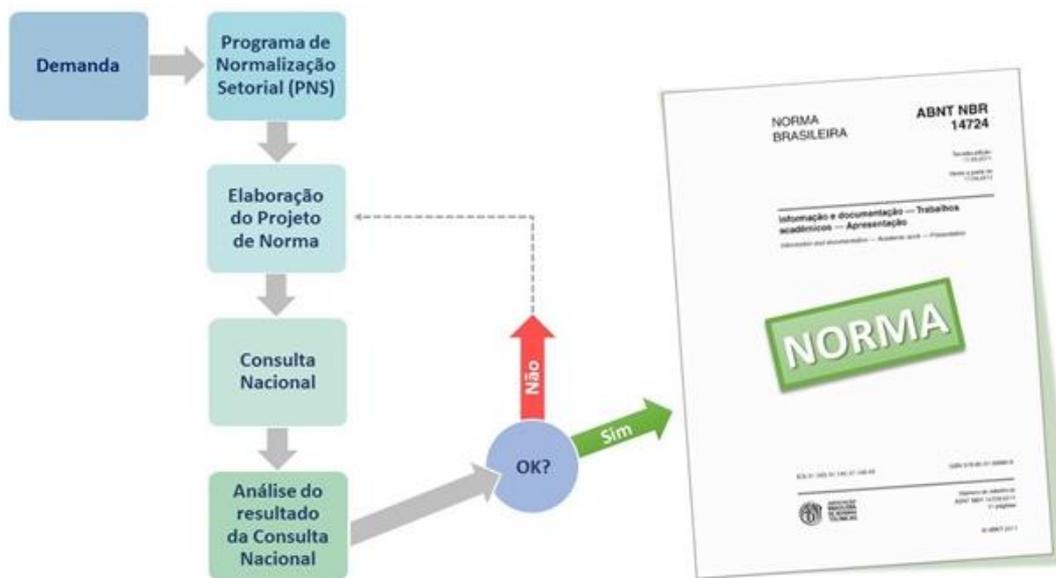


Figura 13- Esquema de elaboração de norma técnica

Fonte: ([http://abnt.org.br/images/normalizacao/como\\_elaborar\\_norma.jpg](http://abnt.org.br/images/normalizacao/como_elaborar_norma.jpg), 2022)

Percebe-se que com a pertinência da demanda, o órgão ABNT realiza uma análise e sendo viável, o tema é levado ao comitê técnico correspondente que posteriormente inserir o assunto no seu Programa de Normalização Setorial (PNS). Caso não exista comitê técnico relacionado ao tema proposto, a ABNT propõe a criação de um novo comitê técnico.

O tema é então discutido pelas comissões de estudo até atingir consenso, gerando então um projeto de norma. Qualquer interessado pode participar dessa discussão, independentemente de ser ou não associado à ABNT.

O projeto então é editorado e recebe a sigla ABNT NBR e seu respectivo número. Em seguida, o projeto de norma é submetido à consulta nacional, com ampla divulgação, no qual todas as partes interessadas têm a oportunidade de examiná-lo e emitir suas considerações.

Todos os comentários são analisados e respondidos pela comissão de estudo responsável.

Por fim, caso as sugestões sejam aceitas, são consolidadas no projeto de norma, que é homologado e publicado pela ABNT como Documento Técnico ABNT.

Ainda não existem normas regulamentadoras para a manufatura aditiva para a construção civil, porém já existe uma extensa quantidade de normas para a manufatura aditiva de forma geral com a definição de termos e peças para a construção do equipamento, como:

- ISO/ASTM 52900 - Terminologia para Manufatura Aditiva - Princípios Gerais – Terminologia: primeiro norma para MA a ser desenvolvido e aceito em conjunto pela Organização Internacional de Padronização (ISO), ASTM International. Este padrão deu o passo de unir os órgãos de padrões do mundo em torno da manufatura aditiva e coordenar o desenvolvimento de padrões através das fronteiras e indústrias.
- ISO/ASTM 52910 - Diretrizes para Projeto de Manufatura Aditiva: Um guia geral que fornece requisitos e recomendações para o uso de MA no design de produtos.
- A ISO/ASTM 52900 - Fabricação aditiva - Princípios gerais — Terminologia: Estabelece e define os termos usados na tecnologia de Manufatura aditiva, que aplica o princípio de modelagem aditiva e, assim, constrói geometrias físicas 3D por adição sucessiva de material.
- ISO/ASTM52942-20 Manufatura aditiva — Princípios de qualificação: Qualificando operadores de máquinas de fusão a laser de leito de pó de metal e equipamentos usados em aplicações aeroespaciais
- ASTM ISO/ASTM52903-1-20: Fabricação aditiva — Fabricação aditiva baseada em extrusão de materiais de materiais plásticos — Parte 1: Matérias-primas: Esta norma descreve um método para definir requisitos para materiais plásticos usados em processos de manufatura aditiva baseados em extrusão. Os materiais incluem materiais plásticos não preenchidos, preenchidos e reforçados adequados para processamento em peças.

Também existem diversas normas para as aplicações em extrusão de plástico, mesa com pó, impressão com metal, dentre outras. O estudo destas normas pode auxiliar na definição das futuras normas para a construção civil, principalmente as relacionadas com a extrusão de matérias.

A existência destas normas indica que não há objeções para a elaboração de uma norma para a Manufatura Aditiva para construção civil sejam criadas e diversos grupos de pesquisa no mundo tem trabalhado no sentido de gerar as regulamentações.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para definir a parametrização de uma argamassa para a impressão 3D aplicada à construção civil foi baseada em:

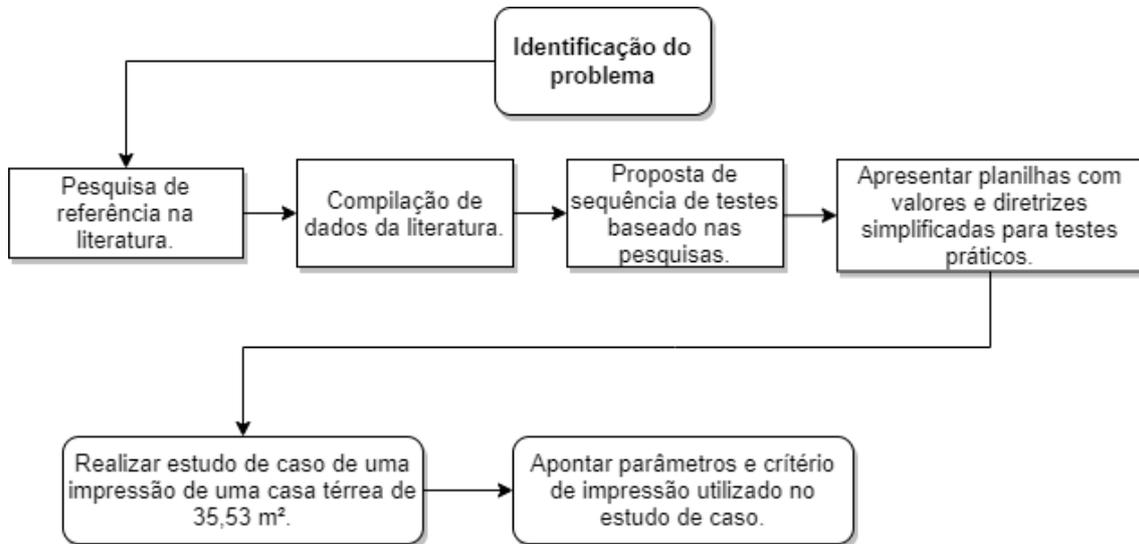


Figura 14- Diagrama do fluxo do trabalho

- Levantamento dos artigos utilizando as palavras chaves: Manufatura Aditiva, Impressão 3D, Ensaio em argamassa, Argamassa impressa, Extrusão de Argamassa;
- Coleta de dados: Após selecionar 130 artigos (artigos de revisão, ensaios, artigos de argamassa 3D e artigos de argamassas convencionais) foram organizados dados relativos às composições, granulometria dos agregados, formato e altura do bico de impressão, velocidade de impressão, largura das camadas impressas e resultados obtidos nos ensaios reológicos, de fluidez e de resistência;
- Comparações de testes e resultados: Por meio da revisão da literatura, as tabelas elaboradas e o estudo de caso abordado foram comparados os resultados dos ensaios da argamassa impressa com os resultados desses mesmos ensaios em argamassas tradicionais. No intuito de verificar o comportamento da massa no

estado fresco e endurecido, foram analisadas as composições usadas nas argamassas tradicionais, confrontando com as composições utilizadas nas argamassas para impressão 3D;

- Após as comparações de testes e resultados, a fim de analisar o método construtivo de impressão 3D, foi desenvolvido uma planta baixa 2D de uma casa de 35,53 m<sup>2</sup>, para a realização de uma simulação de impressão 3D, para a padronização de técnicas para casas populares;
- Na simulação visa-se, estimar os resultados das etapas e tempo da construção da residência proposta: por meio de comparativos de impressão baseado nos estudos apontados nesse trabalho. Serão estabelecidas faixas de parâmetros e critérios para impressão tais como:
  - a) Dimensão do bico;
  - b) Altura do bico;
  - c) Velocidade de impressão;
  - d) Quantas camadas são impressas sem deformar;
  - e) Quantas camadas são impressas para completar o pé direito de 2,70 m;
  - f) Quantas camadas são impressas em um dia.

## 4. RESULTADOS

Esta seção apresenta parâmetros para o processo de impressão 3D na construção civil, assim como, uma sequência de teste como sugestão para validação da argamassa a ser utilizada na extrusora. Uma matriz de decisão foi estabelecida para avaliar e selecionar as melhores opções dentre diferentes materiais para preparação da argamassa, e por fim, uma simulação do desenvolvimento de um projeto de uma residência impressa em 3D.

### 4.1 PARÂMETROS PARA O PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Uma parte essencial dos resultados desta pesquisa consiste na compilação de dados de mais de 100 artigos analisados. Estes dados foram consolidados nas tabelas e quadros apresentados no capítulo de revisão bibliográfica. Eles foram mantidos naquela seção para proporcionar um melhor entendimento. Contudo, para que essas tabelas fossem construídas, foi necessário um trabalho meticuloso de análise de cada referência bibliográfica em seus textos, tabelas, figuras e gráficos. Para facilitar a consulta destes resultados, são citadas a seguir essas tabelas e quadros:

- Proporções de componentes utilizada pelos pesquisadores na composição da argamassa 3D:

Referência	Aglomerante					Nanoma-teriais (%)	Água (kg/m <sup>3</sup> )
	Cinza volante (kg/m <sup>3</sup> )	Sílica ativa (kg/m <sup>3</sup> )	Pó de calcário (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Escória de alto forno (kg/m <sup>3</sup> )		
Figueiredo <i>et al.</i> (2019)	496,8-583,5	-	95,5-888,9	94,4-294,4	524,7-622,2	224,9-493,7	327,4-449,7
Lee <i>et al.</i> (2019a)	166	83	-	-	-	580	232
Joh <i>et al.</i> (2020)	172	79	-	115,4	-	576	240

Zhang <i>et al.</i> (2021)	-	-	97	125 8	-	600		270
Kazemian <i>et al.</i> (2021)	-	-	-	137 9	-	600	0,3	244 - 274

Tabela 7- Composição da argamassa 3D

A Tabela 7 contém composições de argamassa 3D, pode ser uma ferramenta útil para os pesquisadores que estão estudando a impressão 3D ou com materiais de construção de argamassa 3D, pois ela pode ajudar a organizar as informações e permitir uma fácil visualização dos materiais e quantidades necessárias para a preparação da argamassa. O Quadro 6 apresenta as principais propriedades desses materiais:

<b>Material</b>	<b>Propriedades</b>
Cinza volante	Melhora da trabalhabilidade- redução da segregação: a adição de cinza volante pode ajudar a reduzir a segregação dos componentes da argamassa, proporcionando uma mistura mais homogênea- aumento da resistência mecânica (MEURER; CLASSEN, 2021)
Sílica ativa	Aumento da resistência mecânica- melhoria da trabalhabilidade- redução da permeabilidade- aumento da durabilidade- controle da retração (CHEN <i>et al.</i> , 2018).
Pó de calcário	Aumenta resistência mecânica da argamassa- melhora trabalhabilidade, diminuição da permeabilidade e redução do calor de hidratação da argamassa (YAN <i>et al.</i> , 2018).
Areia	Granulometria adequada da areia é essencial para garantir a estabilidade e a homogeneidade da argamassa- trabalhabilidade (YAN <i>et al.</i> , 2018).

Escória de alto forno	Aumenta resistência mecânica- aumenta a durabilidade (GUO <i>et al.</i> , 2020).
Cimento	Resistência a compressão- Trabalhabilidade da argamassa- diminuiu a retração da argamassa- menor porosidade (ÖZKAN; ŞAHMARAN 2018).
Nanomateriais	Melhoria da trabalhabilidade e da estabilidade- redução da permeabilidade- aumento da durabilidade- melhoria da aderência- redução da retração- redução da porosidade e da absorção de água (KAZEMIANE; KHOSHNEVIS, 2021)
Água	Facilita a mistura- Aumenta a fluidez- aumenta a trabalhabilidade- influencia no desempenho da argamassa (ROUSSEL, 2018).

Quadro 6- Propriedade dos materiais

- Variações granulométricas, dimensões do bico de impressão e valores sugeridos de agregados, baseado no tamanho do bico da extrusora:

Referência	Granulometria do Agregado (mm)	Tamanho do Bico (mm)	Valores Sugeridos de agregado	
			Máximo (mm)	Mínimo (mm)
Figueiredo <i>et al.</i> (2019)	0,5	40x10	0,6	0,09
Meurer e Classen <i>et al.</i> (2021)	4	Ø 45	4	1
Lee <i>et al.</i> (2019a)	0,16- 0,2	Ø 25	0,20	0,03
Joh <i>et al.</i> (2020)	0,16- 0,2	Ø 40	0,30	0,03
Shakor <i>et al.</i> (2019)	0,3	Ø14, Ø20 e 35x10	0,35	0,2
Zahabizadeh <i>et al.</i> (2021)	1	60x12	0,5	0,08
Nerella <i>et al.</i> (2019)	0,06- 2	30x18,72	2,5	0,03
Ashraf <i>et al.</i> (2021)	1	Ø 24,5	0,80	0,20

Chen <i>et al.</i> (2021)	4,75- 20	55x55	30	4
Chen <i>et al.</i> (2020)	2	40x13,5	30	1

Tabela 8- Variações granulométricas e dimensões do bico de impressão

Para que a impressão 3D de argamassa seja bem-sucedida, é importante que os agregados sejam escolhidos com granulometria adequada ao tamanho do bico da impressora. Caso os agregados sejam muito grandes em relação ao bico da impressora, pode ocorrer obstrução do bico ou problemas de aderência do material na superfície impressa. Já se os agregados forem muito pequenos em relação ao bico, a mistura pode perder a sua resistência mecânica e se tornar mais frágil.

Dessa forma, a granulometria dos agregados deve ser escolhida levando em consideração o tamanho do bico da impressora 3D, de modo a garantir que os agregados sejam adequados para a extrusão da argamassa e para a formação da geometria desejada.

- Proporções de aditivos químicos na argamassa 3D:

Referência	Modificador de Viscosidade (%)	Acelerador de pega (%)	Retardador de pega (%)	Superplastificante (%)
Figueiredo <i>et al.</i> (2019)	0,35- 2,67	-	-	2,70- 9,98
Lee <i>et al.</i> (2019a)	0,29	-	-	1,43
Shakor <i>et al.</i> (2019)	-	0,67	0,53	0,67
Joh <i>et al.</i> (2020)	0,29	-	-	1,43
Shakor <i>et al.</i> (2020)	-	0,5- 0,6	0,53	-
Xiao <i>et al.</i> (2020)	-	0,0- 3,0	-	0,75- 0,83

Tabela 9- Proporções de aditivos químicos

As proporções dos aditivos químicos na argamassa 3D devem ser cuidadosamente avaliadas para garantir que o material tenha as propriedades adequadas para a impressão 3D. A escolha das proporções dos aditivos químicos deve ser baseada nas características

desejadas da argamassa, tais como a resistência mecânica, a trabalhabilidade, a retração, a porosidade, entre outras.

- Definição encontrada na literatura, sobre termos/parâmetros para a capacidade de impressão 3D:

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
Bombeabilidade	Capacidade de transporte da argamassa do armazenamento até a extrusora. Desse modo, a bombeabilidade deve assegurar a facilidade do transporte de forma que interrupção e segregação massa devem ser evitadas. (WENG et al., 2018)
Extrudabilidade	Refere-se a qualidade e facilidade de um material a ser extrudado de forma contínua, uniforme, suave e intacto através do bico da extrusora sem causar entupimento (HOU <i>et al.</i> , 2021)
Construtibilidade	Capacidade das camadas serem empilhadas sem que ocorram deformações verticais nas camadas inferiores (REHMAN; KIM, 2021)

Quadro 7- Definição de termos/parâmetros para a capacidade de impressão 3D

Os parâmetros de bombeabilidade, extrudabilidade e construtibilidade são importantes para garantir uma impressão 3D de argamassa eficiente e de qualidade.

- Equipamentos de testes para argamassa no estado fresco:

<b>Ensaio</b>	<b>Referência</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Outros Equipamentos</b>
Reologia	Moeini <i>et al.</i> (2020)	Reômetro Anton Paar MCR 302	
	Yuan <i>et al.</i> (2019)	Reômetro Rotacional	
	Panda <i>et al.</i> (2017)	Viskomat XL	

	Varela <i>et al.</i> (2021)	Reômetro modular	Reômetro Brookfield RST- SST	
	Abebe; Lohaus (2017)	Funil V		
	Weng <i>et al.</i> (2018)	Viskomat XL		
	Joh <i>et al.</i> (2020)	Reômetro (Brookfield DV- III)		Reômetro RheoCAD400
	Ma <i>et al.</i> (2018)	Funil V		
Fluidez	Lee <i>et al.</i> (2019a)	Mini cone	Cone de Abatimento	
	Ma <i>et al.</i> (2018)	Mesa de fluxo		
	Ji <i>et al.</i> (2019)	Mini cone		
	Rahul <i>et al.</i> (2019a)	Mesa de fluxo		
	Joh <i>et al.</i> (2020)	Mesa de fluxo		
	Ashrafi <i>et al.</i> (2021)	Mesa de fluxo		
Tempo de Pega	Shakor <i>et al.</i> (2019)	Vicat	-	
	Ashrafi <i>et al.</i> (2021)			
	Pott; Stephan, (2021)			
	Li <i>et al.</i> (2018)			
	Polat <i>et al.</i> (2017)			
	Sharma <i>et al.</i> (2020)			

Quadro 8- Equipamentos de testes

O Quadro 8 apresenta apenas alguns dos diversos equipamentos disponíveis para testar as propriedades da argamassa 3D no estado fresco. A escolha dos equipamentos deve levar em conta as propriedades específicas da argamassa a ser avaliada e os objetivos do teste.

- Resultados dos testes realizados em argamassa no estado fresco:

Aditivos	Referência	Viscosidade Plástica (Pa.s)	Tensão de Escoamento (Pa)	Tempo de Pega (Min)	Fluidez (mm)
	Lee <i>et al.</i> (2019a)	21	420	-	145
	Rahul <i>et al.</i> (2019a)	-	1.500- 2.500	Início: 142- 252 Final: 298- 476	-
	Joh <i>et al.</i> (2020)	19,6	413	-	148
	Zhang <i>et al.</i> (2019)	3,8- 4,5	178,5- 359,8	-	192,5- 269
Redutor de Água	Yuan <i>et al.</i> (2019)	5,8- 8,3	250- 590	Início: 15-60 Final: 60- 600	-

	Lee <i>et al.</i> (2019b)	141	670	Início: 424 Final: 602	160- 170
	Comminal <i>et al.</i> (2020)	6,9- 8,11	619- 652	-	-
	Shakor <i>et al.</i> (2019)	-	-	Início: 75- 85 Final: 90- 225	-
Ativador alcalino	Guo <i>et al.</i> (2020)	5,50- 8,80	6,76- 106,97	Início: 18- 151 Final: 30- 228	-
Calcário pulverizado-celulose-lima	Ashrafi <i>et al.</i> (2021)	-	-	Início: 75,3- 86 Final: 143	232,5

Tabela 10- Resultados dos testes no estado fresco

Os testes realizados em argamassa no estado fresco têm como objetivo avaliar propriedades como consistência, trabalhabilidade, estabilidade, fluidez e tempo de pega. Os resultados desses testes são importantes para avaliar a qualidade da argamassa no estado fresco e para ajustar as proporções dos materiais e aditivos, se necessário. Uma faixa sugerida com valores máximo e mínimo para uma casa popular, é apresentado na Tabela 11.

- Resultados dos testes realizados em argamassa no estado endurecido:

Reforço	Referência	Resistência à Compressão MPa	Resistência à Tração MPa	Resistência à Flexão MPa
Fibra de polipropileno	Zhang <i>et al.</i> (2021)	59		9,7
	Rahul <i>et al.</i> (2019b)	61	-	12
	Wolfs <i>et al.</i> (2019)	30	3,8	4,8
-	Lee <i>et al.</i> (2019a)	22,54	3	-
	Lee <i>et al.</i> (2019b)	44,58	3,77	
	Ma <i>et al.</i> (2020)	-	2,1	
	Panda <i>et al.</i> (2017)	36	1,42	9,80
	Zhang <i>et al.</i> (2019)	62		10,5
	Panda <i>et al.</i> (2018)	36	1,63	5,05
	Panda <i>et al.</i> (2019)	56	0,65	-
	Weng <i>et al.</i> (2018)	60	-	4,4
	Wi <i>et al.</i> (2021)	50	-	5,8
	Fibra de basalto	Ma <i>et al.</i> (2019)	39,6	5,26

Fibras metálicas	Joh <i>et al.</i> (2020)	31	4,5	18,5
Fibra híbrida de polipropileno	Daungwilailuk <i>et al.</i> (2021)	60	5	-

Tabela 11- Resultado de testes mecânicos apresentados por diversos autores

A realização de testes mecânicos na argamassa 3D é fundamental para avaliar a resistência, garantindo que a estrutura impressa possua as características necessárias para a sua aplicação, ajudando a garantir a qualidade da estrutura impressa. Uma faixa sugerida com valores máximo e mínimo para uma casa popular, é apresentado na Tabela 12.

#### **4.2. SEQUÊNCIA DE TESTES PARA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO**

Após levantamentos dos ensaios na argamassa ainda em estado fresco, propõe-se a sequência de testes apresentada na Figura 15. O fluxograma apresenta quatro testes organizados em um esquema para verificar as condições da mistura, antes de seguir a próxima sequência de testes, que correspondem ao de impressão 3D.

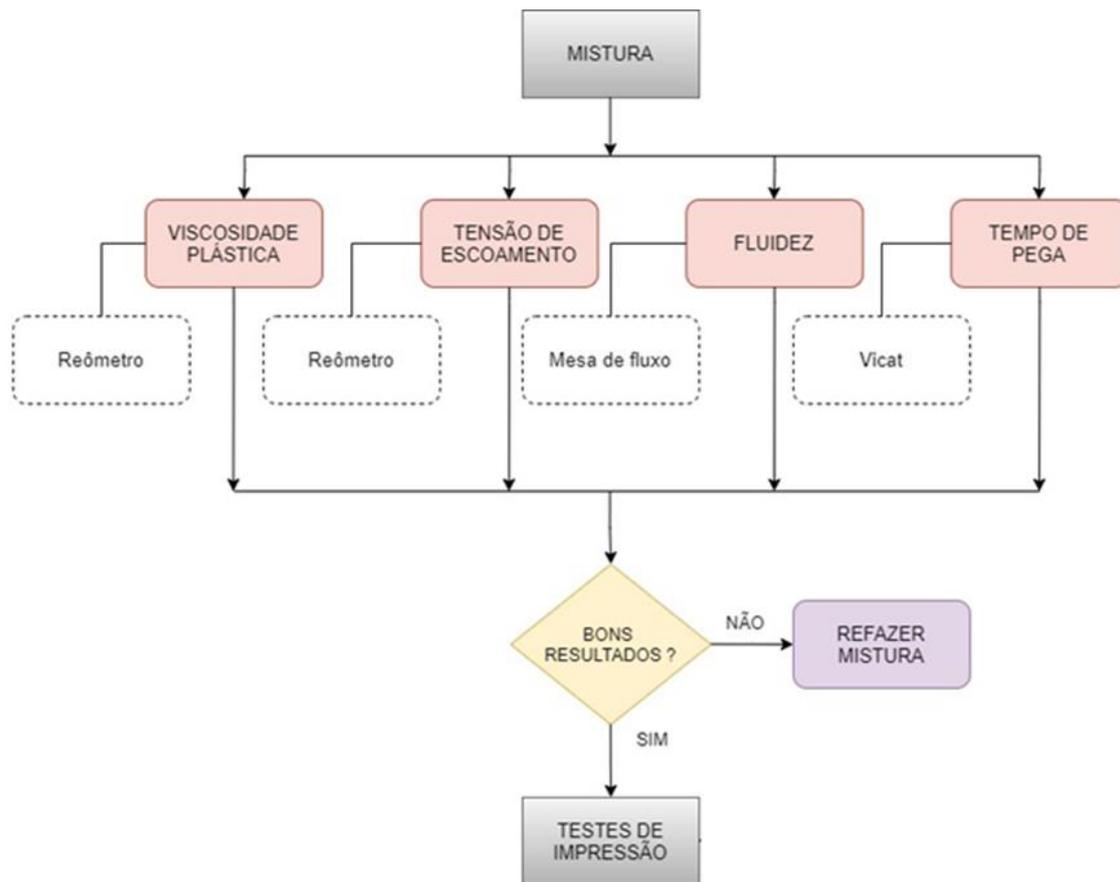


Figura 15- Esquema de testes iniciais para caracterização e estudo de uma argamassa 3D

Se para esses quatro ensaios não forem obtidos resultados satisfatórios de reologia e fluidez, considerando as faixas de valores necessárias para a aplicação (considerar a Tabela 4 - resultados dos testes no estado fresco), será necessário refazer o estudo dos parâmetros para argamassa no estado fresco e uma recomposição da argamassa. Isso consiste em um reestudo da composição granulométrica, da proporção de aditivos (plastificantes, acelerador ou retardador de pega, incorporadores de ar, etc), consumo de aglomerantes, proporção de água na mistura e proporção de adições minerais.

O equipamento sugerido para realização do teste de viscosidade e tensão de escoamento, é o reômetro, pois, ele é um equipamento importante na avaliação da reologia da

argamassa 3D, ele permite a comparação entre diferentes formulações de argamassa, o que pode auxiliar na escolha dos materiais mais adequados para cada aplicação.

Para o teste de fluidez é sugerido a mesa de fluxo, esse teste fornece informações importantes sobre a capacidade de fluxo da argamassa, a qual deve ser adequada para garantir uma boa extrusão na impressão 3D. A avaliação visual também é realizada para verificar a homogeneidade da argamassa e se ela apresenta segregação excessiva. Além disso, o teste de mesa de fluxo é relativamente rápido e de baixo custo, tornando-se uma ferramenta útil na avaliação da qualidade da argamassa 3D.

O teste do tempo de pega é sugerido a utilização do Vicat, porque ele permite verificar o momento em que a pasta de cimento atinge uma determinada consistência, que pode ser o início ou o fim do processo de pega. Esse tempo é importante para garantir a capacidade de manter a forma durante o processo de deposição e a aderência entre as camadas.

#### **4.3. SEQUÊNCIA DE TESTES PARA A RELAÇÃO ENTRE A ARGAMASSA E OS DISPOSITIVOS DE IMPRESSÃO 3D**

Os ensaios propostos para a determinação da capacidade de impressão estão organizados no esquema da Figura 16.

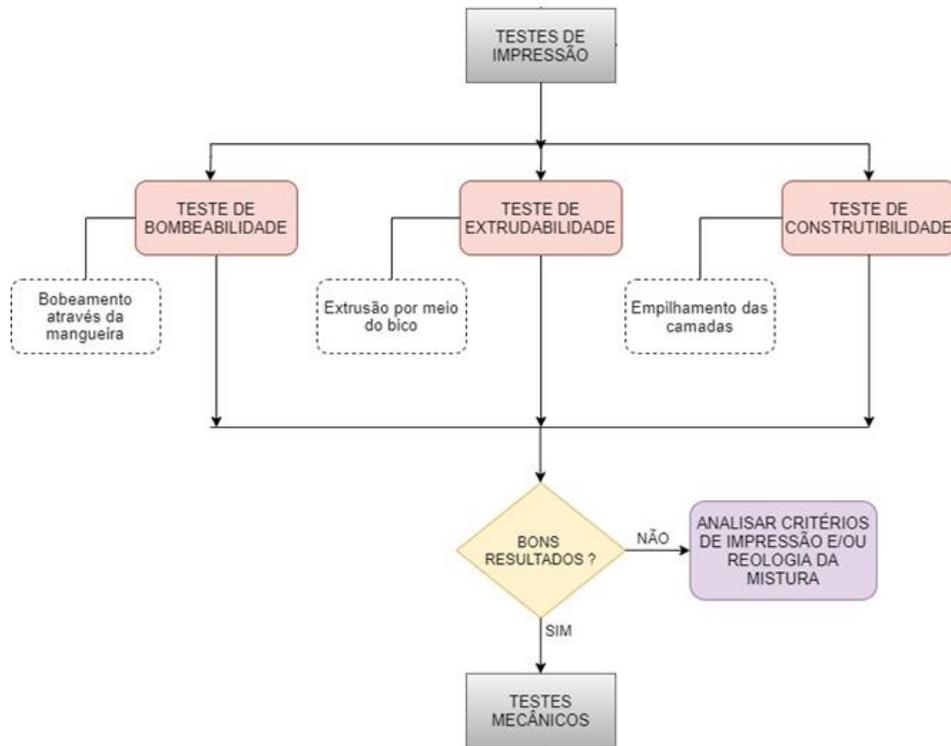


Figura 16- Esquema de Teste de impressão para uma argamassa 3D

Observa-se nesse esquema os testes necessários após a análise reológica, para certificar a capacidade da massa de passar pelo sistema de impressão 3D (MA *et al.*, 2018, ZOU *et al.*, 2021). Esse esquema ilustra os parâmetros que serão analisados antes de seguir para próxima sequência de testes (testes mecânicos), esses são: (1) Teste de bombeabilidade: Realizado por meio do bombeamento da argamassa na mangueira até o bico da impressora. (2) Teste de extrudabilidade: Extrusão da argamassa através do bico da impressora. (3) Teste de construtibilidade: Empilhamento das camadas sobre camadas, sem deformações.

Percebe-se que, se a argamassa for considerada aprovada nos testes de bombeabilidade, extrudabilidade e construtibilidade, isso significa que ela está apta a seguir para os testes mecânicos, caso a argamassa for considerada reprovada nessa etapa de testes, essa passará pela reavaliação da reologia e pelos critérios de impressão.

Parte dos critérios de impressão consistem na determinação da altura do bico e velocidade de extrusão (KAZEMIAN *et al.*, 2017; ZOU *et al.*, 2021). Shakor *et al.* (2019), demonstram em seus estudos que o formato do bico interfere na capacidade de impressão. Nesse estudo é indicado que as formas quadradas e retangulares suportam mais camadas do que os bicos de formato circular, utilizando a mesma proporção da mistura.

A velocidade de impressão entre as camadas deve ser minuciosamente analisada, pois, para garantir que cada filamento extrudado possua largura e espessura uniformes, a velocidade do deslocamento do bico deve ser compatível com velocidade de extrusão (JOH *et al.*, 2020).

#### **4.4. SEQUÊNCIA DE TESTES PARA ENSAIO MECÂNICO DA ARGAMASSA SECA APÓS A IMPRESSÃO 3D**

A próxima etapa de testes consiste nos ensaios mecânicos com a argamassa seca. A partir dos resultados obtidos nestes ensaios a durabilidade da edificação será validada. Amostras de argamassa deverão passar por esses três testes mecânicos e caso os resultados obtidos forem satisfatórios (esses resultados satisfatórios devem-se tomar como referência os resultados apresentados na Tabela 6) a mistura terá sido aprovada e estará apta para a edificação digital. Os testes propostos são apresentados no esquema da Figura 17.

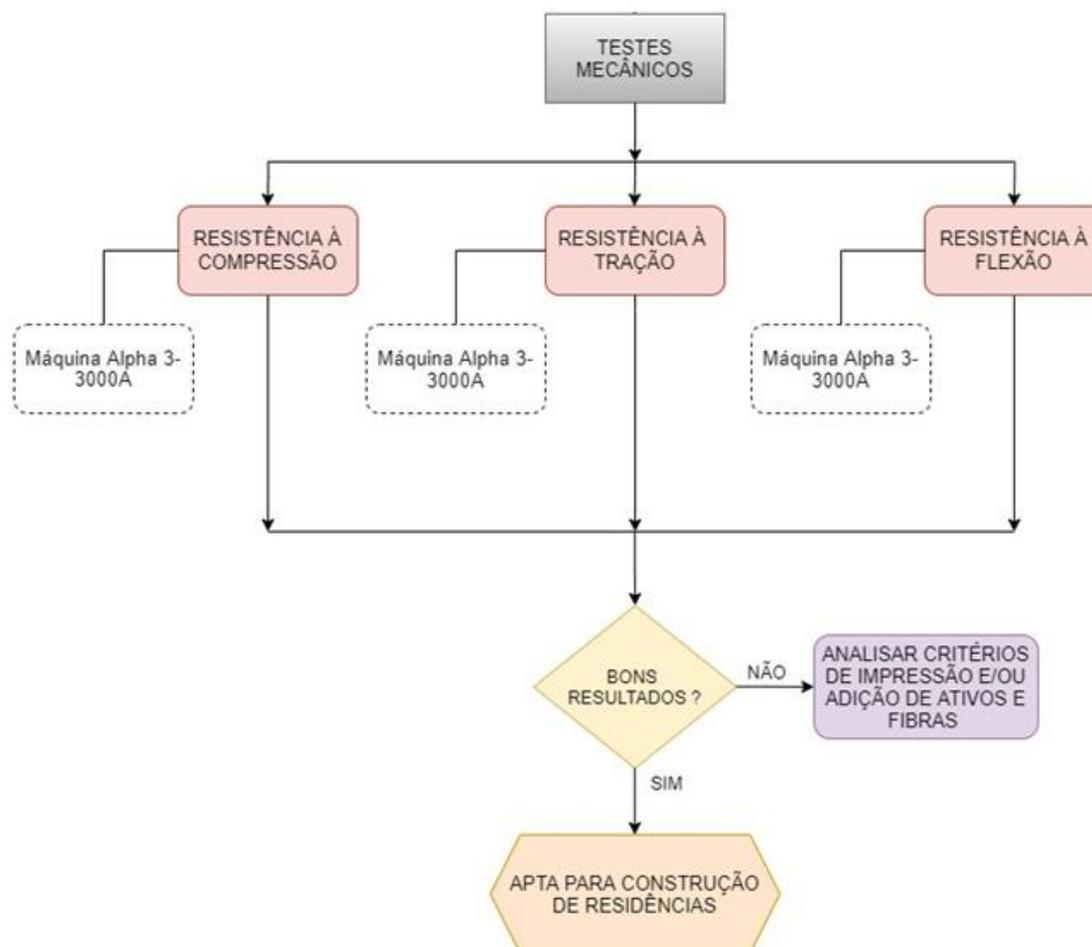


Figura 17- Esquema do fluxo de testes mecânicos para uma argamassa 3D

Esse esquema ilustra a última etapa da sequência de teste para a validação de uma argamassa segura e adequada para a construção 3D. Se os resultados forem negativos, ou seja, valores abaixo dos estimados pelas normas para ensaios em argamassa tradicionais, deve-se então analisar novamente critérios de impressão bem como toda a proporção do material.

Neste contexto, o intervalo de tempo é o fator que mais influencia nas propriedades mecânicas do material impresso, principalmente a resistência de união das camadas. Isso implica dizer que à medida que o intervalo de tempo aumenta, a resistência mecânica diminui, assim também como a aderência entre as camadas (WOLFS *et al.*, 2019).

Isso também foi atestado por Van Der Putten *et al.* (2019); esses autores avaliaram o resultado de duas velocidades de impressão (1,7 e 3 cm/s) perante a resistência de união das camadas e a resistência à compressão. Foi concluído que com o aumento da velocidade de impressão, houve redução tanto na aderência entre as camadas, quanto na resistência à compressão.

Os pesquisadores Wolfs *et al.* (2021) confirmam tal conclusão, ao avaliar o efeito do intervalo de tempo de 15 s, 1 h, 4 h, 7 h e 24 h sobre a resistência à flexão, então observaram que a resistência era reduzida à medida que o aumento do intervalo de tempo entre as camadas aumentava.

Reforços de fibras são frequentemente usados tanto em argamassa impressa como nas convencionais, e mostraram-se bastante úteis para a melhoria da ductilidade das amostras, aumentando sua resistência mecânica. A Figura 18 apresenta uma correlação nos resultados realizados em mistura com e sem reforço com fibra para as faixas de valores máximos e mínimos de resistência à flexão, resistência à compressão e resistência à tração.

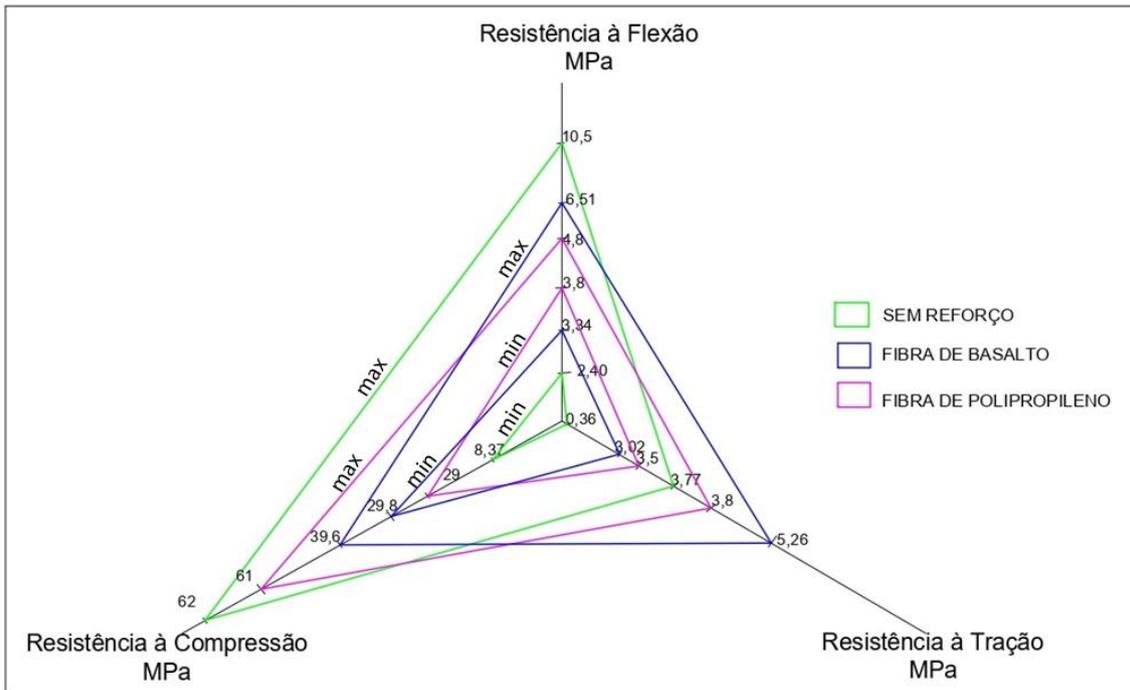


Figura 18- Gráfico de correlação: Ensaio mecânico

Pode-se observar que, a argamassa contendo reforço em sua composição, seja de basalto ou de fibra de polipropileno, elas possuem valores máximos de resistência à tração maiores do que a mistura sem reforço. Por outro lado, no que tange a resistência à compressão, bem como resistência à flexão, a mistura apresenta maior resistência sem a utilização de reforços.

É importante seguir a sequência de teste de forma hierárquica, visto que, as características preliminares desde a mistura da massa até a deposição das camadas afetam os parâmetros mecânicos do material. A Tabela 12, apresenta resultados considerados ideais de acordo com a literatura, para todos esses testes citados nesta dissertação:

Ensaio	Valor Sugerido	
	Máximo	Mínimo
Viscosidade Plástica	19,6 Pa.s	3,8 Pa.s

Reologia	Tensão de escoamento	652 Pa	619 Pa
Fluidez	Mesa de fluxo	269 mm	232,5 mm
	Tempo de pega	298 min	225 min
Tempo de pega			
	Bombeabilidade	Maior quando de argamassa bombeada até o bico sem ocasionar bloqueios.	
Teste de impressão			
	Extrudabilidade	Maior comprimento de filamentos sem deformação.	
	Construtibilidade	Máximo de 7 camadas empilhadas sem deformação.	
	Resistência a compressão	62 MPa	36 MPa
Resistência mecânica	Resistência a flexão	18,5 MPa	12 MPa
	Resistência a tração	5,26 MPa	3,8 MPa

Tabela 12- Resultado de testes proposto para a casa popular

Os valores ilustrados na Tabela 12, podem ser utilizados como base de sugestão de resultados de teste, durante a preparação da argamassa para impressão 3D.

Para a realização dos testes mecânicos, é sugerido o equipamento máquina Alpha 3-3000 A, por ser capaz de aplicar cargas de alta precisão e controlar a velocidade de deformação, permitindo uma avaliação mais precisa e confiável das propriedades mecânicas da argamassa 3D.

#### 4.5. MATRIZ DE DECISÃO PARA AJUSTES DA ARGAMASSA PARA IMPRESSÃO 3D E SEQUÊNCIA COMPLETA DE TESTES

A Tabela 13 apresenta os critérios de desempenho que a argamassa para impressora 3D deve atender, como: Resistência mecânica, capacidade de sustentação, fluidez, tempo de secagem e tempo de impressão. Para cada critério foi avaliado a importância que cada material tinha.

	<b>Resistência Mecânica (Peso 5)</b>	<b>Capacidade de sustentação (Peso 5)</b>	<b>Fluidez (Peso 5)</b>	<b>Tempo de secagem (Peso 3)</b>	<b>Tempo de impressão (Peso 3)</b>	<b>Pontuação</b>
Cimento	5	4	1	3	2	15
Areia	2	3	0	0	0	5
Cinza volante	3	2	3	0	0	8
Sílica ativa	3	0	3	1	0	7
Pó de escoria	5	5	0	4	2	16
Modificador de viscosidade	0	2	5	1	0	8
Retardador de pega	0	5	2	3	3	13
Superplastificante	4	3	5	3	2	17
Reforço de Fibras	5	2	0	0	0	7

Tabela 13- Matriz de decisão

Conclui-se que, o cimento, é um dos aglomerante mais importante e mais utilizado, tanto na argamassa 3D como na argamassa tradicional. O pó de escoria na mistura cimentícia não contribui com a fluidez, mas por outro lado aumenta significativamente a resistência mecânica.

A areia é um componente essencial da argamassa, que contribui para várias propriedades importantes, como trabalhabilidade, resistência mecânica e controle da porosidade. A escolha da areia adequada e sua dosagem correta são fatores críticos para garantir a qualidade da argamassa.

O retardador de pega, são ideais para a argamassa para impressão 3D na construção civil, em se tratando de uma construção de grande porte, como uma casa necessita que os materiais possuam alta resistência mecânica, capacidade de sustentação das camadas, assim como um tempo de secagem como o tempo de impressão prolongado, para que as camadas consigam manter a forma ao receberem as camadas subsequentes.

A matriz de decisão identifica que, o superplastificante é a composição mais importante para a argamassa 3D, porque pode ser utilizado para reduzir a viscosidade do material, facilitando sua extrusão através do bico da impressora. Além disso, o superplastificante pode ajudar a reduzir a quantidade de água necessária para a produção da argamassa, o que pode melhorar suas propriedades mecânicas e reduzir o tempo de secagem. Isso ocorre porque o esse aditivo permite que uma menor quantidade de água seja utilizada para manter a mesma trabalhabilidade da argamassa, o que resulta em uma mistura mais densa e resistente.

No entanto, é importante ressaltar que a dosagem correta do superplastificante na argamassa 3D é fundamental para obter os resultados desejados. O excesso de desse aditivo pode levar à segregação da mistura e à redução da resistência mecânica da argamassa.

Posto isso, percebe-se a utilidade que esta matriz de decisão pode oferecer durante a preparação da argamassa para impressão 3D, pode-se determinar a melhor composição para argamassa com base em critérios específicos de desempenho que o material impresso precise atingir.

Uma matriz de decisão pode ser uma ferramenta útil ao decidir a melhor composição da argamassa 3D, pois ela ajuda a organizar as informações e a visualizar as vantagens e desvantagens de cada opção, permitindo que a pessoa ou equipe que está tomando a decisão considere todos os critérios relevantes de forma equilibrada, objetiva, sistemática e que nenhuma opção seja escolhida com base em um único critério.

Após todo o levantamento dos ensaios, pode-se verificar na Figura 19 a sequência completa proposta em cada etapa de ensaios.

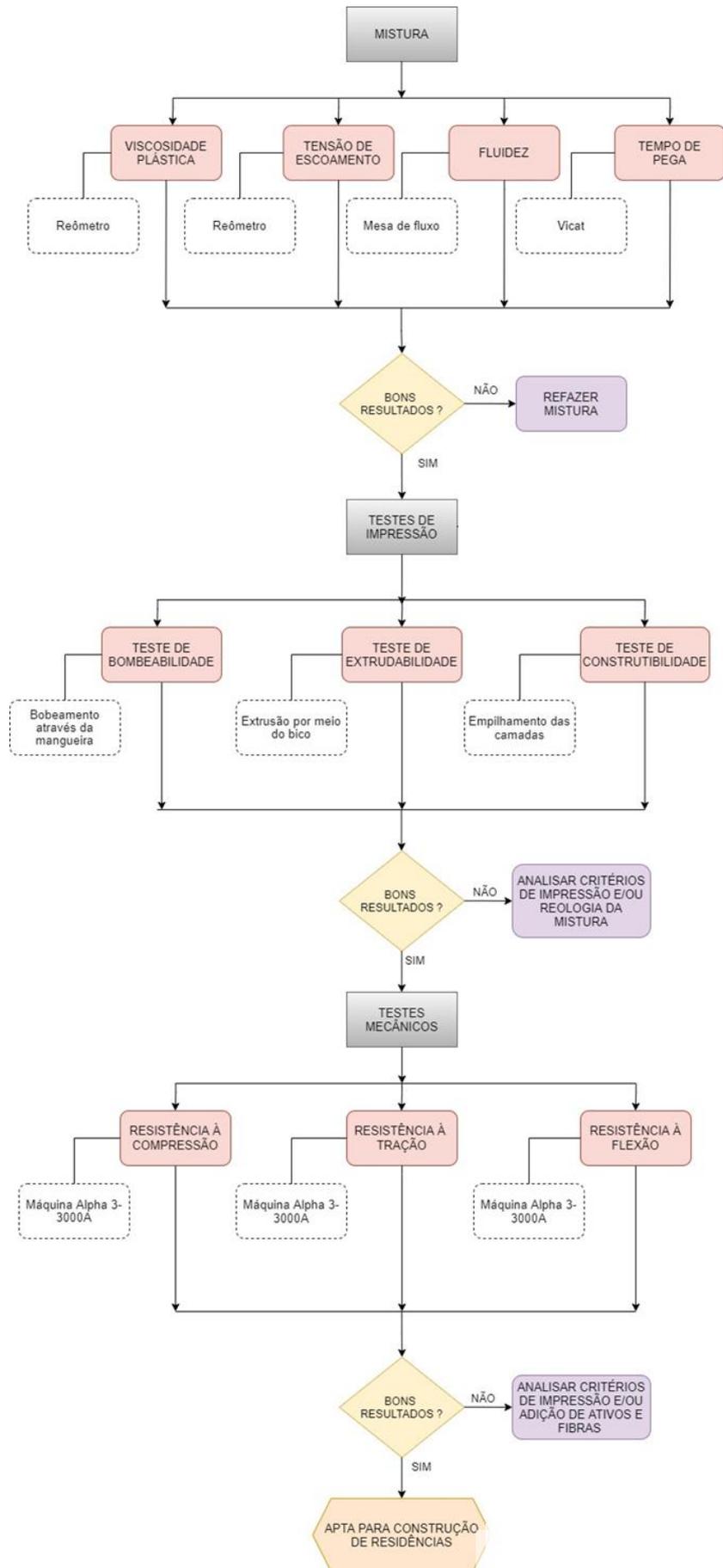


Figura 19- Esquema do fluxo de testes para uma argamassa 3D

Essa sequência de testes foi escolhida por se tratar de ensaios mais realizados por pesquisadores tanto em corpo de prova para argamassa comum, quanto para argamassas utilizadas na manufatura aditiva. Os resultados estão diretamente ligados à estabilidade estrutural e segurança, e esses testes são capazes de indicar eventuais variações da qualidade da argamassa, seja com relação trabalhabilidade, quanto a resistência, a durabilidade da argamassa depende do desempenho da mistura e do ambiente no qual será exposta.

#### **4.6. SIMULAÇÃO - DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO DE UMA RESIDÊNCIA IMPRESSA 3D**

Visando entender os parâmetros da construção 3D de uma casa de 35,53 m<sup>2</sup>, a princípio foi elaborado uma planta baixa em 2D da casa, conforme ilustrado na Figura 20. As dimensões de uma casa impressa precisam de modificações se comparadas como método convencional, pois mesmo necessitam de uma largura da parede maior, para que sejam inseridos reforços metálicos entre uma fila de camada e outra. Foi considerado nesse estudo de caso a largura de parede de aproximadamente 18 cm, com o intuito de garantir o reforço utilizando treliças metálicas entre os vãos, e assim, conseguir atingir uma resistência mecânica mínima para uma residência de 25 MPa, conforme determinado pela norma NBR 7215/2016 (GASPARETTO *et al.*, 2020).

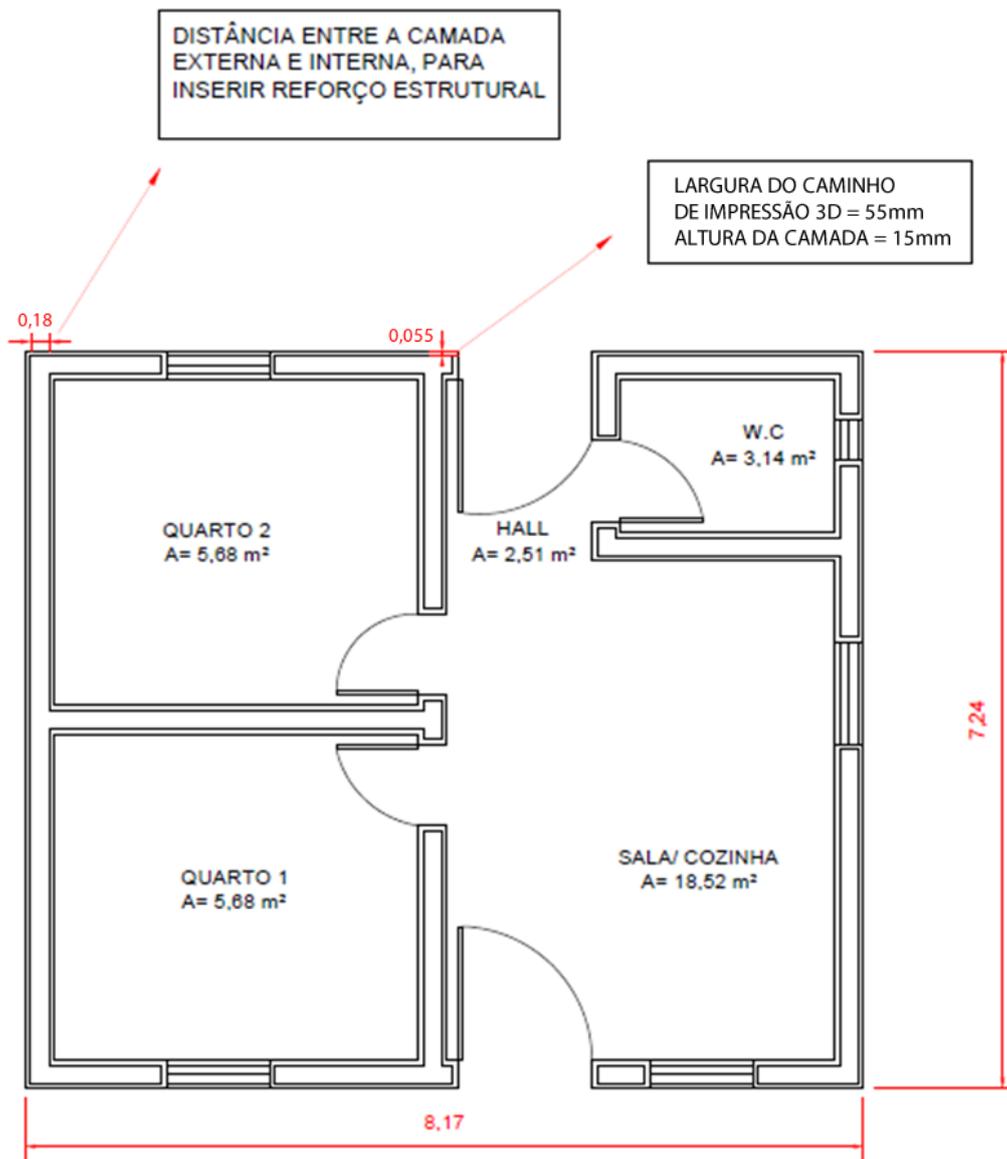


Figura 20- Planta baixa da casa de 35,53 m<sup>2</sup>

Considerando que se trata de uma impressão de grande porte, para esse projeto foi considerado um bico de 55x55 mm, o mesmo utilizado por Chen *et al.* (2021).

Para a planta baixa, foi medido o comprimento das camadas, para em seguida calcular a velocidade de impressão. A velocidade escolhida para o planejamento dessa impressão, foi a mesma utilizada por Chen *et al.* (2021) 5 cm/s.

Para uma quantidade máxima de camadas impressas sem deformação, será utilizado nesse planejamento o resultado obtido por Arunothayan *et al.* (2019), que conseguiram imprimir 7 camadas sem desmoronar.

Para construção 3D em grande escala, precisa de um tempo de pega que não seja muito grande, ao ponto de não haver a junção entre as camadas, e nem muito curto a ponto de não trazer uma rigidez para as camadas, e conseqüentemente conseguir sustentar as demais camadas. Dessa maneira, optou-se pelo tempo de pega alcançado por Shakor *et al.* (2019) de 225 minutos, ou seja, 3,75 horas.

Dessa forma, considerou-se a impressão de 7 camadas e o tempo de cura de 3,75 horas (3h45min) para a próxima impressão de mais 7 camadas. Considerou-se a repetição do processo até a conclusão da altura do pé direito de 2,70 metros. Considerou-se a velocidade de impressão publicada por Chen *et al.* (2021) de 5 cm/s. O comprimento do caminho que o bico da impressora precisa percorrer para cobrir uma camada, no estudo de caso em questão, é de 8.395 cm (ou 83,95 m). Para imprimir 1 camada é necessário o tempo de 1.679 segundos (aproximadamente 28 minutos), portanto, as 7 camadas levarão o tempo de aproximadamente 3 horas e 15 minutos.

A altura da camada é definida pela altura do bico. Foi considerada a altura adotada por Arunothayan *et al.* (2020), de 15mm. Esse valor foi considerado pois quanto menor a altura do bico, maior será a aderência entre as camadas (PANDA *et al.*, 2018). Portanto, 7 camadas apresentam a altura de 10,5 cm ou 0,105 m. Uma parede com pé direito de 2,70 m precisará de 146 camadas.

Considerando o tempo de 3h15min para imprimir 7 camadas e o tempo de cura de 3h45 para essas camadas, é possível considerar 3 possibilidades de cenário de trabalho.

a) Cenário 1: Considerando uma jornada de trabalho iniciando as 7h da manhã, com 1 trabalho de impressão 3D das 7h às 10h15, intervalo de cura até 14h e trabalho de impressão 3D até as 17h15, com retorno das atividades apenas no dia seguinte. Neste cenário seria impresso 21cm de altura de parede por dia, necessitando de 12 dias para atingir 2,7m.

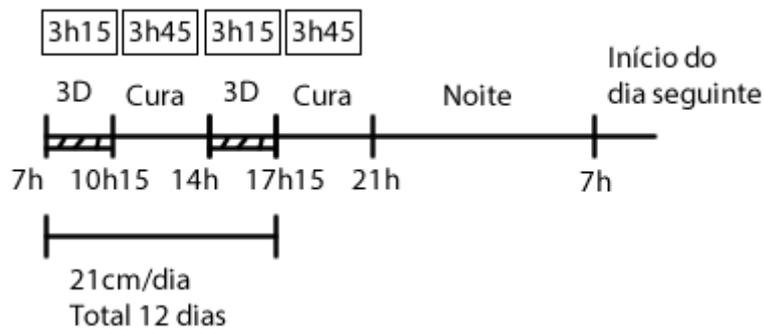


Figura 21 – Diagrama de tempo para o cenário 1

b) Cenário 2: Considerando uma jornada de trabalho iniciando as 7h da manhã, com 1 trabalho de impressão 3D das 7h às 10h15, intervalo de cura até 14h, trabalho de impressão 3D até as 17h15, intervalo de cura até 21h e trabalho de impressão 3D até as 1h15 do dia seguinte (de madrugada), com retorno das atividades apenas as 7h da manhã novamente. Neste cenário seriam levantados 31,5cm de parede por dia, necessitando de 8,5 dias para completar os 2,7m de pé direito.

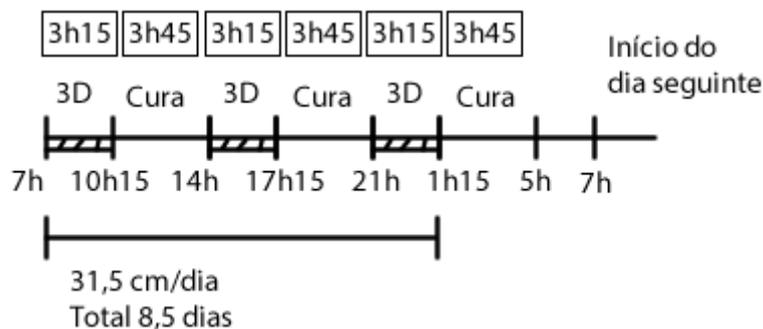


Figura 22 - Diagrama de tempo para o cenário 2

c) Cenário 3: Considerando um trabalho de impressão 3D seguido de tempo de cura de forma contínua, sem intervalo de descanso noturno, seriam necessários 25 turnos de trabalho de impressão 3D. Desconsiderando o intervalo final de cura das últimas 7 camadas, seria necessário 171,25h de trabalho, ou 7 dias 3h7min.

Foi considerado para o cálculo destes 3 cenários uma quantidade de 7 de camadas por vez, que pode ser considerada conservadora. Contudo, foi dado o tempo de cura de apenas 3h45min para a deposição das próximas, o que deixa o cálculo já não tão conservador pois este tempo não é suficiente para a cura completa. É possível que mais de 7 camadas sejam depositadas durante cada trabalho de impressão 3D, contudo, será necessário expandir o tempo de cura para a adição das próximas. Para a definição precisa dos diversos cenários possíveis é necessário a realização de testes de laboratório.

Vale ressaltar que, nesses cálculos não estão sendo considerados o tempo de mistura da argamassa, colocação de esquadrias e telhados. De forma mais didática, a Tabela 14 apresenta os resultados obtidos nesse estudo de caso:

<b>Característica da Impressora</b>	<b>Resultado previsto de Impressão</b>	
Tamanho do bico: 55x55 mm	Comprimento de uma camada	8.395 cm
	Altura das camadas	15 mm
Altura do bico: 15 mm	Quantidade de camadas impressas	180
	Tempo de impressão por camada	28 min
Velocidade de impressão: 5cm/s	Tempo de impressão das 180 camadas	171,25h
	Tempo de impressão de 7 camadas	3h15min
	Tempo de cura para 7 camadas	3h45min

Tabela 14- Resultado do estudo de caso

Um ponto importante na manufatura aditiva é a rapidez com que uma casa é construída, com menor desperdício possível de materiais e matéria prima. Dito isso, a partir desses resultados e considerando o intervalo de 2 semanas para a impressão das paredes da casa, é possível desenvolver o planejamento do cronograma da construção completa de uma casa popular (Quadro 9):

Descrição	Cronograma- Casa impressa 3D (Turno diurno)											
	JANEIRO				FEVEREIRO				MARÇO			
	1°	2°	3°	4°	1°	2°	3°	4°	1°	2°	3°	4°
Serviços preliminares	■											
Fundações		■	■									
Impressão das camadas				■	■							
Cobertura						■						
Esquadrias						■						
Impermeabilização						■						
Revestimento						■						
Revestimento de Piso							■	■				
Pintura										■	■	
Vidros										■	■	
Instalações Elétricas							■	■				
Instalações Hidráulicas							■	■				
Instalações Sanitárias							■	■				
Instalações P/ água pluvial							■	■				
Louças											■	
Serviços complementares												■

Quadro 9- Cronograma – Casa impressa

O planejamento do cronograma de uma obra é uma das etapas mais importantes, pois considera o investimento e a quantidade de mão de obra que será necessária. Foi estimado

que utilizando a impressão 3D seriam necessários 3 meses para construir a obra completa, considerando o tempo diurno de trabalho.

## **5. CONCLUSÕES**

A construção digital tem sido um tema de vastas pesquisas e estudos encontrados na literatura em razão desse método apresentar diversas vantagens em relação ao sistema convencional de produção. Essa tecnologia mostra-se como mais uma opção para tornar as empresas do ramo da construção civil mais competitivas.

A versatilidade de design e a eficiência do projeto se apresentam como uma alternativa interessante nesse processo. No entanto, a sua aplicação ainda carece de muitos estudos e desenvolvimento, pelas particularidades dos materiais, pelos aspectos mecânicos de extrusão e bombeamento, e pelas características ambientais exigidas para a execução dos sistemas impressos.

Os ensaios reológicos, mecânicos e os ensaios adicionais apresentados na sequência de teste neste trabalho, encontrados na literatura, demonstram que é necessário rever os requisitos de desempenho da Impressão 3D para a construção, pois, se trata de um método diferente do convencional e requer uma mistura que possa ser extrudada e que seja capaz de sustentar o peso das camadas frescas.

Atualmente não há trabalhos que citam todos os resultados dos ensaios da sequência de testes, pois essa é justamente uma proposta desta pesquisa. Os dados da literatura têm sido parciais nesse quesito até então.

A compilação de dados realizada e a proposta fornecida facilita futuros trabalhos na área. Dessa forma, esse trabalho pode ser utilizado como sugestão para padronização dos métodos de ensaios e aperfeiçoar os parâmetros da pasta fresca e endurecida.

A faixa de valores e procedimentos aplicado no estudo de caso, proporcionam uma visão direta do que deve ser obtido a nível de parâmetros de argamassa, tempos de impressão e configuração da máquina para um possível caso futuramente mais recorrente da aplicação (uma casa popular).

As características reológicas e mecânicas da argamassa baseada em ensaios são os principais desafios para se implementar a execução de uma residência impressa em 3D. Atualmente não existem procedimentos e métodos normatizados para qualificar a capacidade de construção da impressão ao longo do tempo. Os ensaios realizados são baseados nos ensaios convencionais, que até então tem mostrado que garantem a qualidade e segurança, mas é necessário à validação para assegurar que a construção impressa tenha segurança e vida útil a longo prazo e que venha atender todos os critérios de desempenho.

A elaboração do projeto do estudo de caso de impressão 3D de uma casa de 35,53 m<sup>2</sup>, apresentou os seguintes resultados:

- Dimensão do bico para o projeto de 55x55 mm;
- Altura do bico 15 mm;
- Velocidade de impressão 5 cm/s;
- 7 camadas para serem impressas sem deformar em cada sequência de impressão;
- São impressas 180 camadas para concluir uma parede com pé direito de 2,70 m;
- Em um dia podem ser impressas de 7 até 21 camadas, pois é preciso considerar o tempo de pega de 3,75 horas (3 horas e 45 minutos) entre cada sequência de impressão.

Para a simulação, conclui-se que levará aproximadamente duas semanas para serem impressas as camadas até atingir o pé direito de 2,70 m, e três meses para construir a casa completa.

A norma ABNT NBR 15575 apresenta os requisitos de desempenho, que são as condições que indicam de forma qualitativa os atributos que a edificação habitacional e seus sistemas devem apresentar para que atendam aos requisitos dos usuários. Para conseguir atingir estes requisitos, a ABNT NBR 15575 apresenta quais critérios de desempenho são aplicáveis, critérios estes que são especificações quantitativas, mensuráveis, apresentados em termos numéricos, com o propósito de serem medidos de forma objetiva.

Para a construção impressa em 3D, é necessário a elaboração de uma norma que siga os mesmos preceitos da norma de desempenho NBR 15575, pois essa ajudará a determinar requisitos como:

- Ensaio Acústico: Para verificar se esse novo método construtivo apresentará oferecerem as atenuações aceitáveis;
- Ensaio Térmico: Para medir a diferença de temperatura interna e externa, assegurar conforto aos moradores;
- Lumínico: Essa medição é feita para certificar o desempenho lumínico dos ambientes de uma construção habitacional, de acordo com o Fator de Luz Diurna (FLD);
- Estanqueidade: É um teste que é feito para checar se há ou não, a existência de um vazamento de gás na tubulação residencial ou comercial. Por meio da pressurização da tubulação com ar comprimido, o técnico analisa se, durante um período de tempo, ocorre a perda de pressão;
- Durabilidade e manutenibilidade: Realizado por meio dos ensaios de resistência à umidade de áreas molhadas e molháveis em piso e por meio de ensaio no qual atestem a ação de calor e choque térmico em vedações;
- Conforto Tátil e antropodinâmico: Para o conforto tátil, são estabelecidos critérios de desempenho recomendando a forma e limitando a força necessária para

acionamento de trincos, torneiras e outros dispositivos, levando em consideração princípios de ergonomia, estatura média das pessoas e a força física passível de ser aplicada por um adulto e crianças.

Para o conforto antropodinâmico, são determinados limites quanto à deformabilidade de pisos, declividade de rampas, velocidade de elevadores, entre outros.

## **6. TRABALHOS FUTUROS**

Neste trabalho foram demonstradas uma sequência de testes baseado na literatura e no raciocínio lógico. Assim também um planejamento de impressão 3D de uma casa popular.

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam realizados:

- Os testes em laboratório, seguindo a sequência proposta;
- E a execução da impressão de uma casa pequena como a do projeto proposto de 35,53 m<sup>2</sup>.

## REFERÊNCIAS

ABEBE, Y. A.; LOHAUS, L. Rheological characterization of the structural breakdown process to analyze the stability of flowable mortars under vibration. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 517-525, 2017.

ABNT. Normalização/Participar-da-elaboração. Página inicial. Disponível em: <<https://www.abnt.org.br/normalizacao/participar-da-elaboracao/>>. Acesso em: 09 de set. de 2022.

ALONSO, M., Gismera, S., Blanco, M., & Lanzón, M. P. Alkali-activated mortars: Workability and rheological behaviour. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 576-587, 2017.

ARUNOTHAYAN, A. R., Nematollahi, B., Ranade, R., Bong, S. H., & Sanjayan, J. A. R. et al. Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119546, 2020.

ASHRAFI, N., Nazarian, S., Meisel, N. A., & Duarte, J. P. Experimental prediction of material deformation in large-scale additive manufacturing of concrete. **Additive Manufacturing**, v. 37, p. 101656, 2021.

BUSWELL, R., de Silva, W. L., Jones, S., & Dirrenberger, J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 37-49, 2018.

CHEN, Y., Zhang, K. J., Rodriguez, C. R., Gan, Y., Çopuroğlu, O., & Schlangen, E. Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120094, 2020.

CHEN, Y., Zhang, Y., Pang, B., Liu, Z., & Liu, G. Extrusion-based 3D printing concrete with coarse aggregate: Printability and direction-dependent mechanical performance. **Construction and Building Materials**, v. 296, p. 123624, 2021.

CHEN, Y., Figueiredo, S. C., Yalçinkaya, Ç., Çopuroğlu, O., Veer, F., & Schlangen, E. The effect of viscosity-modifying admixture on the extrudability of limestone and calcined clay-based cementitious material for extrusion-based 3D concrete printing. **Materials**, v. 12, p. 1379, 2019.

CHOUGAN, M., Ghaffar, S. H., Sikora, P., Chung, S.-Y., Rucinska, T., Stephan, D., Swash, M. R.. Investigation of additive incorporation on rheological, microstructural and

mechanical properties of 3D printable alkali-activated materials. **Materials & Design**, v. 202, p. 109574, 2021.

COMMINAL, R., Da Silva, W., Andersen, T., Stang, H., & Spangenberg, J. Modelling of 3D concrete printing based on computational fluid dynamics. **Cem. Concr. Res.**, v. 138, p. 106256, 2020.

CRAVEIRO, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. **Automation in Construction**, v. 4, n. 6, p. 251-267, 2019.

DAUNGWILAILUK, T.; PHEINSUSOM, P.; PANSUK, W. Uniaxial load testing of large-scale 3D-printed concrete wall and finite-element model analysis. **Construction and Building Materials**, v. 275, p. 122039, 2021.

**DOCEOBRAS CASA E CONSTRUÇÃO.ORG**. Planta MINHA CASA MINHA VIDA (2022). Disponível em: < <https://casaconstrucao.org/projetos/planta-minha-casa-minha-vida/>>. Acesso em: 05 de nov. de 2022

DRESSLER, I.; FREUD, N.; LOWKE, D. The effect of accelerator dosage on fresh concrete properties and on interlayer strength in shotcrete 3D printing. **Materials**, v. 13, p. 374, 2020.

DUDA, P. L. S. P. Estudo comparativo entre nano e micropartículas como agentes tixotrópicos em pastas de cimento para impressão 3D. **manografia- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**, 2020.

EL-SAYEGH, S.; ROMDHANE, L.; MANJIKIAN, S. A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. **Archiv.Civ.Mech.Eng**, v. 20, p. 34, 2020.

FENG, P., Meng, X., Chen, J.-F., & Ye, L. Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders. **Constr. Build. Mater.**, v. 93, p. 486-497, 2015.

Figueiredo Stefan Chaves; Rodríguez, Claudia Romero; Ahmed, Zeeshan Y.; Bos, D.H.; Xu, Yading; Salet, Theo M.; Çopuroğlu, Oğuzhan; Schlangen, Erik; Bos, Freek P. An approach to develop printable strain hardening cementitious composites. **Materials & Design**, v. 169, p. 107651, 2019.

GARCÍA-CUADRADO, J., A., R., Cuesta, I., Calderón, V., & Gutiérrez-González, S. Study and analysis by means of surface response to fracture behavior in lime-cement mortars fabricated with steelmaking slags. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 204-213, 2017.

GUO, X.; YANG, J.; XIONG, G. Influence of supplementary cementitious materials on rheological properties of 3D printed fly ash based geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103820, 2020.

HANG, Y., Zhang, Y., Yang, L., Liu, G., Chen, Y., Yu, S., & Du, H. Hardened properties and durability of large-scale 3D printed cement-based materials. **Materials and Structures**, v. 54, p. 1-14, 2021.

HOSSEINI, E., Zakertabrizi, M., Korayem, A. H., & Xu, G. A novel method to enhance the interlayer bonding of 3D printing concrete: An experimental and computational investigation. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, p. 112-119, 2019.

HOU, S., Duan, Z., Xiao, J., & Ye, J. A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121745, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **General principles on the Design of Structures for Durability**, ISO 13823. Geneva: ISO/TC. 2008.

JAYATHILAKAGE, R.; SANJAYAN, J.; RAJEEV, P. Direct shear test for the assessment of rheological parameters of concrete for 3D printing applications. **Materials and Structures**, Vol. 52, p. 1-13, 2019.

JIAO, D., Shi, C., Yuan, Q., An, X., Liu, Y., & Li, H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. **Cement and concrete composites**, v. 83, p. 146-159, 2017.

JIN, X., Hou, C., Fan, X., Lu, C., Yang, H., Shu, X., & Wang, Z. Quasi-static and dynamic experimental studies on the tensile strength and failure pattern of concrete and mortar discs. **Sci. Rep.**, 2017, 7, 1-15.

JOH, C., Lee, J., Bui, T. Q., Park, J., & Yang, I.-H. C. Buildability and mechanical properties of 3D printed concrete. **Materials**, v. 13, p. 4919, 2020.

KAZEMIAN, A.; Yuan, Xiao; Cochran, Evan; Khoshnevis, Behrokh. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 639-647, 2017.

KAZEMIAN, A.; KHOSHNEVIS, B. Real-time extrusion quality monitoring techniques for construction 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124520, 2021.

KRUGER, J.; DU PLESSIS, A.; VAN ZIJL, G. An investigation into the porosity of extrusion-based 3D printed concrete. **Additive Manufacturing**, v. 37, p. 101740, 2021.

KUMAR, G. S. Influence of fluidity on mechanical and permeation performances of recycled aggregate mortar. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 404-412, 2019.

LEE, H., Kim, J.-H. J., Moon, J.-H., Kim, W.-w., & Seo, E.-A. Correlation between pore characteristics and tensile bond strength of additive manufactured mortar using X-ray computed tomography. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 712-720, 2019b.

LEE, H., Kim, J.-H. J., Moon, J.-H., Kim, W.-W., & Seo, E.-A.. Evaluation of the mechanical properties of a 3D-printed mortar. **Materials**, v. 12, p. 4104, 2019a.

LI, L.; WANG, R.; LU, Q. Influence of polymer latex on the setting time, mechanical properties and durability of calcium sulfoaluminate cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 911-922, 2018.

LI, L., Wang, R., & Lu, Q. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 35, p. 242-269, 2019.

LIN, A., Tan, Y. K., Wang, C.-H., Kua, H. W., & Taylor, H. Utilization of waste materials in a novel mortar–polymer laminar composite to be applied in construction 3D-printing. **Composite Structures**, v. 253, p. 112764, 2020.

LIU, Z., Li, M., Weng, Y., Wong, T. N., & Tan, M. J. Mixture Design Approach to optimize the rheological properties of the material used in 3D cementitious material printing. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 245-255, 2019.

LOPES, G. T. P. Exploração das possibilidades da impressão 3D na construção. **dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**, 2016.

MA, G., Li, Z., Wang, L., Wang, F., & Sanjayan, J.. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. **Constr. Build. Mater.**, v. 202, p. 770-783, 2019.

MA, G.; LI, Z.; WANG, L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. **Construction and building materials**, v. 162, p. 613-627, 2018.

MA, G.; SALMAN, N. M.; WANG, L. W. F. A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing. **Construction and building materials**, 2020, 244, 118305.

MECHTCHERINE, V., Nerella, V. N., Will, F., Mathias, N., Otto, J., & Krause, M. Large-scale digital concrete construction—CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. **Automation in Construction**, v. 107, p. 102933, p. 102933, 2019.

MELO, K. C. Avaliação e modelagem reológica de fluidos de perfuração base água. **Dissertação de Mestrado, Univ. Fed. do Rio Gd. do Norte**, 2008.

MEURER, M.; CLASSEN, M. Mechanical properties of hardened 3D printed concretes and mortars—Development of a consistent experimental characterization strategy. **Materials**, v. 14, p. 752, 2021.

MOEINI, M. A.; HOSSEINPOOR, M.; YAHIA, A. 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.

MOHAN, M. K., Rahul, A., De Schutter, G., & Tittelboom, K. V. Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review. **Cement and Concrete Composites**, v. 115, p. 103855, 2021.

NERELLA, V. N.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 586-601, 2019.

NERELLA, V. N.; KRAUSE, M.; MECHTCHERINE, V. Direct printing test for buildability of 3D-printable concrete considering economic viability. **Automation in Construction**, v. 109, p. 102986, 2020.

PANDA, B., Paul, S. C., Hui, L. J., Tay, Y. W., & Tan, M. J. Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. **Journal of cleaner production**, v. 167, p. 281-288, 2017.

PANDA, B., Paul, S., Mohamed, N., Tay, Y. W., & Tan, M. . Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar. **Measurement**, v. 113, p. 108-116, 2018.

PANDA, B., Mohamed, N., Paul, S., Singh, G. B., Tan, M., & Savija, B. The effect of material fresh properties and process parameters on buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete. **Materials**, v. 12, p. 2149, 2019.

PANDA, B.; UNLUER, C.; TAN, M. J. Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 94, p. 307-314, 2018.

PAUL, S. C., G., G. P., Zijl, v., Jen, T. M., & Gibson, I. A review of 3D concrete printing systems and materials properties: Current status and future research prospects. **Rapid Prototyping Journal**, 2018.

PELÀ, L.; KASIOUMI, K.; ROCA, P. Experimental evaluation of the shear strength of aerial lime mortar brickwork by standard tests on triplets and non-standard tests on core samples. **Eng. Struct.**, v. 136, p. 441-453, 2017.

PERROT, A.; RANGEARD, D.; PIERRE, A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. **Materials and Structures**, Vol. 49, p. 1213-1220, 2016.

POLAT, R.; DEMIRBOĞA, R.; KARAGÖL, F. The effect of nano-MgO on the setting time, autogenous shrinkage, microstructure and mechanical properties of high performance cement paste and mortar. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 208-218, 2017.

POTT, U.; STEPHAN, D. Penetration test as a fast method to determine yield stress and structural build-up for 3D printing of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 121, p. 104066, 2021.

QIAN, Y.; DE SCHUTTER, G. Different effects of NSF and PCE superplasticizer on adsorption, dynamic yield stress and thixotropy of cement pastes. **Materials**, v. 11, p. 695, 2018.

RAHUL, A., Santhanam, M., Meena, H., & Ghani, Z. 3D printable concrete: Mixture design and test methods. **Cement and Concrete Composites**, v. 97, p. 13-23, 2019a.

RAHUL, A., Santhanam, M., Meena, H., & Ghani, Z. Mechanical characterization of 3D printable concrete. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116710, 2019b.

REHMAN, A. U.; KIM, J.-H. 3D concrete printing: A systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics. **Materials**, v. 14, p. 3800, 2021.

REITER, L., Wangler, T., Anton, A., & Flatt, R. J. Setting on demand for digital concrete—principles, measurements, chemistry, validation. **Cement and Concrete Research**, v. 132, p. 106047, 2020.

ROUSSEL, N. Rheological requirements for printable concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 76-85, 2018.

SALET, T. A. M; Ahmed, Zeeshan Y.; Bos, Freek P.; Laagland, Hans L. M.. Design of a 3D printed concrete bridge by testing. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 13, n. 3, p. 222–236, 2018

SENEFF, L. M., Tobaldi, D. A., Hotza, D., Ferreira, V., & Labrincha, J. The influence of TiO<sub>2</sub> nanoparticles and polyacrylonitrile fibers on the rheological behavior and hardened properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 315-330, 2015.

SEPASGOZAR, S. M., Shi, A., Yang, L., Shirowzhan, S., & Edwards, D. J. Additive manufacturing applications for industry 4.0: A systematic critical review. **Buildings**, v. 10, p. 231, 2020.

SHAKOR, P., Nejadi, S., & Paul, G. Effects of deposition velocity in the presence/absence of E6-glass fibre on extrusion-based 3D printed mortar. **Additive Manufacturing**, v. 32, p. 101069, 2020.

SHAKOR, P.; NEJADI, S.; PAUL, G. A Study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-Reinforcement in 3D Printed Mortar. **Materials**. **2019**; **12(10):1708**, v. 12, n. 10, p. 1708, 2019.

SHARMA, P., Sharma, N., Singh, P., Verma, M., & Parilhar, H. S. Examine the effect of setting time and compressive strength of cement mortar paste using iminodiacetic acid. **Materials Today: Proceedings**, v. 32, p. 878-881, 2020.

SOLTAN, D. G.; LI, V. C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 90, p. 1-13, 2018.

SONG, H.; LI, X. An overview on the rheology, mechanical properties, durability, 3D printing, and microstructural performance of nanomaterials in cementitious composites. **Materials**, v. 11, p. 2950, 2021.

TAY, Y. W. D.; LI, M. Y.; TAN., M. J. Effect of printing parameters in 3d concrete printing: printing region and supports structures. **Journal of Materials Processing Technology**., v. 271, p. 261-270, Setembro 2019.

THOMAS, C., Gaffney, T., Kaza, S., & Lee, C. Rapid prototyping of large scale aerospace structures. **In: 1996 IEEE Aerospace Applications Conference. Proceedings. IEEE**, 1996. 219-230.

TOFAIL, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. **Materials today**, v. 21, n. 1, p. 22-37, 2018.

VAN DER PUTTEN, J., Deprez, M., Cndde, V., De Schtter, G., & Van Tittelboom, K. Microstructural characterization of 3D printed cementitious materials. **Materials**, v. 12, p. 2993, 2019.

VAN NOORT, R. The future of dental devices is digital. **Dental materials**, v. 28, p. 3-12, 2012.

VARELA, H., Barluenga, G., Palomar, I., & Sepulcre, A. Synergies on rheology and structural build-up of fresh cement pastes with nanoclays, nanosilica and viscosity modifying admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 308, p. 125097, 2021.

WANGLER, T., Roussel, N., Bos, F. P., Salet, T. A., & Flatt, R. J. Digital concrete: a review. **Cement and Concrete Research**, v. 123, p. 105780, 2019.

WENG, Y., Li, M., Tan, M. J., & Qian, S. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 600-610, 2018.

WI, K., Wang, K., Taylor, P., Laflamme, S., Sritharan, S., & Qin, H. Properties and microstructure of extrusion-based 3D printing mortar containing a highly flowable, rapid set grout. **Cem. Concr. Compos.**, v. 124, p. 10243, 2021.

WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P.; SALET, T. A. M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. **Cem. Concr. Res.**, v. 119, p. 132-140, 2019.

XIAO, J., Zou, S., Yu, Y., Wang, Y., Ding, T., Zhu, Y., Li, L. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101779, 2020.

XIAO, J., Ji, G., Zhang, Y., Ma, G., Mechtcherine, V., Pan, J., Du, S. Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, p. 104115, 2021.

YUAN, Q., Li, Z., Zhou, D., Huang, T., Huang, H., Jiao, D., & Shi, C. A feasible method for measuring the buildability of fresh 3D printing mortar. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116600, 2019.

ZAHABIZADEH, B., Pereira, J., Gonçalves, C., Pereira, E. N., & Cunha, V. M. Influence of the printing direction and age on the mechanical properties of 3D printed concrete. **Materials and Structures**, v. 54, p. 1-22, 2021.

ZAREIYAN, B.; KHOSHNEVIS, B. Interlayer adhesion and strength of structures in Contour Crafting-Effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thickness. **Automation in Construction**, v. 81, p. 112-121, 2017.

ZHANG, Y., Zhang, Y., She, W., Yang, L., Guojian, L., & Yang, Y. A review of the current progress and application of 3D printed concrete. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 125, n. April, 2019.

ZHANG, X., Li, M., Lim, J. H., Weng, Y., Tay, Y. W., Pham, H., & Pham, Q.-C. Large-scale 3D printing by a team of mobile robots. **Automation in Construction**, v. 95, p. 98-106, 2018.

ZHANG, Y., Zhang, Y., Yang, L., Liu, G., Chen, Y., Yu, S., & Du, H. Hardened properties and durability of large-scale 3D printed cement-based materials. **Mater. Struct.**, v. 54, p. 1-14, 2021.

ZHANG, Y., Zhang, Y., She, W., Yang, L., Liu, G., & Yang, Y. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 201, pp.278-285, 2019.

ZHU, B.; PAN, J.; NEMATOLLAHI, B.; ZHOU, Z.; ZHANG, Y.; SANJAYAN, J. Development of 3D printable engineered cementitious composites with ultra-high tensile ductility for digital construction. **Materials Design**, v.181, 2019.

ZOU, Shuai; Xiao, Jianzhuang; Ding Tao; Duan, Zhenhua; Zhang, Qingtian. Printability and advantages of 3D printing mortar with 100% recycled sand. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121699, 2021.