

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Kiara Schneider Corazza

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DE
AMOSTRAS PRODUZIDAS POR MEIO DA FABRICAÇÃO ADITIVA E
SUA RELAÇÃO COM A METODOLOGIA DE PRODUÇÃO.**

Santa Maria, RS
2023

Kiara Schneider Corazza

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DE
AMOSTRAS PRODUZIDAS POR MEIO DA FABRICAÇÃO ADITIVA E
SUA RELAÇÃO COM A METODOLOGIA DE PRODUÇÃO.**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Erich D. Rodríguez Martínez

Santa Maria, RS
2023

Kiara Schneider Corazza

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DE AMOSTRAS PRODUZIDAS POR MEIO DA FABRICAÇÃO ADITIVA E SUA RELAÇÃO COM A METODOLOGIA DE PRODUÇÃO.

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

Aprovado em (dia) de (mês) de (ano):

Prof. Dr. Erich D. Rodríguez Martínez (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Gabriela Bruna Webber Rodrigues (UFSM)

Leonardo Mendonça (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a toda a minha família, sem a qual nada disso teria sido possível e aos meus amigos e professores, que fizeram parte de cada momento dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

“O talento vence jogos, mas só o trabalho em equipe ganha campeonatos”.

(Michael Jordan).

Primeiramente, gostaria de agradecer à Universidade Federal de Santa Maria, por ter sido minha casa pelos últimos cinco anos.

À minha família, principalmente minha mãe, Dionéia, que colocou sua vida de lado para que esse sonho pudesse se tornar realidade, à minha Tia, Dionara, que durante o tempo em que estive longe de casa, se tornou uma segunda mãe, a minha irmã, que mesmo de longe nunca deixou de me apoiar, aos meus avós, por terem me acolhido tão abertamente em sua casa durante todos esses anos, ao meu namorado, João Victor, que mesmo chegando no finalzinho se tornou um dos meus maiores incentivadores, e ao meu pai, que sempre conseguiu me tirar risadas mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu Orientador, Erich D. Rodriguez Martinez, por não ter desistido e acreditado em mim quando nem eu o fazia. Muito além de um professor, ao longo dos anos se tornou um grande amigo. Agradeço por ter tido a oportunidade de cruzar caminhos com um profissional tão qualificado e dedicado ao aprendizado dos seus alunos como ele. Professor, tenha certeza de que todos os ensinamentos sobre a vida serão lembrados. A você, meu muito obrigado.

Aos meus amigos, Andressa, Bibiana, Giovanna, Victória, Laísa, Eduarda, Emilia, Jaqueline, Ester, Marcelo, e demais integrantes do grupo GEMASC que estiveram ao meu lado em todos os momentos.

Ainda, não poderia deixar de agradecer a minha colega Tuani, que no decorrer dessa caminhada se tornou muito mais que uma amiga e que hoje me atrevo a chamar de irmã. Sem você esse trabalho não teria nem saído da capa, e por isso, não tenho nem palavras para agradecer. Mas muito além disso, não tenho como ser mais grata por todos os momentos que dividimos e sonhos que construímos. A você, meu muito obrigada.

Ao grupo GEMASC, por ter me acolhido tão abertamente e me ensinado tanto sobre a vida e responsabilidades.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram com que tudo isso fosse possível, o meu mais grato “obrigado”.

*"Quando tudo parece estar indo contra
você, lembre-se que o avião decola
contra o vento, não a favor dele."*

(Henry Ford)

RESUMO

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DE AMOSTRAS PRODUZIDAS POR MEIO DA FABRICAÇÃO ADITIVA E SUA RELAÇÃO COM A METODOLOGIA DE PRODUÇÃO.

AUTOR: Kiara Schneider Corazza.

ORIENTADOR: Erich D. Rodriguez Martinez.

A impressão 3D de concretos tem ganhado interesse na área da construção civil nos últimos anos como um método de industrialização na fabricação de elementos ou edificações. Porém o desempenho mecânico destes elementos impressos e a metodologia de produção ainda precisam ser estudados com mais detalhe. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é avaliar a influência de diferentes métodos de produção nos resultados de resistência à compressão de uma mistura a base de Cimento Portland convencional (CPC) para impressão 3D, assim como identificar a interferência do sentido de impressão nos resultados finais. O sistema foi formulado a partir de uma revisão sistemática da literatura e com base em ensaios preliminares executados pelo grupo de pesquisa. O teste de “flow table” foi utilizado para determinar parâmetros de fluidez da mistura ensaiada. Foram realizados três métodos de produção, sendo eles: (i) a produção de amostras cúbicas pré-acondicionadas em estado fresco; (ii) retificadas em estado endurecido e a (iii) confecção de amostras cilíndricas com auxílio de uma cerra copo. Foram realizados ensaios de resistência à compressão usando uma Prensa Instron® 500HDX-64-67B, com uma taxa de aplicação de carga igual a 0,05 mm/s a fim de determinar a influência que os diferentes métodos de extração possuem no desempenho mecânico dos elementos impressos. Por fim, o desempenho mecânico a compressão das amostras foi avaliado através de métodos estatísticos do tipo ANOVA-TUKEY e Distribuição de Weibull onde ficou demonstrado que amostras cúbicas retificadas em estado endurecido apresentaram melhor desempenho frente aos ensaios de compressão e menor variabilidade das dimensões produzidas. A partir deste trabalho é proposta uma metodologia de produção para as amostras de concretos impressos em 3D considerando a infraestrutura disponível atualmente no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSM.

Palavras-chave: impressão 3D, produção de amostras, avaliação resistência à compressão.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE MECHANICAL RESISTANCE TO COMPRESSION OF SAMPLES PRODUCED THROUGH ADDITIVE MANUFACTURING AND ITS RELATION WITH THE PRODUCTION METHODOLOGY.

AUTHOR: Kiara Schneider Corazza.
ADVISOR: Erich D. Rodriguez Martinez.

The 3D printing of concrete has gained interest in the field of civil construction in recent years as a method of industrialization in the manufacture of elements or buildings. However, the mechanical performance of these printed elements and the production methodology still need to be studied in more detail. Thus, the objective of the present work is to evaluate the influence of different production methods on the compressive strength results of a mixture based on conventional Portland Cement (OPC) for 3D printing, as well as to identify the interference of the printing direction in the results finals. The system was formulated from a systematic review of the literature and based on preliminary tests carried out by the research group. The "flow table" test was used to determine fluidity parameters of the tested mixture. Three production methods were carried out, namely: (i) the production of pre-packaged cubic samples in fresh state; (ii) rectified in a hardened state and (iii) preparation of cylindrical samples with the aid of a cup saw. Compressive strength tests were carried out using an Instron® Press 500HDX-64-67B, with a load application rate equal to 0.05 mm/s in order to determine the influence that the different extraction methods have on the mechanical performance of the printed elements. Finally, the mechanical performance to compression of the samples was evaluated using statistical methods such as ANOVA-TUKEY and Weibull Distribution, where it was demonstrated that cubic samples rectified in a hardened state presented better performance against the compression tests and less variability of the dimensions produced. Based on this work, a production methodology is proposed for 3D printed concrete samples considering the infrastructure currently available at the Civil Construction Materials Laboratory (LMCC) at UFSM.

Keywords: 3D printing, sample production, compressive strength evaluation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Construções utilizando a tecnologia de impressão 3D	17
Figura 2 - Impressão 3D	18
Figura 3 - Teste de extrudabilidade.	22
Figura 4 - Teste de capacidade de construção.	23
Figura 5 - Teste de abatimento	24
Figura 6 - Teste de funil em V	24
Figura 7 – Teste mesa de Consistência.....	24
Figura 8 - Forma dos Filamentos de acordo com a geometria do bico e altura de camada.....	26
Figura 9 - Teste de construtibilidade utilizando diferentes porcentagens de nano TiO ₂	27
Figura 10 - Teste de printabilidade relacionado ao tempo aberto da mistura.....	28
Figura 11 - Configuração Impressora PotterBot 10 Micro.....	34
Figura 12 - Placa de dimensões 166×102×25 mm	36
Figura 13 - Prisma de dimensões 56×56×45 mm.....	36
Figura 14 - Modelador “Fusion 360”.....	37
Figura 15 - Segmentador “Ultimaker Cura”.....	37
Figura 16 - Alinhamento junta-z.....	37
Figura 17 - Segregação da argamassa durante a impressão.....	38
Figura 18 - Defeito formado pela segregação de material.....	38
Figura 19 - Exemplo de falhas durante a impressão.....	39
Figura 20 - Impressão dos corpos de prova.	41
Figura 21 - Dimensões do molde troncônico utilizado.....	41
Figura 22 - Ensaio de mesa de consistência.	42
Figura 23 - Deposição camada por camada	42
Figura 24 - Impressão do contorno.....	43
Figura 25 - Metodologia de corte amostras cúbicas	44
Figura 26 - Metodologia de corte amostras cilíndricas	44
Figura 27 - Direção de aplicação de carga em relação ao sentido de impressão.....	45
Figura 28 - Resistência Mecânica média a compressão das amostras.....	48
Figura 29 - Rompimento de amostras ensaiadas com aplicação de força no sentido paralelo à direção de impressão.....	49

Figura 30 - Corpos de prova cilíndricos52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Levantamento de sistemas para impressão 3D de concreto.	21
Tabela 2 - Composição Química do CPV-ARI	30
Tabela 3 - Diâmetros característicos CPV-ARI.....	30
Tabela 4 - Caracterização da Microssílica.....	31
Tabela 5 - Composição Granulométrica da Areia	32
Tabela 6 - Limites superiores e inferiores para dimensão do agregado.....	32
Tabela 7 - Composição da Argamassa.....	33
Tabela 8 – Levantamento de metodologias de produção de amostras.....	34
Tabela 9 - Levantamento dos parâmetros de impressão.....	39
Tabela 10 - Parâmetros de impressão	40
Tabela 11 - Relação entre o numero de amostras, metodologia de produção e sentido de aplicação de carga.....	45
Tabela 12 - Valores dos diâmetros de espalhamento – “índice de consistência”.....	47
Tabela 13 - Dados estatísticos dos resultados de resistência à compressão das amostras impressas	48
Tabela 14 - Análises de significância (ANOVA-TUKEY).....	50
Tabela 15 - Análise estatística comparando espécimes impressos e moldados convencionalmente.....	50
Tabela 16 - Variabilidade nas dimensões das amostras relacionadas ao método de produção.....	51
Tabela 17 - Análise Estatística das dimensões das amostras.....	51

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	4
AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
SUMÁRIO	12
1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVOS GERAIS	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 IMPRESSÃO 3D DE CONCRETO	17
3.2 MATERIAIS COMPONENTES DE MISTURAS DE CONCRETO PARA IMPRESSÃO 3D	18
3.3 PROPRIEDADES EM ESTADO FRESCO DAS MISTURAS DE CONCRETO PARA IMPRESSÃO 3D.	21
3.3.1 TESTE DE EXTRUDABILIDADE – “ <i>Extrudability</i> ”	21
3.3.2 CAPACIDADE DE CONSTRUÇÃO – “ <i>Buildability</i> ”	22
3.3.3 TEMPO ABERTO – “ <i>Open time</i> ”	23
3.3.4 TEMPO DE CICLO – “ <i>Layer cycle-time</i> ”	23
3.3.5 FLUIDEZ – “ <i>Flowability</i> ”	24
3.4 MODELAGEM	25
3.5 TESTES DE CONSTRUTIBILIDADE E PRINTABILIDADE – “ BUILDABILITY ” E “ PRINTABILITY ” – ARTIGO DE NANO TITÂNIO.	27
3.5.1 TESTE DE “ PRINTABILITY ”	28
3.5.2 TESTE DE “ BUILDABILITY ”	28
3.6 PROPRIEDADES EM ESTADO ENDURECIDO DAS MISTURAS DE CONCRETO PARA IMPRESSÃO 3D.	29
3.6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 CIMENTO PORTLAND	30
4.2 MICROSSÍLICA	31
4.3 AGREGADOS – AREIA	31
4.4 ADITIVOS	33
4.5 SISTEMAS	33
4.6 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS	33
4.6.1 DETERMINAÇÃO DAS GEOMETRIAS	34
4.6.2 MODELAGEM	36
4.6.3 PARÂMETROS DE IMPRESSÃO	39
4.6.4 MÉTODO DE MISTURA	40
4.6.5 ENSAIO DE MESA DE CONSISTÊNCIA	41
4.6.6 IMPRESSÃO	42
4.6.7 METODOLOGIA DE CORTE	43
4.6.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1 VALORES DE DIÂMETROS DE ESPALHAMENTO – FLOW TEST	47
5.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO	47

5.3	ANÁLISES ESTATÍSTICAS REFERENTES AO MÉTODO DE CORTE.....	51
6	CONCLUSÕES	53
7	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D, também conhecida como Manufatura Aditiva (MA) ou Fabricação Aditiva, surgiu em meados de 1980, por Chuck Hull, com o objetivo de agilizar a prototipagem de produtos desenvolvidos em escala industrial. Após os anos 2000, essa tecnologia começou a tomar espaço em diversas áreas econômicas, e, dentre elas, a construção civil (SOUZA, 2021). Pilar da indústria 4.0, é baseada no empilhamento sucessivo de camadas e dispensa o uso de formas, além disso, essa tecnologia promete redução nos tempos de execução, baixos custos, maior liberdade arquitetônica e vêm se tornando um processo de construção cada vez mais ecologicamente correto por promover uma diminuição na produção de resíduos nos canteiros de obra (ARAÚJO, 2022; SIKORA *et al.*, 2021).

(CONSTRUCT, 2016) aponta que o uso da impressão 3D aliada a construção civil já é uma realidade em países desenvolvidos como China e Estados Unidos. No ano de 2013, a empresa chinesa WinSun foi a primeira companhia capaz de construir, em impressão 3D, 10 habitações em um período de 24 h (WALKER, 2014). Ainda, a startup americana Apis Core conseguiu realizar a impressão in loco de uma casa com 38 m² com um orçamento de apenas US \$10 mil (GARRETT, 2017). Considerando que de acordo com o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2022), no Brasil, em 2022, o valor do metro quadrado de uma edificação popular construída de maneira convencional custa em média R\$1.675,46, a redução nos custos, considerando como exemplo um imóvel com os mesmos 38 m², seria de aproximadamente 22,5%. Por esse motivo, hoje, a impressão 3D é vista por muitos como uma possível solução para problemas sociais, como o déficit habitacional, enfrentados por países emergentes (RAMOS *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2022).

No entanto, por ser um método construtivo relativamente novo e ainda sem normativas, são necessários estudos mais aprofundados quanto às propriedades em estado endurecido e principalmente de como podem ser caracterizados e avaliados.

Dado o exposto, este estudo visa o desenvolvimento de um procedimento ou protocolo de fácil execução dentro desta nova linha de pesquisa para a avaliação do desempenho mecânico (resistência à compressão) de materiais cimentícios utilizados para a impressão 3D, considerando a infraestrutura (principalmente tipo de impressora e máquina universal de ensaios) disponível no Laboratório de Materiais de Construção (LMCC). Com este objetivo, foram avaliadas as resistências à compressão de 100 amostras produzidas por meio da impressão 3D, variando entre elas o método de extração das amostras e a direção de aplicação

de carga em relação aos filamentos impressos, visando assim, relacionar os resultados encontrados com o método produtivo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Avaliar o desempenho mecânico quanto à resistência à compressão de corpos de prova cúbicos e cilíndricos de concreto produzidos através da fabricação aditiva em escala laboratorial, correlacionando estes ao método de produção.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar uma metodologia de produção para corpos de prova cúbicos e cilíndricos impressos em uma impressora 3D de bancada (escala laboratorial);
- Identificar parâmetros de processo (velocidade de impressão, altura de camada e diâmetro de bico, etc.) que melhor se adaptem as condições de trabalho requeridas;
- Definir a geometria mais eficiente frente ao crescimento de camadas para confecção do objeto de estudo;
- Avaliar o desempenho mecânico à compressão das amostras, correlacionando os resultados com os diferentes métodos de corte.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 IMPRESSÃO 3D DE CONCRETO

A maneira de construir mudou ao longo dos anos, no entanto, sempre possuiu um caráter artesanal dependente da mão de obra humana durante todas as etapas da construção. No entanto, na busca por uma otimização nos canteiros de obra e redução de custos, nas últimas décadas, a indústria da construção vem gradualmente inserindo processos de manufatura aditiva. Assim, automatizações que já ocupavam grande espaço em outras indústrias vêm se tornando cada vez mais comuns na área da construção civil. (WOLFS; BOS; SALET, 2018).

Proveniente da indústria 4.0, a impressão 3D é inserida na construção civil como um modo de industrialização de processos (KRUGER; ZERANKA; VAN ZIJL, 2019). Atualmente, é considerada uma das tecnologias emergentes mais estudadas e uma das áreas que mais cresce nos últimos anos, fato comprovado pela alta frequência em que novos projetos são apresentados tanto por empresas privadas como por instituições de pesquisa ao redor do mundo (YANG; CHE; SHI, 2021, WOLFS; BOS; SALET, 2018). Apesar de ainda encontrar-se em estágios iniciais de desenvolvimento, a impressão 3D aplicada à indústria da construção fornece boas indicações para adoção em larga escala no futuro (KRUGER; ZERANKA; VAN ZIJL, 2019). A possibilidade de construir elementos geométricos sem a necessidade de formas (Figura 1) é uma grande vantagem em termos de taxa de produção, liberdade arquitetônica e redução de custos. Estudos mostraram que a construção com tecnologia “*3D printing*” pode reduzir de 30 a 60% dos resíduos de construção, de 50 a 80% dos custos de mão de obra e 50 a 70% do tempo de produção (ARAÚJO, 2022).

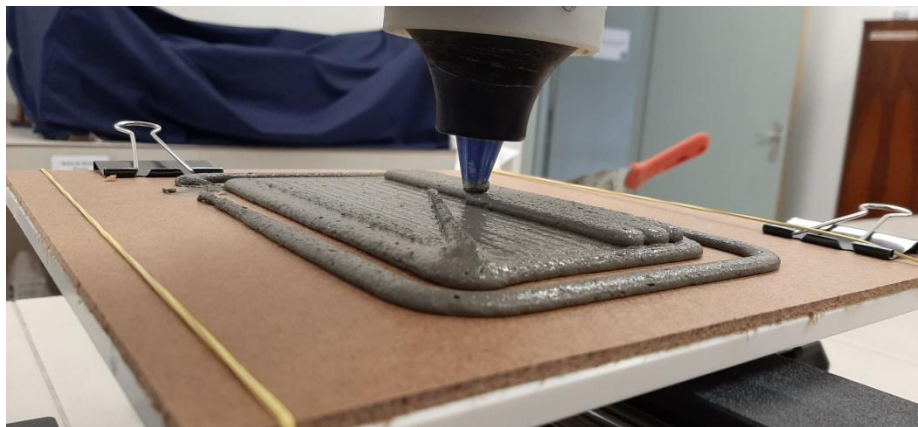
Figura 1 - Construções utilizando a tecnologia de impressão 3D



Fonte: ©wavy (UPPUNDA, 2022).

A tecnologia de impressão 3D de materiais cimentícios é um processo baseado em extrusão e funciona de maneira similar ao processo de deposição fundida comumente utilizada na indústria de impressão termoplástica; no entanto sem depender de calor para facilitar a saída do material (KRUGER; ZERANKA; VAN ZIJL, 2019). O processo de extrusão aditivo “camada por camada” típico dessa tecnologia inclui o bombeamento do material de construção e extrusão do material através do bico para alcançar a geometria desejada (Figura 2). Assim, espera-se que este tenha trabalhabilidade e fluidez adequadas para que o bombeamento seja realizado sem interrupções e segregações, mas que após extrudado atinja resistência e rigidez suficientes para suportar seu peso bem como os das camadas acima construídas, sem apresentar deformações excessivas. No entanto, essa fabricação “*layer-by-layer*” pode originar as chamadas juntas frias, resultando na redução da resistência entre as camadas impressas, e por isso, configura um dos principais desafios dessa tecnologia quando comparada aos métodos convencionais de produção (ARAÚJO, 2022).

Figura 2 - Impressão 3D



Fonte: Autor.

Assim, um entendimento sobre as particularidades dos processos de impressão e sua relação com as propriedades dos materiais impressos ainda precisam ser desenvolvidas a fim de garantir a qualidade e segurança do produto final (WOLFS; BOS; SALET, 2018, KRUGER; ZERANKA; VAN ZIJL, 2019).

3.2 MATERIAIS COMPONENTES DE MISTURAS DE CONCRETO PARA IMPRESSÃO 3D

Os materiais utilizados para impressão 3D de concreto possuem similaridades quando comparados com os constituintes utilizados nas argamassas e concretos de alto desempenho, diferenciando apenas na dimensão máxima de agregados, uma vez que agregados graúdos podem gerar bloqueios no bocal. Dessa forma, uma mistura para impressão 3D geralmente

conta com cimentos de alta resistência inicial, areia, cargas minerais inertes e baixas relações água/cimento (ARAÚJO, 2022).

Sabe-se que o material recém-impresso deve ter tensão de escoamento suficiente para resistir à tensão induzida pela gravidade das camadas acima (ROUSSEL, 2018). Como já identificado por outros pesquisadores, materiais cimentícios destinados à impressão 3D apresentam propriedades reológicas que atingem o modelo pseudoplástico de Bingham, se comportando como um sólido em valores baixos de tensão de cisalhamento e como um fluido quando a mesma ultrapassa um valor crítico. Os principais parâmetros reológicos que regem um fluxo de Bingham são a tensão de escoamento (medida de resistência ao fluxo) e a viscosidade (tensão crítica no início do fluxo do material). Assim, durante o processo de bombeamento e extrusão do material cimentício, os valores de tensão de escoamento e viscosidade do material devem ser menores quando comparados com os valores durante a fase de construção. No entanto, após a extrusão do material, a tensão de escoamento que controla a capacidade de manutenção da forma das camadas deve ser suficientemente alta, bem como seu módulo de elasticidade, para que assim sejam evitadas falhas devido à baixa resistência das camadas (SANJAYAN; JAYATHILAKAGE; RAJEEV, 2021). Dessa forma, a escolha dos materiais cimentícios destinados à impressão 3D precisa seguir uma graduação ajustada para que seja possível garantir uma extrudabilidade favorável e fluidez. Uma boa escolha de componentes é capaz de fornecer uma estrutura estável, facilitando que as partículas formem um sistema de enchimento mais denso e organizado que garanta uma maior retenção de água e conseqüentemente uma melhor trabalhabilidade da mistura (MA; LI; WANG, 2018a).

Ainda, novas pesquisas estudam a possibilidade de utilização de fibras, mais comumente o polipropileno, para auxiliar na extrusão da argamassa e diminuir fissuras oriundas da retração devido ao alto teor de cimento presente na mistura e a grande área superficial exposta que favorece a evaporação da água presente no sistema (ARAÚJO, 2022).

Além disso, tem se tornando uma escolha recorrente entre pesquisadores o uso de aditivos minerais como uma alternativa para melhorar o desempenho das misturas cimentícias (YANG; CHE; SHI, 2021). Adições podem ajudar a atingir propriedades desejadas de trabalhabilidade e desempenho mecânico ao mesmo tempo em que substituem parcialmente o cimento Portland na mistura (YANG; CHE; SHI, 2021). No entanto, além das proporções dos materiais empregados, para garantir um bom desempenho é importante que exista uma preocupação com a manutenção da forma da estrutura e coesão da mistura, fatores que podem ser ajustados por meio do tamanho de agregado e distribuição de tamanho de partículas. (ARAÚJO, 2022). Segundo estudos realizados por (WENG *et al.*, 2018a; ZHANG *et al.*,

2018, 2019b) foi estabelecido que a finura das partículas desempenha um papel importantíssimo na fluidez e coesão das misturas.

Com o auxílio da teoria de Fuller Thompson e o modelo de Marson Percy como diretrizes para gradação da areia e otimização do empacotamento das partículas constituintes da mistura, (WENG *et al.*, 2018a) projetaram materiais de construção com propriedades reológicas adequadas à impressão 3D de concreto. Os autores concluíram por meio de testes reológicos que misturas de gradação contínua apresentaram as maiores tensões de escoamento e viscosidade plástica quando comparadas a outros sistemas. Ainda, durante o teste de construção, foi possível atingir uma altura de 40 cm, o que equivale a 40 camadas de ± 1 cm, sem que acontecesse nenhuma deformação notável. Adicionalmente, (LE *et al.*, 2012a) concluíram que a combinação de tamanhos de partículas afeta significativamente a capacidade de extrusão do sistema. Os autores relataram que misturas com uma relação areia/ligante maior que 2,3 apresentaram dificuldade para passar pelo sistema de bicos uma vez que o alto teor de agregados causava a segregação da areia mesmo quando fluidificadas por um conteúdo adicional de água ou aditivo superplastificante. Assim, a pesquisa pode concluir que a relação ideal de areia/ligante para que a mistura passe pelos critérios de extrudabilidade deve ser igual a 1,5. Adicionalmente, outros estudos consideram que uma relação areia/aglutinante entre 0,6 e 1,7 apresenta bons resultados quanto à resistência à compressão (ARAÚJO, 2022). Nesse contexto, pesquisas vêm adotando um valor máximo para o tamanho de agregado igual a 1,2 mm junto a materiais de enchimento, como calcário, pó de quartzo, microsilica e demais tipos de fillers inertes que fornecem partículas menores do que a faixa de 63 μm .

Assim, a mistura para impressão 3D de concreto deve ser fluida o suficiente para passar pelo bico extrusor sem a necessidade de aplicação de grandes pressões e deve adquirir resistência e rigidez suficientes para suportar a deposição das camadas subsequentes sem a formação de vazios e falhas na impressão, e assim, quando estas duas condições são atendidas o material pode ser considerado como “imprimível” (CHAVES FIGUEIREDO *et al.*, 2019a).

Desse modo, foi realizada uma revisão sistemática de oito artigos encontrados na literatura a fim de definir quais eram os sistemas mais recorrentes nas misturas já testadas por outros autores (Tabela 1). Notou-se que a presença da microsilica como substituição do cimento era comum em quase todos os trabalhos que utilizavam o Cimento Portland (CP) como matéria prima principal. Além disso, o uso de aditivos modificadores de viscosidade, aceleradores de pega e superplastificantes também eram comuns.

Tabela 1 - Levantamento de sistemas para impressão 3D de concreto.

Materiais Secos				Materiais Líquidos				Fontes
Ligantes				Areia	a/c	Aditivos		
CP	Pó de calcário	CV	SA			SP	AMV	
1,0	0,00	1,00	0,10	0,50	0,30	1,30%	0,00	(WENG <i>et al.</i> , 2018a)
1,0	0,2	0,00	0,10	0,31	0,44	0,00	0,00	(NAIR <i>et al.</i> , 2019)
1,0	0,3	0,00	0,00	0,38	0,35	0,25	0,00	
1,0	0,00	0,00	0,05	0,00	0,30	0,02	0,00	(MANIKANDAN <i>et al.</i> , 2020)
1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02	0,00	
1,0	0,00	0,00	0,03	0,00	0,30	0,03	0,00	
1,0	0,32		0,05	2,36	0,32	0,00	0,00	(KLOFT <i>et al.</i> , 2020)
1,0	0,3 (fino) + 0,5 (grosso)	0,00	1,8	0	0,52	0,24	0,09	(SIKORA <i>et al.</i> , 2021)
1,0	0,00	0,28	0,14	2,01	0,45	1,48%	0,13	(KRUGER; ZERANKA; VAN ZIJL, 2019)
1,0	0,00	0,00	0,086	2,43	0,26	0,80	0,00	(ZHANG <i>et al.</i> , 2019a)
1,0	0,00	0,00	0	2,3	0,43	0,05	0,11	(KAZEMIAN <i>et al.</i> , 2017)
1,0	0,00	0,00	0,1	2,26	0,43	0,16	0,00	

CP: Cimento Portland; CV: Cinza Volante; SA: Sílica Ativa; SP: Superplastificante; AMV: aditivo modificador de viscosidade.

Fonte: Autor

3.3 PROPRIEDADES EM ESTADO FRESCO DAS MISTURAS DE CONCRETO PARA IMPRESSÃO 3D.

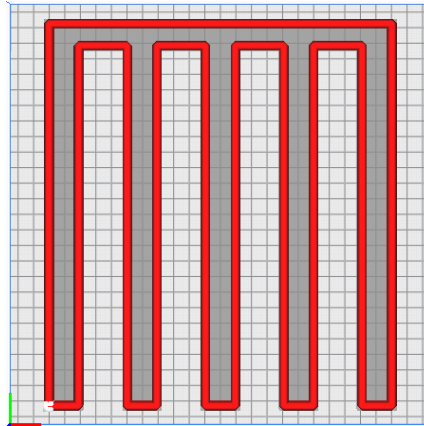
Para que seja possível definir qual o melhor sistema para ser utilizado na impressão 3D, se faz necessária à realização de testes. O desempenho de impressão de misturas cimentícias com diferentes graus de substituição é medido através de testes de extrudabilidade, fluidez, construtibilidade, tempo aberto e propriedades mecânicas. Abaixo serão brevemente descritos alguns dos procedimentos utilizados para garantir uma mistura que forneça um produto final impresso de qualidade (MA; LI; WANG, 2018a).

3.3.1 TESTE DE EXTRUDABILIDADE – “*Extrudability*”

A capacidade de extrusão das misturas cimentícias é um parâmetro crítico que se refere à possibilidade de os materiais serem projetados em um filamento contínuo através do bocal da impressora. Esse critério é afetado principalmente pela quantidade e distribuição do volume de materiais secos na mistura (cimento, areia e adições). O ensaio avalia a

extrudabilidade da mistura por meio da aferição da maior distância na qual o filamento pode ser extrudado (Figura 3) sem apresentar defeitos e por meio da menor abertura a partir da qual o filamento pode ser depositado sem que haja drenagem do líquido e/ou bloqueio do bocal (MA; LI; WANG, 2018a).

Figura 3 - Teste de extrudabilidade.



Fonte: Autor

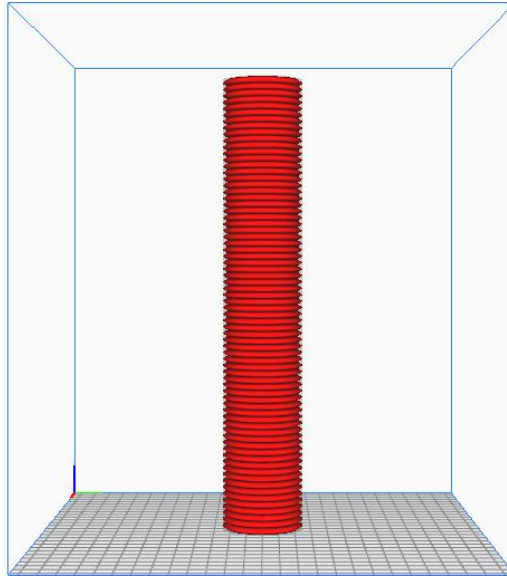
Materiais com elevadas tensões de escoamento são mais dificilmente bombeados e podem ocasionar descontinuidades na impressão e posteriormente irão afetar as propriedades em estado endurecido (PANDA; TAN, 2018).

3.3.2 CAPACIDADE DE CONSTRUÇÃO – “*Buildability*”

A impressão 3D consiste, basicamente, na criação de estruturas por meio do empilhamento sucessivo de camadas. Por isso a importância do teste de capacidade de construção, uma vez que este serve para avaliar o desempenho imprimível do concreto, ou seja, a sua capacidade em manter sua forma e resistir à deformação sob carga como consequência do peso das camadas que estão/foram depositadas (MA; LI; WANG, 2018a).

Para a execução do teste, a argamassa é mantida no tubo/reservatório da impressora e extrudada do bocal para formar camadas. Os projetos são desenvolvidos visando o empilhamento sucessivo de filamentos (Figura 4). A capacidade de construção então é medida contabilizando quantas camadas foram impressas antes do colapso, ou seja, mede o quão hábil a camada recém-depositada é em recuperar sua viscosidade e tensão de escoamento a fim de suportar o peso da camada que será impressa sobre ela. Um objeto de impressão é considerado colapsado quando a tensão de escoamento é atingida em qualquer ponto da estrutura/elemento, uma vez que provavelmente esta coincidirá com deformações extensas, colapso progressivo e/ou rachaduras (MA; LI; WANG, 2018a; PANDA; TAN, 2018; WOLFS; BOS; SALET, 2018).

Figura 4 - Teste de capacidade de construção.



Fonte: Autor

3.3.3 TEMPO ABERTO – “*Open time*”

Esta propriedade representa o intervalo de tempo t dentro do qual a mistura fresca se mantém trabalhável para impressão. Sua aferição pode ser realizada por meio de um aparelho Vicat, medindo o tempo de pega da mistura, ou determinada por testes reológicos como ensaios rotacionais ou oscilatórios em intervalos de tempo pré-estabelecidos (MA; LI; WANG, 2018a).

3.3.4 TEMPO DE CICLO – “*Layer cycle-time*”

Intervalo de tempo que um filete leva para se depositar exatamente no mesmo lugar em cima da camada inferior sem que esta tenha deformações (PANDA; TAN, 2018). A camada recém impressa deve recuperar suas características de viscosidade e resistência originais antes que a camada subsequente seja sobre ela depositada. Dessa maneira, as camadas mantêm suas propriedades químicas (viscosidade) por tempo suficiente para que seja possível proporcionar a união com a camada subsequente e evitar o surgimento de juntas frias. Essas chamadas juntas frias (“*cold joints*”) podem gerar interfaces com resistências de aderência baixas e resultar em perdas de resistência mecânica em estado endurecido (MA; LI; WANG, 2018a).

3.3.5 FLUIDEZ – “Flowability”

A fluidez da mistura é determinada pela queda na altura da pasta de cimento ou pelo diâmetro final de espalhamento da mesma. Em laboratório, os testes de abatimento (Figura 5) são preferíveis devido a sua simplicidade e resultados imediatos, mas outras maneiras de se medir a fluidez se fazem presentes, como o teste de funil em V (

Figura 6) e teste da mesa de consistência (Figura 7).

Figura 5 - Teste de abatimento



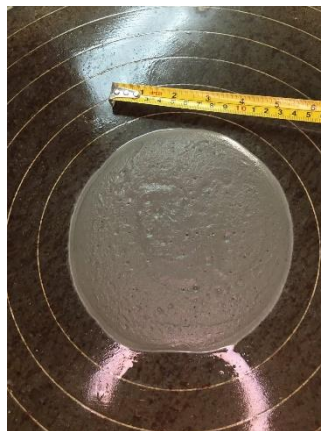
Fonte: (FREITAS, 2020)

Figura 6 - Teste de funil em V



Fonte: (ALFERES FILHO; MONTE; DE FIGUEIREDO, 2019)

Figura 7 – Teste mesa de Consistência



Fonte: Autor

Na execução do teste de mesa de salto, um molde troncônico é preenchido com argamassa em três camadas sucessivas de alturas aproximadamente iguais, ao final de cada

camada, uma série de golpes devem ser proferidos ao material, sendo 15 na primeira camada, 10 na segunda e cinco na terceira a fim de proporcionar uma melhor distribuição do material dentro do molde. Em seguida, faz-se o rasamento da argamassa dentro do cone, com o auxílio de uma régua metálica em movimentos curtos de vaivém. Posteriormente o molde é retirado e a manivela é acionada de modo que a mesa suba e caia 25 vezes em 25s de maneira uniforme. Ao final, mede-se o diâmetro de espalhamento médio da mistura em duas direções perpendiculares para que se determine a fluidez da pasta de cimento fresca (ABNT, 2002). Quanto maior o diâmetro, maior a fluidez (MA; LI; WANG, 2018a).

No entanto, diminuir o diâmetro de abatimento facilita a manutenção da geometria impressa, contribuindo para a capacidade de construção do material. Contudo, nem sempre essa redução é benéfica uma vez que pode ocasionar na dificuldade de extrusão e entupimento do bocal. Dessa forma, estudos recomendam valores ideais para o diâmetro de espalhamento como sendo de 17,4 a 21 cm com os quais é possível alcançar um bom desempenho de impressão (MA; LI; WANG, 2018a).

3.4 MODELAGEM

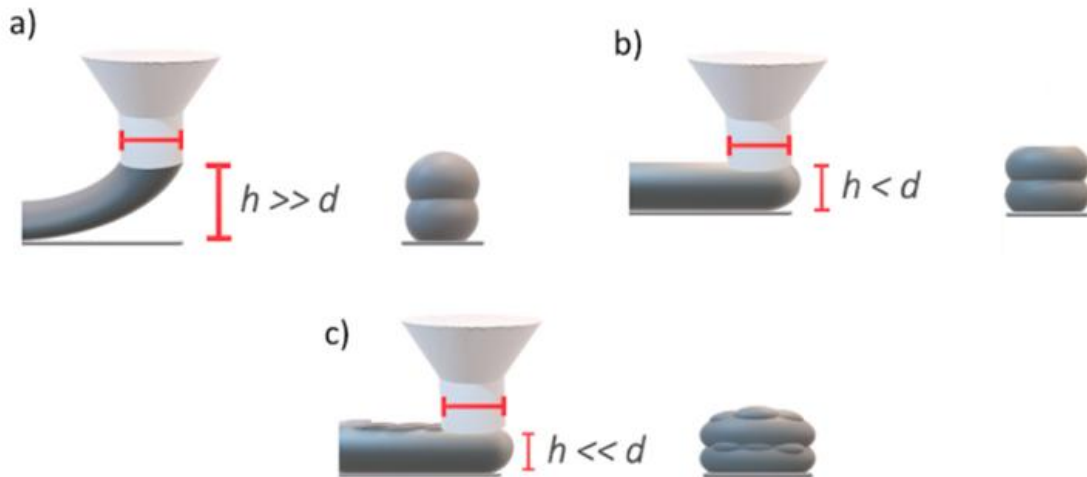
Pesquisas desenvolvidas por (MA; LI; WANG, 2018b) concluíram que existe uma correlação entre as propriedades do material em estado fresco (capacidade de extrusão, capacidade de construção, tempo aberto, entre outros) e os parâmetros de processo escolhidos pelo operador como velocidade de impressão, abertura do bocal, taxa de extrusão, etc.

Além disso, o mesmo autor percebeu uma relação equilibrada e inter-relacionada entre a extrudabilidade das misturas, a taxa de extrusão de material e a velocidade de impressão. Adicionalmente, notou-se que as geometrias do bico, bem como sua distância em relação à mesa de impressão, constituem um fator crítico ao processo de impressão, uma vez que determinam a forma da camada impressa (Figura 8) (MA; LI; WANG, 2018b; SOUZA *et al.*, 2020).

(SOUZA *et al.*, 2020) explicam a relação entre a distância do bocal e a mesa de impressão da seguinte forma: se a altura do bico em relação à mesa (h) for maior ou igual ao diâmetro do bico (d), o filamento impresso terá uma forma arredondada nas laterais e no topo (Figura 8a), a área de contato entre as camadas será menor e sua ligação mais frágil. No entanto, se " h " for ligeiramente menor que " d ", o filamento será arredondado nas laterais e achatado na parte superior (Figura 8b). Finalmente, se " h " for muito menor que " d ", o concreto tende a ser pressionado contra a superfície e/ou camada inferior (Figura 8c). Nessa configuração, pode ocorrer à formação de camada mais espessas e defeitos do tipo ondulação

podem aparecer. No entanto, essas configurações dependem da taxa de fluxo do material e da velocidade do bico de impressão. Além disso, espessuras muito grandes produzem impressões rápidas e de baixa qualidade. Da mesma forma, uma abertura de bico muito pequena representa uma restrição para uma boa capacidade de extrusão (MA; LI; WANG, 2018b).

Figura 8 - Forma dos Filamentos de acordo com a geometria do bico e altura de camada



Fonte: SOUZA *et al.*, 2020

Ademais, quando tratada a questão da velocidade de impressão, (MA; LI; WANG, 2018b) explicam que as frações líquidas e viscosas das argamassas desenvolvidas para a impressão 3D de concreto são fundamentais para o desempenho da aderência entre camadas, que é extremamente dependente do tempo de repouso. Devido ao fato de as camadas manterem suas propriedades viscosas por tempo limitado, a resistência de ligação entre elas melhora gradualmente enquanto a velocidade da impressora aumenta uma vez que quanto menor o tempo de repouso, ou seja, quanto mais rápido uma camada for sobreposta sobre outra, maior a aderência entre duas camadas subsequentes. No entanto, existe uma velocidade crítica na qual a argamassa não tem tempo suficiente para desenvolver a resistência necessária para suportar as camadas subsequentes e assim, a capacidade de carga diminui.

A impressão 3D tem como principal característica o empilhamento vertical de camadas e isso faz com que as camadas inferiores estejam sujeitas a forças de compressão devido ao seu peso próprio e das demais camadas construídas acima delas. Uma possível explicação para esse fenômeno encontra-se na rigidez e fluidez dessas camadas, que podem não ser altas o suficiente para sustentar a carga a elas imposta e por isso o tempo de descanso também desempenha um efeito determinante na capacidade de construção do material (MA; LI; WANG, 2018b).

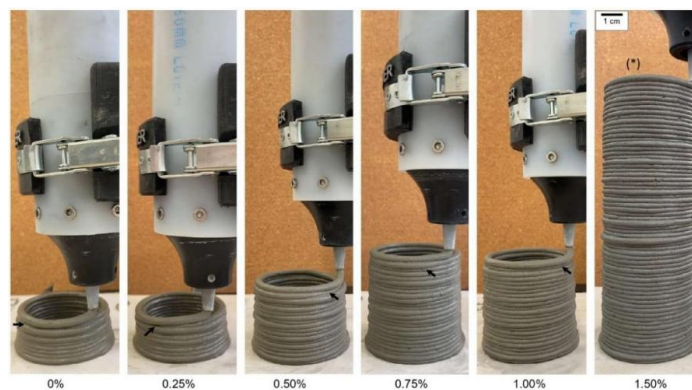
Dessa forma, concluiu-se que o designe ideal dos produtos impressos é altamente dependente dos processos de impressão e assim, de acordo com (MA; LI; WANG, 2018b), os parâmetros de abatimento, diâmetro de espalhamento, tempo aberto, propriedades viscosas e distribuição de tamanho de partícula são altamente dependentes dos parâmetros de processo como velocidade de impressão, taxa de extrusão, abertura do bocal e caminho e altura de impressão.

3.5 TESTES DE CONSTRUTIBILIDADE E PRINTABILIDADE – “BUILDABILITY” E “PRINTABILITY” – ARTIGO DE NANO TITÂNIO.

Essa pesquisa baseou-se em um estudo realizado por (DE MATOS *et al.*, 2022), o qual tinha como objetivo comparar os resultados finais de capacidade de construção e printabilidade de uma mistura referencia com os de uma mistura contendo diferentes porcentagens de TiO₂ como substituição do CPC, a fim de determinar qual a influência que a adição impõe ao desempenho em estado fresco das misturas.

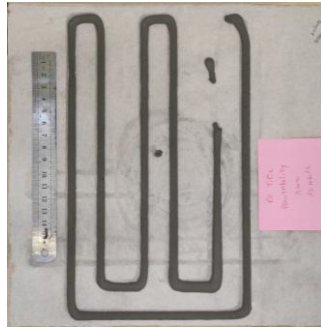
As figuras 9 e 10 mostram os resultados alcançados pelos autores com a inserção do nano-TiO₂ na mistura. Pode-se notar que a incorporação de altas porcentagens do mesmo melhorou a construtibilidade dos compósitos (Figura 9) ao passo que trouxe prejuízo a sua printabilidade (Figura 10). No entanto, isso não depende apenas das propriedades dos materiais, mas também dos parâmetros de processo escolhidos. Assim, o estudo concluiu que o maior teor de nano titânio trouxe benefícios à capacidade de construção, mas exigiu que o processo de impressão fosse realizado mais rapidamente, com uma diminuição do tempo aberto em 50 minutos em comparação com a mistura de controle.

Figura 9 - Teste de construtibilidade utilizando diferentes porcentagens de nano TiO₂.



Fonte: (DE MATOS *et al.*, 2022)

Figura 10 - Teste de printabilidade relacionado ao tempo aberto da mistura



Fonte: (DE MATOS *et al.*, 2022)

Por fim, com base nos resultados do estudo realizado por (DE MATOS *et al.*, 2022), foram definidos os parâmetros utilizados no desenvolvimento do presente trabalho, apresentados na seção 4.6.3. Além disso, é importante salientar que os ensaios efetuados na pesquisa acima mencionada foram uma peça chave para o entendimento das relações entre os parâmetros de processo e as propriedades das misturas em estado fresco o que viabilizou o desenvolvimento do presente trabalho. A seguir, são listados os passos realizados durante a execução dos testes citados.

3.5.1 TESTE DE “PRINTABILITY”

O estudo realizou a avaliação da printabilidade por meio da impressão de um filamento contínuo de 200 mm de comprimento, semelhante ao proposto por (MA; LI; WANG, 2018b). O teste de foi repetido em intervalos de 10 minutos e o bico selado entre cada teste para evitar perdas excessivas de água por exsudação.

3.5.2 TESTE DE “BUILDABILITY”

Para o teste de construtibilidade foi avaliado o número máximo de camadas impressas antes do colapso durante a impressão de um corpo de prova cilíndrico anelar de 75 mm de diâmetro, semelhante ao proposto por (KRUGER; ZERANKA; VAN ZIJL, 2019; SANJAYAN; JAYATHILAKAGE; RAJEEV, 2021; ZHANG *et al.*, 2018). A execução do teste foi realizada a cada 30 minutos também selando o bico entre cada teste.

3.6 PROPRIEDADES EM ESTADO ENDURECIDO DAS MISTURAS DE CONCRETO PARA IMPRESSÃO 3D.

O uso da tecnologia de manufatura aditiva na indústria da construção civil exige um maior controle no processo de produção das estruturas e com isso devem ser atendidos parâmetros já conhecidos de desempenho, qualidade e durabilidade.

Uma vez que as matérias primas utilizadas para a produção de elementos com a fabricação aditiva pouco diferem das utilizados na construção convencional, o maior cuidado encontra-se na metodologia de produção. Estruturas impressas são mais suscetíveis à anisotropia devido à possibilidade de surgimento de vazios entre as camadas que tendem a reduzir a capacidade estrutural do objeto. Assim, a obtenção de uma alta resistência à compressão e à flexão, assim como à tração são os principais objetivos na produção desse concreto. Ainda, uma baixa retração é essencial, uma vez que a falta de formas aumenta a área superficial exposta potencializando processos de evaporação da água no concreto e consequentemente ocasionando no surgimento de rachaduras (ARAÚJO, 2022).

Adicionalmente, deve ser considerado outro parâmetro relacionado à geometria dos elementos como o preenchimento insuficiente. Falhas na impressão podem causar vazios no elemento endurecido, reduzindo assim a densidade efetiva e potencialmente prejudicando a resistência e durabilidade da estrutura (BUSWELL *et al.*, 2018).

3.6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A definição da resistência à compressão das amostras é um fator chave para determinar a aplicabilidade dessa tecnologia nos canteiros de obra, além disso, pelo fato das camadas serem suscetíveis a danos devido às cargas de flexão, principalmente pela ausência de reforços, testar a resistência a flexão dos elementos também se mostra essencial (YUE *et al.*, 2022).

Estudos realizados por (LE *et al.*, 2012b), indicam que tanto a resistência à compressão quanto a resistência à flexão-tração de amostras impressas são diretamente dependentes do caráter anisotrópico resultante do processo de fabricação e da adesão entre as camadas, que é função do tempo entre as extrusões. Ainda, novas pesquisas descobriram relações entre a direção de impressão e resistências á tração, as quais apontam que perpendicularmente a uma interface a resistência à tração é menor do que nas demais direções, no entanto, resultados relacionados com a dependência entre a resistência a compressão e direção de impressão se apresentaram inconsistentes (WANGLER *et al.*, 2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CIMENTO PORTLAND

Foi utilizado um Cimento Portland comercial do tipo CPV-ARI (Itaimbé, Belo Horizonte, Brasil) devido a sua alta resistência inicial. A caracterização deste se deu por meio da determinação da massa específica do material, equivalente a 3.0769 kg/m³, realizado conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 16605 (ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2017). Na Tabela 2 está listada a composição química obtida mediante de fluorescência de raios X (FRX). A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de distribuição do tamanho de partícula avaliada por meio do ensaio de granulometria a laser (Granulômetro Cilas, modelo Cilas 1180 Liquid – LACER/UFRGS).

Tabela 2 - Composição Química do CPV-ARI

Composição química (%)	
SiO ₂	16.9
Al ₂ O ₃	3.6
Fe ₂ O ₃	2.6
CaO	68.4
K ₂ O	1.1
Na ₂ O	0.1
MgO	2.4
SO ₃	4.4
TiO ₂	0.3
P ₂ O ₅	0.2
Perda ao fogo a 950 °C	3,46

Fonte: Autor

Tabela 3 - Diâmetros característicos CPV-ARI

Propriedades Físicas	
Percentil dv10	2,36 µm
Percentil dv50	11,31 µm
Percentil dv90	23,45 µm
Diâmetro médio de partícula	12,19 µm
Dv[4,3]	

Fonte: Autor

4.2 MICROSSÍLICA

Compósitos cimentícios são muito vulneráveis a perda de água, o que pode promover uma maior dificuldade de extrusão. Visando reduzir esse problema da mistura, são utilizados modificadores de viscosidade e substâncias ultrafinas como argilas ou sílica ativa (PERROT *et al.*, 2018). Nesse estudo e com base em estudos preliminares no laboratório optou-se pelo uso da microssílica como uma opção para melhorar a extrudabilidade da mistura uma vez que esta auxilia no incremento na coesão da mistura. A microssílica utilizada foi a do tipo não densificada - 971U, disponibilizada pela empresa Elkem (Oslo, Norway). Sua caracterização se deu por meio de ensaios de granulometria à laser (Granulômetro Cilas, modelo Cilas 1180 Liquid – LACER/UFRGS), massa específica (NBR 16605), fluorescência de raios X (FRX) e perda ao fogo (NM 18:2012). Os resultados apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização da Microssílica

Composição química (%)	
SiO ₂	93.9
Al ₂ O ₃	0.4
Fe ₂ O ₃	0.4
CaO	0.3
K ₂ O	0.8
Na ₂ O	1.8
MgO	2.0
SO ₃	0.1
TiO ₂	<0.1
P ₂ O ₅	<0.1
Perda ao fogo a 950 °C	2,788
Propriedades Físicas	
Percentil dv10	30,00 µm
Percentil dv50	21,00 µm
Percentil dv90	14,00 µm
Massa específica	2.375 kg/m ³

Fonte: Autor

4.3 AGREGADOS – AREIA

Os agregados representam cerca de 60 a 75% do volume nos concretos tradicionais e possuem influência direta nas propriedades em estado fresco e endurecido das misturas. No

entanto, quando se trata de impressão 3D, muitos são os motivos para que exista um valor limite para o tamanho máximo dos agregados utilizados, uma vez que as características deste material podem afetar a trabalhabilidade, bombeamento, porosidade, retração, desempenho mecânico e durabilidade do concreto. Ainda, devem ser evitados agregados grosseiros a fim de prevenir possíveis entupimentos do bocal e por isso são mais indicados agregados de menores dimensões (SOUZA *et al.*, 2020). Como citado na seção 3.2, pesquisas vêm utilizando um tamanho máximo de agregado de 1,2 mm uma vez que auxiliam no desenvolvimento de maiores tensões de escoamento e proporcionam uma menor viscosidade plástica nas misturas (WENG *et al.*, 2018b).

Dessa forma, a areia utilizada na produção das amostras teve sua caracterização feita por meio de ensaios granulométricos utilizando uma série de peneiras normatizadas e obedecendo as instruções presentes na NBR 7211 (ABNT NBR 7211, 2005). Os resultados são apresentados na Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 - Composição Granulométrica da Areia

Amostras	1500,00 g		Variação (± 4%)	Média (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
	1500,00 g	1500,00 g				
Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (%)	Massa retida (%)				
6,3	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
4,75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
2,36	0,04%	0,09%	-0,04%	0,07%	0,07%	99,93%
1,18	1,98%	2,02%	0,03%	2,00%	2,06%	97,94%
0,60	5,44%	5,24%	0,20%	5,34%	7,41%	92,59%
0,30	59,83%	58,81%	-1,02%	59,32%	66,73%	33,27%
Fundo	32,67%	33,77%	1,10%	33,22%	99,94%	0,06%
TOTAL	99,96%	99,93%				

Fonte: PREMIL.

Tabela 6 - Limites superiores e inferiores para dimensão do agregado.

Abertura das peneiras (mm)	Limite inferior		Limite superior	
	Acumulada (%)	Passante (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
6,3	0,00%	100,00%	7,00%	93,00%
4,75	0,00%	100,00%	10,00%	90,00%
2,36	0,00%	100,00%	25,00%	75,00%
1,18	5,00%	95,00%	50,00%	50,00%
0,60	15,00%	85,00%	70,00%	30,00%

0,30	50,00%	50,00%	95,00%	5,00%
0,15	85,00%	15,00%	100,00%	0,00%

Fonte: PREMIL.

Para a execução desse trabalho, optou-se por utilizar apenas a fração passante na peneira #150, a fim de evitar possíveis bloqueios no bico devido à dimensão dos agregados.

4.4 ADITIVOS

A fim de atingir a dispersão ideal de partículas, foi utilizado o aditivo superplastificante (SP) EXP CR 7105 (GCP, Alpharetta, EUA) que é à base de policarboxilato com um teor de sólidos de 20,9% em peso e densidade aparente de 1,050 kg/m³.

4.5 SISTEMAS

Com base na revisão bibliográfica citada na seção 3.2, assim como uma serie de testes preliminares foram definidos os sistemas para a realização desse trabalho. Foi utilizada uma relação agregado/ligante igual a 1/1, e uma relação água/cimento de 0,30. Foi realizado um conjunto de testes preliminares utilizando a mesa de salto para definir o teor de aditivo que proporcionava a melhor fluidez da mistura sem que a mesma perdesse sua capacidade de suporte.

A composição completa encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição da Argamassa.

Material	Traço Unitário	Massa Específica (kg/m ³)	Vol unit (cm ³)	Consumo de materiais por metro cúbico kg/m ³
Cimento	0,90	3,077	0,290	879,99
Sílica Ativa	0,10	2,375	0,045	97,77
Areia fina*	1,00	2,65	0,377	977,69
Água	0,30	1,0	0,30	293,31
Superplastificante	0,011	1,09	0,010	10,75

*Passante na peneira #150

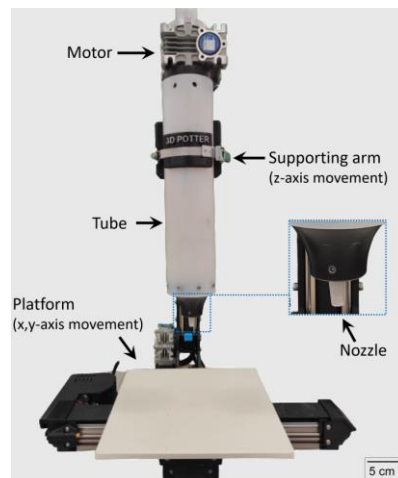
Fonte: Autor

4.6 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram impressas utilizando a Impressora 3D PotterBot 10 Micro da empresa 3D Potter (Stuart, EUA) ilustrada na Figura 11. Essa impressora possui como características geométricas um quadro de impressão que permite a confecção de objetos com

até 305 mm de altura, 280 de largura e 265 mm de comprimento, um tubo extrusor de 1000 ml e velocidade máxima de impressão equivalente a 130 mm/s (POTTER, [s.d.]). Ademais, a mesma é composta por uma extrusora do tipo Ram, na qual baixas taxas de extrusão podem promover um leve sangramento ou segregação como consequência da alta pressão aplicada. No entanto, essa impressora se mostra mais eficiente na impressão de camadas mais precisas e rígidas quando comparadas as impressoras do tipo parafuso (*screw-type*). (DE MATOS *et al.*, 2022).

Figura 11 - Configuração Impressora PotterBot 10 Micro.



Fonte: DE MATOS *et al.*, 2022

4.6.1 DETERMINAÇÃO DAS GEOMETRIAS

Para a definição das geometrias escolhidas para esse estudo, foi utilizada como base a revisão sistemática realizada e apresentada na Tabela 8. Nesta, foram estudados 16 artigos, dentre os quais duas metodologias de produção distintas foram apresentadas, sendo elas: *i*) a produção de placas com dimensões superiores à necessária, das quais eram extraídos os corpos de prova nas geometrias e dimensões finais desejadas (com corte) e *ii*) a produção de corpos de prova já nas dimensões finais requeridas (sem corte). Em alguns estudos, a metodologia de produção não foi especificada, e por isso, nesses casos, foram consideradas para a decisão da metodologia de produção desse estudo, apenas as dimensões finais das amostras.

Tabela 8 – Levantamento de metodologias de produção de amostras

Tipo de produção	Dim. Placa (mm)	Dim. Prisma (mm)	Dim. cubos (mm)	Dim. Cilindro (mm)	Fonte
Com corte	350×350×120	50×220×63	100×100×100,	58×63	(BUDD; ADEY, 2009)
	e 500×350×120		63×63×63 e 90×90×90		
Com corte	500×300×85	40×40×150	50×50×50	-	(PANDA <i>et al.</i> , 2017)

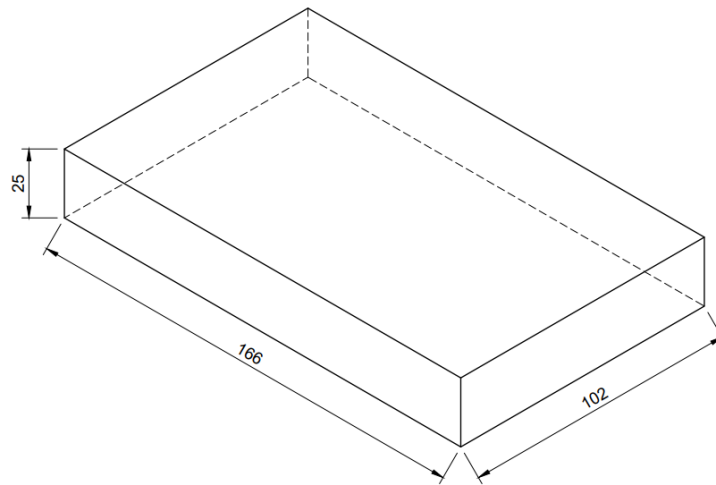
Não especificado	-	30×45×160 e 40×40×160	50×50×50	-	(PANDA <i>et al.</i> , 2018)
Sem corte	-	40×40×160	40×40×40	60×40	(LOWKE <i>et al.</i> , 2020)
Não especificado	-	-	40×40×40	-	(LONG <i>et al.</i> , 2021)
Com corte	-	800×44×54	40×40×40	25×24	(CHEN <i>et al.</i> , 2020a)
Com corte	400×40×40	-	40×40×40	-	(PANDA <i>et al.</i> , 2019a)
Com corte	-	900×40×67,5	40×40×40	-	(CHEN <i>et al.</i> , 2020b)
Sem corte	-	21×21×120	40×40×40	-	(ALGHAMDI; NAIR; NEITHALATH, 2019)
Com corte	180×180×10 e 240×60×10	40×40×160, 180×40×10 e 150×40×10	35×35×35	-	(CHAVES FIGUEIREDO <i>et al.</i> , 2019b)
Não especificado	-	350×300×50	50×50×50	-	(WENG <i>et al.</i> , 2018a)
Com corte	600×40×40 e 200×160×40	40×40×160	40×40×40	-	(YANG; CHE; SHI, 2021)
Sem corte	-	40×40×160	-	-	(YUE <i>et al.</i> , 2022)
Sem corte	-	-	50×50×50	-	(NAIR <i>et al.</i> , 2019)
Com corte	-	350×300×150	50×50×50	-	(PANDA <i>et al.</i> , 2019b)
Com corte	500×500×110	400×100×100	100×100×100	100×50	(ZHANG <i>et al.</i> , 2021)

Fonte: Autor

Dessa forma, após uma avaliação que levou em conta a infraestrutura disponível na universidade para a execução da pesquisa e os parâmetros dispostos nos estudos anteriores, foram definidas as dimensões dos corpos de prova. Percebeu-se que cubos com as dimensões de 40 mm eram mais recorrentes e apareceram em sete dos 16 artigos, assim como o método de produção por meio do corte de placas maiores, o qual apareceu em nove dos 16 estudos. Outro aspecto interessante é a pouca quantidade de autores que executaram testes em amostras cilíndricas (sendo apenas quatro). Por esse motivo foram escolhidas duas diferentes geometrias, uma delas destinada a produção de corpos de prova cúbicos e a outra à corpo de provas cilíndricos.

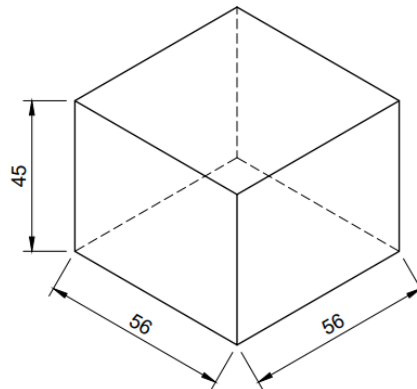
Portanto, as dimensões escolhidas foram: uma placa com dimensões iguais a 166×102×25 mm (Figura 12) para posterior obtenção de CP's cúbicos e um prisma de dimensões 56×56×45 mm (Figura 13) para obtenção das amostras cilíndricas. Essas dimensões foram definidas com base nas restrições impostas pelo volume do tubo extrusor da impressora e na disposição mais eficiente das camadas.

Figura 12 - Placa de dimensões 166×102×25 mm



Fonte: Autor

Figura 13 - Prisma de dimensões 56×56×45 mm



Fonte: Autor

4.6.2 MODELAGEM

A modelagem das amostras foi realizada com auxílio do software Fusion 360 (Figura 14). Em seguida este foi exportado para o programa Ultimaker Cura, o qual apresenta melhor desempenho frente à impressora utilizada e fornece o caminho no qual o bico da impressora ira percorrer no decorrer da impressão, bem como o contorno de cada camada do objeto impresso (Figura 15). Assim, após a definição de parâmetros importantes como espessura de camada, velocidade de impressão, taxa de extrusão, entre outros, foi gerado um “G-code” e o mesmo adicionado à área de trabalho da impressora.

Figura 14 - Modelador “Fusion 360”.

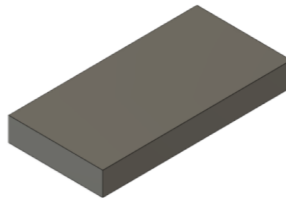
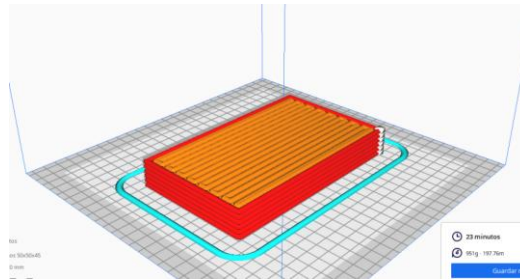


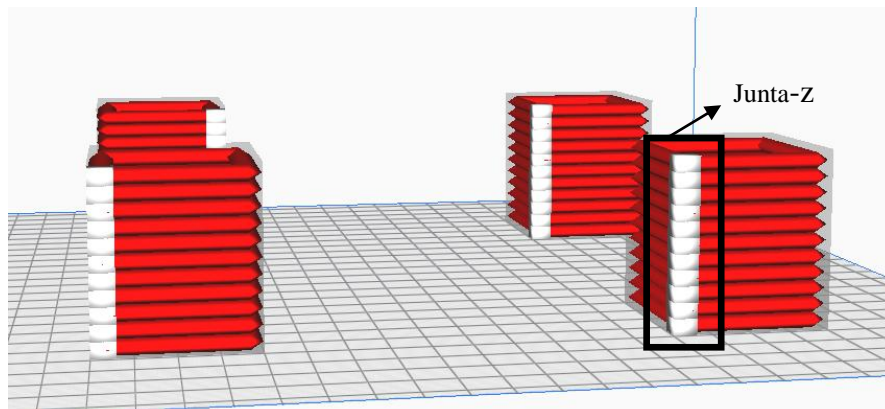
Figura 15 - Segmentador “Ultimaker Cura”.



Fonte: Autor

No entanto para que fosse possível chegar aos parâmetros de impressão ideais, diversos testes de tentativa e erro (nos quais eram variadas espessuras de camada, porcentagens de sobreposição de camadas, velocidade de impressão, etc.), foram realizados a fim de garantir a melhor distribuição das camadas bem como a menor formação de defeitos que poderiam afetar características em estado endurecido do elemento. Assim, dentre os pontos críticos referentes a essa etapa do estudo, torna-se pertinente comentar sobre a dificuldade em definir onde seriam alocados os alinhamentos da junta-Z (Figura 16), ou seja, local onde a impressora “subiria” para a próxima camada.

Figura 16 - Alinhamento junta-z.

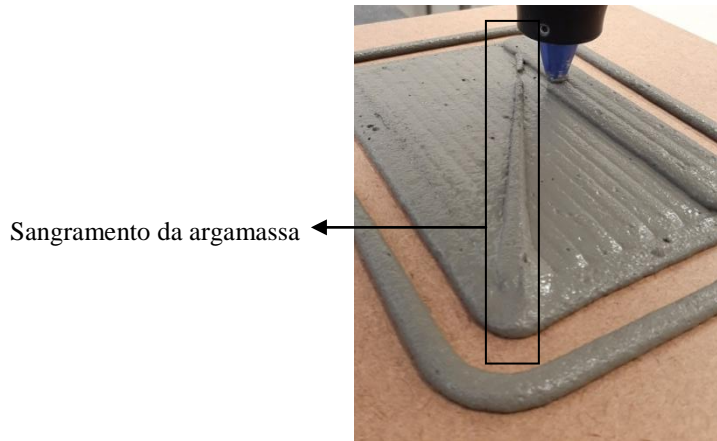


Fonte: Autor

O desafio se deu, principalmente, ao fato de o ponto de início da impressão não coincidir com o ponto término da mesma, fazendo com que um rastro de argamassa fosse

formado (Figura 17) devido às baixas taxas de extrusão que promovem um leve sangramento como consequência da alta pressão aplicada à mistura dentro do tubo da impressora.

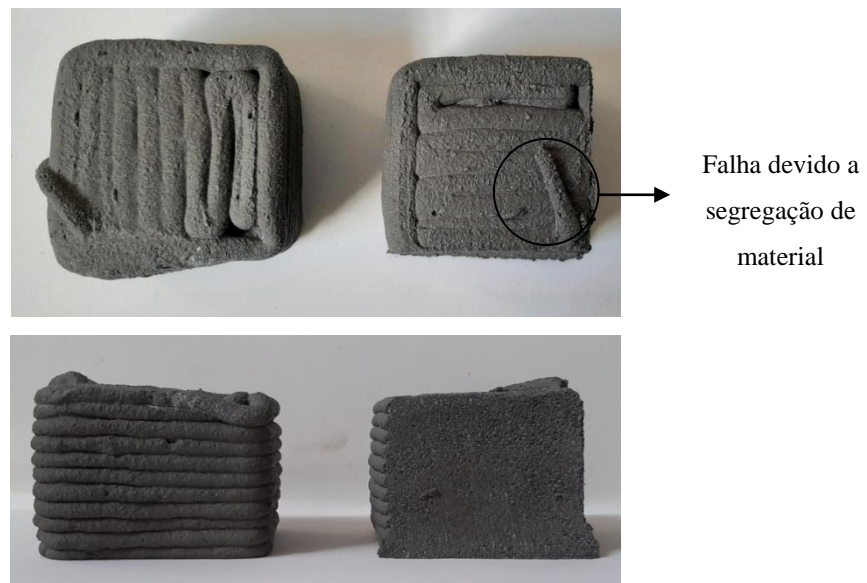
Figura 17 - Segregação da argamassa durante a impressão.



Fonte: Autor

No entanto, no decorrer do estudo foi possível perceber que, devido à compactação das camadas pelo seu peso próprio e peso das camadas acima depositadas, essa “falha” não trouxe prejuízo às amostras uma vez que a mesma desaparecia por completo ao final do processo, como comprovado pela Figura 18.

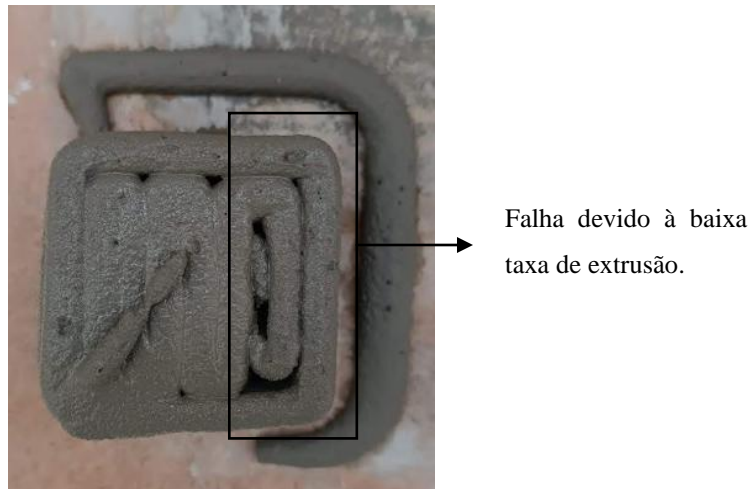
Figura 18 - Defeito formado pela segregação de material.



Fonte: Autor.

Além disso, outro fator determinante para a definição das geometrias utilizadas nesse estudo foi à formação de vazios na placa impressa devido à baixa taxa de extrusão do material no início da impressão (Figura 19).

Figura 19 - Exemplo de falhas durante a impressão.



Fonte: Autor

Assim, para que fosse possível solucionar esse problema, optou-se por deixar uma folga de um cm ao longo de cada borda da placa impressa, para que essa, no momento da extração dos corpos de prova, fosse descartada e nenhuma falha ficasse presente no elemento impresso.

4.6.3 PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Dessa forma, a definição dos parâmetros de impressão foi baseada em um levantamento realizado por (ROBAYO-SALAZAR *et al.*, 2023) (Tabela 9), onde, de forma resumida, são apresentados os principais parâmetros de projetos apresentados na literatura para misturas de cimentos convencionais a base de Cimento Portland.

Tabela 9 - Levantamento dos parâmetros de impressão.

Diâmetro do bocal (mm)	Velocidade de impressão (mm/s)	Altura da camada (mm)	Fonte
15 e 40×13,5	35-100	-	(CHEN <i>et al.</i> , 2020a)
40×100	13	40	(JI <i>et al.</i> , 2022)
50	60	-	(TRAN; CU; LE, 2021)
10-20	13-40	-	(HUANG <i>et al.</i> , 2022)
25,4×38,1	60	-	(KAZEMIAN <i>et al.</i> , 2017)
15	15	-	(YANG <i>et al.</i> , 2022)
15	100	-	(LIU <i>et al.</i> , 2019)
6	15	3,5	(DE MATOS <i>et al.</i> , 2022)
-	60	-	(CHRISTEN; VAN ZIJL; DE VILLIERS, 2022)

10	-	-	(TING; TAY; TAN, 2021)
50x20	100	-	(RAHUL <i>et al.</i> , 2022)

Fonte: (ROBAYO-SALAZAR *et al.*, 2023)

Assim, analisando os dados acima e com base em resultados de outros trabalhos (DE MATOS *et al.*, 2022) desenvolvidos no laboratório, concluiu-se que a combinação de parâmetros mais adequada aos materiais escolhidos e que resultaram em um melhor desempenho foi aquela que considerou um diâmetro de bico de 6 mm, velocidade de impressão de 15 mm/s e espessura de camada de 4 mm. Os demais parâmetros são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros de impressão

Espessura das Camadas	4,0 mm
Diâmetro do bico (d)	6,0 mm
Altura do bico em relação à mesa (h)	3,0 mm
Espessura das paredes	5,0 mm
Densidade de enchimento	100%
Direção das linhas de enchimento	90°
Velocidade	15 mm/s

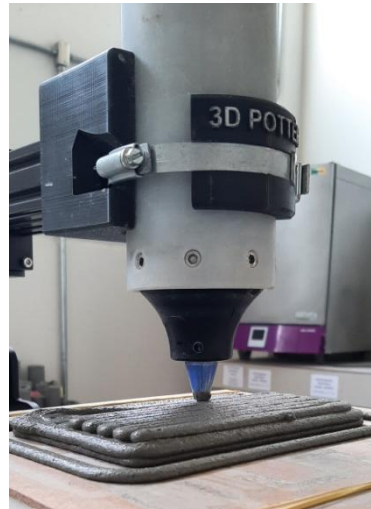
Fonte: Autor

4.6.4 MÉTODO DE MISTURA

As argamassas foram preparadas em bateladas de 1 L em um misturador planetário com capacidade de 5 L e 285 RPM. O procedimento de mistura está listado a seguir:

- i) Os materiais secos (cimento e areia) foram previamente misturados;
- ii) O misturador foi ligado e a água + aditivo superplastificante foram adicionados gradualmente ao longo de 1 minuto;
- iii) A microsilica foi adicionada lentamente ao longo de 2 minutos;
- iv) O tempo total de mistura foi de 10 minutos. Em seguida, o recipiente da impressora (Figura 11) foi preenchido com a argamassa;
- v) Com o auxílio de uma mesa vibratória, a mistura foi adensada no interior do tubo para a eliminação de ar;
- vi) O tubo foi acoplado na impressora e se deu início a impressão dos corpos de prova (Figura 20).

Figura 20 - Impressão dos corpos de prova.

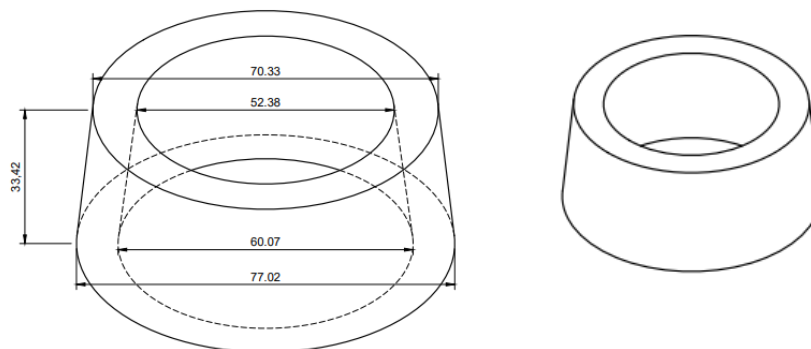


Fonte: Autor

4.6.5 ENSAIO DE MESA DE CONSISTÊNCIA

Ao se tratar de impressão 3D, os intervalos para manuseio das argamassas são mais reduzidos e o concreto para a impressão deve ter a maior consistência possível enquanto ainda consegue ser bombeado. Foi utilizado um cone de dimensões reduzidas pelo mesmo motivo (Figura 21). Todo o ensaio foi realizado baseando-se nas diretrizes estabelecidas pela NBR 13276 (ABNT, 2002) para de determinação do índice de consistência.

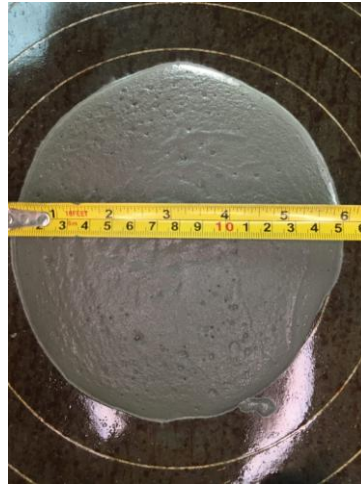
Figura 21 - Dimensões do molde troncônico utilizado.



Fonte: Autor

O teste de mesa de abatimento foi realizado ao fim de cada mistura (Figura 22) com o objetivo de avaliar a frequência dos valores de espalhamento encontrados, seguiu a metodologia estabelecida pela NBR 13276 (ABNT, 2002) já citada na seção 3.3.5 e baseou-se nas conclusões de (MA; LI; WANG, 2018a). Como já citado, o valor ideal para o espalhamento de misturas de concreto para impressão 3D nos testes de slump variam entre 174 a 210 mm e esse mesmo intervalo foi considerado para as misturas preparadas.

Figura 22 - Ensaio de mesa de consistência.

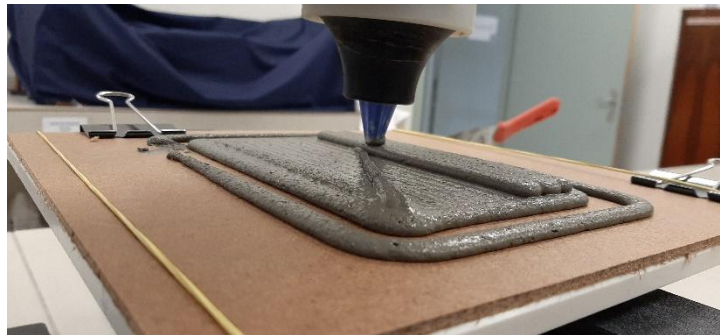


Fonte: Autor

4.6.6 IMPRESSÃO

A impressão 3D de materiais cimentícios ocorre de maneira similar a outros processos de impressão 3D. A Figura 23 mostra parte do processo de impressão, durante o qual o material fresco é depositado camada por camada.

Figura 23 - Deposição camada por camada



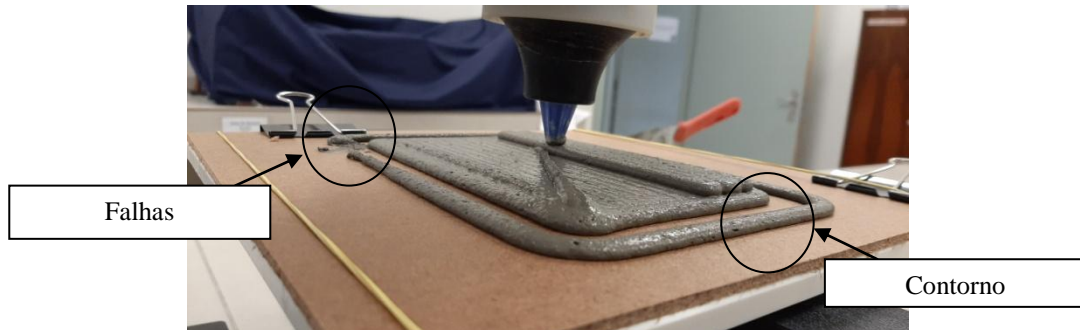
Fonte: Autor

A qualidade do filamento impresso dependia dos parâmetros de processo, como já citado anteriormente, sendo eles: velocidade de impressão, altura de camada e fluxo de extrusão. Além disso, propriedades do material, como reologia e tixotropia, e parâmetros geométricos, como forma e tamanho do objeto são de fundamental importância para um bom resultado de impressão (PANDA *et al.*, 2019a).

Uma vez que a impressão é altamente dependente da viscosidade da mistura e do fluxo de extrusão do material, sempre, antes da impressão dos modelos, um contorno era realizado. Isso se faz necessário uma vez que ao dar início a impressão, existe um atraso entre o momento de em que a impressora começa o processo de impressão, e o momento em que a argamassa começa a fluir pelo bico; esse atraso causa falhas no elemento impresso e por isso

um descarte de material é importante para homogeneizar a extrusão evitando as falhas durante a impressão do objeto/estrutura propriamente dita conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Impressão do contorno.



Fonte: Autor.

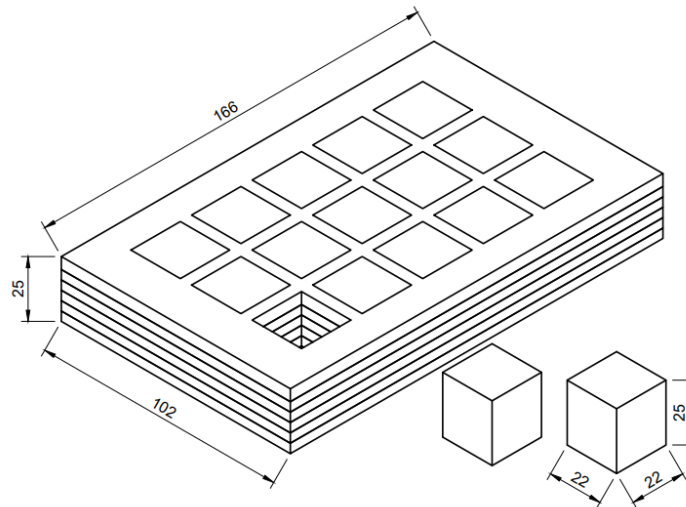
4.6.7 METODOLOGIA DE CORTE

A natureza anisotrópica dos objetos impressos em 3D possibilita o desenvolvimento e pesquisa de vários métodos de análise para determinar as características das amostras em estado endurecido. Ao rever a literatura existente, percebe-se que ainda não existe uma metodologia definida e consistente para estabelecer parâmetros de impressão e pós-processamento que atendam a todos os tipos de impressão, uma vez que as características de processo mudam de um projeto para outro (BUSWELL *et al.*, 2018).

Para a produção dos corpos de prova, percebeu-se que as metodologias empregadas variam de um estudo para outro (Tabela 8). Assim, a metodologia de produção proposta nesse trabalho consistiu em: após o término da impressão das amostras, estas foram alocadas em uma sala a temperatura ambiente, oscilando entre $22\pm 1^{\circ}\text{C}$, durante um período de 24 h. Para as amostras cúbicas, optou-se pelas dimensões de $20\times 20\times 20$ mm devido à dificuldade de produção com maiores volumes de material, principalmente por restrições físicas impostas pela impressora. Para os corpos de prova cilíndricos, optou-se por amostras com 20 mm de diâmetro e 40 mm de altura.

Para a confecção dos corpos de prova cúbicos, foram utilizadas duas metodologias distintas. Para ambas, realizou-se, em um primeiro momento e com o auxílio de um molde prismático, um corte preliminar de dimensões $22\times 22\times 25$ mm³ (Figura 25) na placa ainda em estado fresco (2 h após o término da impressão). A principal diferença entre os dois métodos encontra-se no pós-processamento, no qual, enquanto em um método as amostras, já em estado endurecido, eram retificadas nas dimensões $20\times 20\times 20$ mm, no outro as amostras eram lixadas, ainda em estado semi endurecido, nas mesmas dimensões.

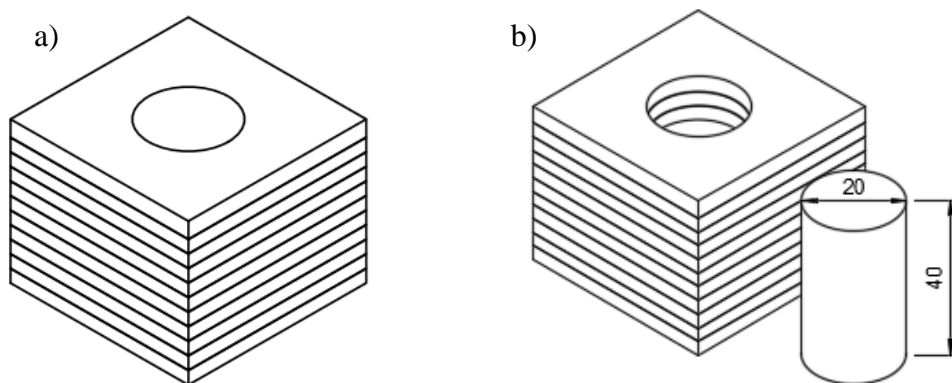
Figura 25 - Metodologia de corte amostras cúbicas



Fonte: Autor

A metodologia de produção das amostras cilíndricas se fez de maneira similar. Dos prismas impressos com dimensões $56 \times 56 \times 45$ mm (Figura 26a), retirou-se, com o auxílio de uma cerra copo, amostras cilíndricas com 20 mm de diâmetro e 40 mm de altura (Figura 26b), respeitando a relação 2:1 proposta pela ABNT NBR 5739:2018 (ABNT, 2018). Todos os corpos de prova, após as 24 horas de cura em temperatura ambiente, foram submersos em uma solução saturada de cal virgem por 13 dias até o dia do ensaio, totalizando assim, 14 dias de cura.

Figura 26 - Metodologia de corte amostras cilíndricas



Fonte: Autor

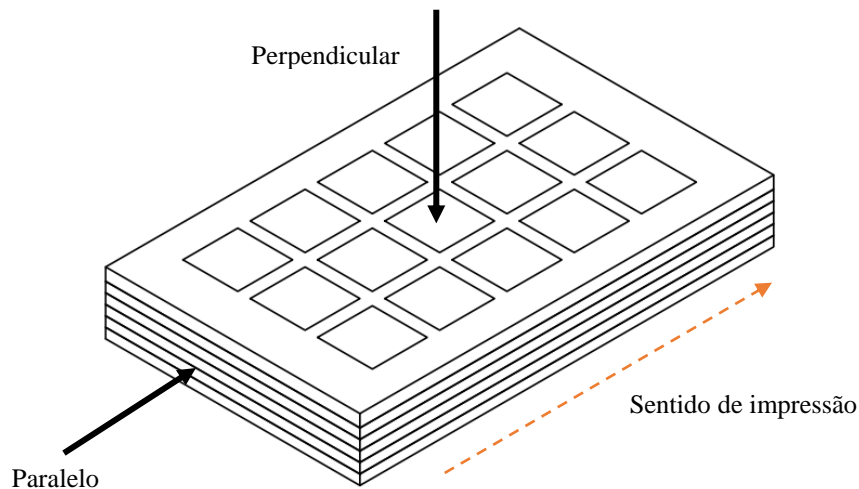
4.6.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

A resistência à compressão das amostras foi medida após 14 dias de cura. Para mensurar a resistência a compressão das amostras, foi utilizada uma Prensa Instron® 500HDX-64-67B, com uma taxa de aplicação de carga igual a 0,05 mm/s, adaptando as

recomendações preconizadas pela NBR 5739 (ABNT, 2018) para a aplicação em corpos de prova prismáticos. A escolha dessa prensa se deu devido ao seu bom funcionamento quando aplicadas tensões entre 200 kg e 150 T, estando todos os resultados encontrados nesse estudo contidos nesse intervalo. Adicionalmente, a precisão da mesma foi aferida por meio de ensaios com uma célula de carga de 50 kN.

A característica anisotrópica das amostras ocasionada pelo processo de impressão foi avaliada testando o material em duas direções conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Direção de aplicação de carga em relação ao sentido de impressão



Fonte: Autor

Para cada metodologia de corte, foram preparadas e testadas 50 amostras, sendo 25 em cada direção de aplicação de carga (paralela e perpendicular ao sentido de impressão) conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Relação entre o numero de amostras, metodologia de produção e sentido de aplicação de carga.

Metodologia de corte × Sentido de aplicação de carga	Número de amostras
Amostras lixadas e ensaiadas paralelamente ao sentido de impressão	25
Amostras lixadas e ensaiadas perpendicularmente ao sentido de impressão	25
Amostras retificadas e ensaiadas paralelamente ao sentido de impressão	25
Amostras retificadas e ensaiadas perpendicularmente ao sentido de impressão	25

Fonte: Autor

Ainda, para determinar a influência que o processo de impressão possui nos resultados de resistência a compressão, foram moldados, de maneira convencional, e ensaiados nove

corpos de prova cilíndricos, de 50 mm de diâmetro seguindo os mesmos parâmetros utilizados anteriormente.

Para determinar a relevância estatística das diferenças encontradas entre as resistências a compressão devido à direção de impressão e metodologia de corte, bem como o método de construção (impresso e convencional), foi realizada uma análise de variância (ANOVA-TUKEY). Para que se comprove a diferença entre os métodos, o nível de significância (p) deve ser inferior a 0,05. Assim, os métodos foram analisados e comparados aos pares, e, ao todo, foram calculados seis valores de p .

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 VALORES DE DIÂMETROS DE ESPALHAMENTO – FLOW TEST

Os ensaios de mesa de abatimento foram realizados ao fim de cada mistura utilizando uma mesa de consistência como citado na seção 3.3.5. Os valores encontrados encontram-se na tabela a seguir:

Tabela 12 - Valores dos diâmetros de espalhamento – “índice de consistência”.

Mistura	Diâmetros (cm)
1	17
2	16,75
3	17,5
4	15,85
5	16,25
6	16,85
7	16,25
8	16,85
9	17,25
10	18,25
11	15,25
12	15,5
13	17
Média	16,65
Desvio Padrão	0,8277

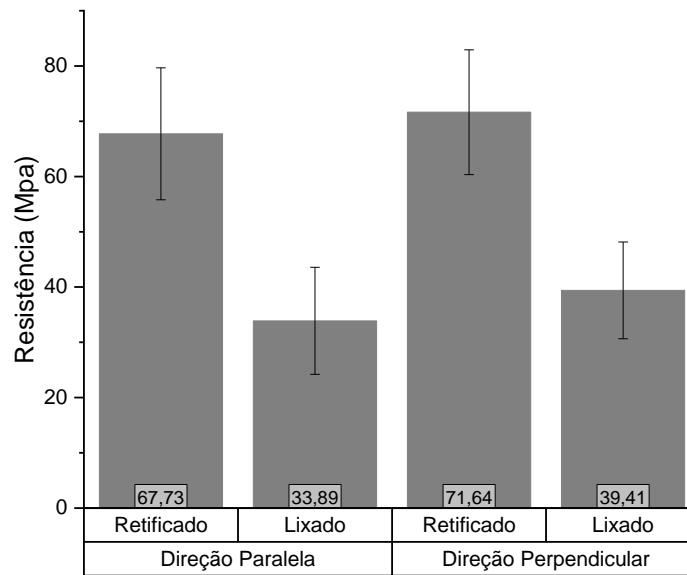
Fonte: Autor

Assim, pode-se concluir que os valores dos diâmetros de espalhamento encontrados estão muito próximos do intervalo estabelecido por (MA; LI; WANG, 2018a). No entanto, no decorrer dos testes foi possível perceber que diâmetros com valores menores que 17,4 também proporcionam bons desempenhos, sendo essa qualidade garantida, também, pelos parâmetros de projeto escolhidos.

5.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

As resistências mecânicas à compressão das amostras relacionadas à metodologia de corte estão apresentados na Tabela 13 e na Figura 28.

Figura 28 - Resistência Mecânica média a compressão das amostras



Fonte: Autor

As análises estatísticas dos dados encontram-se no Tabela 13, a seguir.

Tabela 13 - Dados estatísticos dos resultados de resistência à compressão das amostras impressas

	Aplicação da carga na direção perpendicular ao sentido de impressão		Aplicação da carga na direção paralela ao sentido de impressão	
	Retificado	Lixado	Retificado	Lixado
Desvio Padrão	11,29	8,75	11,94	9,68
Variância	127,40	76,49	142,46	93,68

Fonte: Autor

Ao analisar a Figura 28, pode-se observar que, para ambas as direções de aplicação de carga, a resistência à compressão foi muito menor nas amostras lixadas quando comparadas as amostras produzidas com o auxílio da retífica, já para as amostras cilíndricas, seus dados não foram considerados devido a avarias causadas aos corpos de prova no momento da extração (esse ponto será discutido com mais detalhes na seção 5.3). Isso se dá, principalmente, pela dificuldade em controlar as dimensões das arestas dos cubos quando estes são lixados. Além disso, outro grande desafio é conseguir faces 100% paralelas entre si. Esta diferença é pertinente devido à distribuição dos esforços na amostra. Quando as faces sujeitas à aplicação da carga não são paralelas, a distribuição da força não é homogênea, fazendo com que certas áreas suportem cargas maiores em relação a outras, fato que influencia nos valores finais de resistência.

Igualmente, observando a Tabela 13, ao comparar os resultados das amostras ensaiadas nos sentidos perpendicular e paralelo a direção de impressão, é possível concluir

que uma pequena redução das resistências se fez presente provavelmente associada ao efeito de cisalhamento induzido pelas juntas entre camadas (LE *et al.*, 2012b).

Ademais, segundo (NERELLA; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019), uma possível explicação para as discrepâncias dos resultados encontrados baseia-se no fato de que as amostras, em testes de compressão, geralmente falham ao longo dos planos de ruptura (cisalhamento) que separam o núcleo da amostra, que se encontra submetido à compressão triaxial, das regiões externas, que estão submetidas a um misto de esforços de tração e compressão. Assim, essas interfaces assumem o papel de elo mais fraco que, aliado aos defeitos individuais localizados nos cruzamentos dos planos de cisalhamento, podem desenvolver a formação de fissuras. Adicionalmente, a menor resistência das amostras ensaiadas paralelamente ao sentido de impressão pode ser explicada pela orientação alinhada das interfaces fracas à direção da aplicação da carga, o que pode levar a divisão do corpo de prova e à falha prematura (Figura 29). (NERELLA; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019).

Figura 29 - Rompimento de amostras ensaiadas com aplicação de força no sentido paralelo à direção de impressão.



Fonte: Autor

Para mais, (PANDA; PAUL; TAN, 2017) e (SANJAYAN *et al.*, 2018) explicaram o comportamento anisotrópico dos elementos impressos através de uma hipótese baseada na compactação dependente da direção. Segundo seus estudos, as camadas impressas passam por vários graus de compressão em várias direções variando, então, a resistência à compressão correspondente. Assim, dois tipos de compactação podem ser encontrados em elementos feitos por meio da fabricação aditiva, sendo elas a compactação na extrusora ao longo da direção da deposição do concreto e compactação por peso das camadas depositadas no topo. Assim, diferentes camadas possuem diferentes densidades, devido ao grau de compactação delas. Portanto, infere-se que tanto a presença de interfaces, quanto a variação do grau de compactação são as causas mais prováveis da presença de propriedades mecânicas anisotrópicas observadas em ensaios de compressão (NERELLA; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019).

A partir da análise de variância (ANOVA-TUKEY) dos valores de resistência a compressão, conclui-se que existem diferenças significativas (p menor que 0,05 e sig=1) em dois dos quatro sistemas avaliados. Na Tabela 14, são apresentadas as análises de significância par a par. Assim, com base nos resultados encontrados, pode-se concluir que a resistência à compressão foi negativamente afetada pelo método de extração das amostras impressas. Ainda, percebe-se que a direção de aplicação de carga não influenciou nos valores de desempenho mecânico encontrados, o que vai ao encontro da inconsistência relatada por (WANGLER *et al.*, 2019).

Tabela 14 - Análises de significância (ANOVA-TUKEY)

	Parâmetro p	Alpha	Sig
Lper – Rper	0,00	0,05	1
Rpar - Rper	0,055364	0,05	0
Lpar - Lper	0,25178	0,05	0
Lpar - Rpar	3,29859E-8	0,05	1

Lper: Amostras lixadas e rompidas no sentido perpendicular à direção de impressão; Rper: Amostras retificadas e rompidas no sentido perpendicular a direção de impressão; Lpar: Amostras lixadas e rompidas no sentido paralelo à direção de impressão; Rpar: Amostras retificadas e rompidas no sentido paralelo a direção de impressão.

Fonte: Autor

Adicionalmente, testes de resistência à compressão, considerando os mesmos parâmetros utilizados nos ensaios das amostras obtidas por meio da impressão 3D, foram executados nas amostras moldadas de maneira convencional. Ao final, chegou-se a um valor médio para a resistência igual a 63,96 MPa. A análise comparativa entre as amostras impressas e as moldadas convencionalmente é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 - Análise estatística comparando espécimes impressos e moldados convencionalmente.

Amostras	Método de produção	Média	Desvio Padrão
Força aplicada perpendicularmente ao sentido de impressão	Lixadas	39,41	8,75
	Retificadas	71,64	11,29
Força aplicada paralelamente ao sentido de impressão	Lixadas	33,89	9,68
	Retificadas	67,73	11,94
Cilíndricas	Moldadas convencionalmente	63,96	5,64

Fonte: Autor

Assim, pode-se concluir que processo de impressão não induz a mudanças significativas nos valores de resistência a compressão das amostras desse estudo, o que fornece um bom

indicativo quanto à possibilidade de aplicação da impressão 3D em grande escala, apesar de mais estudos serem necessários. No entanto, quando analisados os valores de desvio padrão dos resultados, percebe-se que as amostras moldadas convencionalmente apresentam números mais confiáveis, uma vez a variação encontra-se próxima a 5%, valor considerado bom segundo análises estatísticas. Isso pode ter como causa, a anisotropia gerada pelo processo de impressão bem como a presença de vazios nos elementos, que podem ocasionar em uma variação considerável de uma amostra para a outra, uma vez que estes defeitos são difíceis de serem mensurados sem a utilização de equipamentos específicos. Assim, percebe-se a necessidade de um maior controle de produção para atingir resultados mais homogêneos quando considerado o desempenho a compressão das amostras impressas.

5.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS REFERENTES AO MÉTODO DE CORTE

A análise da confiabilidade dos dados referentes aos métodos de corte utilizados na produção das amostras foi feita por meio de uma distribuição estatística de Weibull. Muito utilizada na Engenharia de confiabilidade, a distribuição de Weibull, é uma distribuição estatística baseada na resistência do elo mais fraco e possui como objetivo determinar o tempo de vida médio e a taxa de falha de uma determinada população (CYRINO, 2017). Assim, por meio dessa análise foi possível verificar que as amostras produzidas por meio da retífica resultaram em menores variabilidades apresentando assim uma maior confiabilidade. Os valores encontrados para os quatro sistemas testados encontram-se na tabela abaixo:

Tabela 16 - Variabilidade nas dimensões das amostras relacionadas ao método de produção.

Método de produção/Sentido de aplicação de carga	Módulo de Weibull
Rper	7,99
Lper	6,68
Rpar	7,56
Lpar	7,30

Fonte: Autor

Adicionalmente, foram executadas análises estatísticas nas amostras lixadas e retificadas a fim de avaliar as dimensões finais produzidas. Os valores são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Análise Estatística das dimensões das amostras.

Amostras	Retificadas		Lixadas	
	Dimensão (mm)		Dimensão (mm)	
	Eixo x	Eixo y	Eixo x	Eixo y
Análise Estatística				

Valor Médio	19,62	20,22	21,24	21,17
Desvio Padrão	0,56	0,72	1,04	0,93
Variância	0,32	0,52	1,07	0,87

Fonte: Autor

Pode-se observar que os corpos de prova cúbicos produzidos com o auxílio da retífica apresentaram menores variações dimensionais, com desvio padrão na ordem de 0,56 mm para o eixo x e de 0,72 mm para o eixo y , quando comparados aos lixados em estado fresco, que apresentaram valores para o desvio padrão de 1,04 e 0,93 mm, para os eixos x e y , respectivamente. Isso se dá, principalmente, pela dificuldade em garantir precisão nas dimensões dos cubos lixados, uma vez que dependem da habilidade do operador. Ainda, contribuindo para a inviabilização da produção das amostras lixadas, pode-se citar o tempo necessário para o preparo, que tende a ser muito extenso devido à dificuldade em lixar os cubos em idades muito iniciais (a partir de quatro horas após a impressão das amostras).

Quanto aos corpos de prova cilíndricos, estes não se mostraram eficazes para este estudo e, por esse motivo, foram descartados. Essa exclusão se deu, principalmente, devido às restrições dimensionais impostas pelo volume de material que pode ser acondicionado no tubo da extrusora da impressora e pela necessidade de produção de corpos de prova cilíndricos com dimensões superiores a 20 mm de diâmetro e 40 mm de altura, uma vez que dimensões reduzidas acarretaram na quebra do corpo de prova durante o corte, como apresentado na Figura 30. Além disso, a produção de amostras maiores acarretaria em um consumo elevado de material para a viabilização do uso dessa metodologia e, considerando que aproximadamente 90% do volume da amostra cúbica (56×56×45 mm) é descartado, esse desperdício não se justificaria.

Figura 30 - Corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autor

6 CONCLUSÕES

Esse trabalho mostra a influência que o método de produção possui nos resultados de resistência à compressão de amostras confeccionadas por meio da fabricação aditiva de materiais cimentícios. Para esse propósito, foram propostos três métodos de produção distintos a partir de um planejamento que levava em conta tempo de produção, facilidade de operação e desempenho mecânico. Com base nos testes realizados e análises estatísticas de resultados, percebeu-se que das três metodologias empregadas, apenas uma se mostrou tecnicamente viável considerando a infraestrutura disponível no LMCC. Dessa forma, após o desenvolvimento da pesquisa, podem ser propostas as seguintes considerações finais:

1. Concluiu-se, com base na avaliação das propriedades da argamassa em estado fresco, que o intervalo proposto por (MA; LI; WANG, 2018a), no que tange ao diâmetro de espalhamento encontrado no ensaio de mesa de abatimento, de fato representa o intervalo ideal para o melhor desempenho da mistura frente à capacidade de impressão.
2. O desempenho mecânico frente à resistência à compressão das amostras não é afetado significativamente pelo método de produção que utiliza a impressão 3D como forma de construção, apesar da confiabilidade dos resultados ser inferior, o que clama por maiores pesquisas.
3. Nesse estudo, a avaliação estatística que relaciona o sentido de aplicação de carga e a direção de impressão leva a conclusão de que, em termos de resistência a compressão, ambas não apresentam correlações significativas.
4. Ainda, dado os resultados encontrados pela distribuição de Weibull, é possível afirmar que o uso da retífica proporciona uma maior homogeneidade nas dimensões das amostras, uma melhor distribuição de esforços e melhores desempenhos mecânicos. Além disso, quando considerados os dados fornecidos pela análise de variância (ANOVA-TUKEY), conclui-se que o método de produção das amostras possui grande influência nos resultados de resistência à compressão encontrados.

Por fim, pode-se concluir que a impressão 3D possui grande potencial para aplicação em larga escala, principalmente considerando o desempenho mecânico à compressão. No entanto mais pesquisas ainda se fazem necessárias a fim de resolver desafios frente à aderência de camadas e propriedades anisotrópicas do material, bem como propriedades

relacionadas a resistências a tração e flexão do produto impresso. Ainda, com o presente trabalho, foi possível definir uma nova técnica de preparação de CP's impressos que, futuramente, poderá ser aplicada a outros estudos. Ademais, considerando a nova linha de pesquisa que se encontra em desenvolvimento pelo grupo GEMASC, os resultados alcançados no presente estudo poderão ser aproveitados e aplicados em diversos trabalhos como dissertações de mestrado e doutorado.

7 REFERÊNCIAS

- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 4, 2017.
- ABNT. NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação o índice de consistência. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 3, 2002.
- ABNT. Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 71, 2018.
- ABNT NBR 7211. Agregados para concreto - Especificação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro**, p. 8, 2005.
- ALFERES FILHO, R. D. S.; MONTE, R.; DE FIGUEIREDO, A. D. Evaluation of steel fiber orientation in slab elements induced during casting with self-compacting concrete. **Revista Materia**, v. 24, n. 2, 2019.
- ALGHAMDI, H.; NAIR, S. A. O.; NEITHALATH, N. Insights into material design, extrusion rheology, and properties of 3D-printable alkali-activated fly ash-based binders. **Materials and Design**, v. 167, p. 107634, 2019.
- ARAÚJO, R. A. Avaliação de misturas cimentícias para impressão 3D com desempenho térmico otimizado Rísia Amaral Araújo Rísia Amaral Araújo Avaliação de misturas cimentícias para impressão 3D com desempenho térmico otimizado. 2022.
- BUDD, L.; ADEY, P. Hardened properties of high-performance printing concrete. **Environment and Planning A**, v. 41, p. 1366–1385, 2009.
- BUSWELL, R. A. *et al.* 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, v. 112, n. June, p. 37–49, 2018.
- CHAVES FIGUEIREDO, S. *et al.* An approach to develop printable strain hardening cementitious composites. **Materials and Design**, v. 169, 2019a.
- CHAVES FIGUEIREDO, S. *et al.* An approach to develop printable strain hardening cementitious composites. **Materials & Design**, v. 169, p. 107651, 2019b.
- CHEN, Y. *et al.* Effect of different grade levels of calcined clays on fresh and hardened properties of ternary-blended cementitious materials for 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103708, 2020a.
- CHEN, Y. *et al.* Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture. **Cement and Concrete Research**, v. 132, p. 106040, 2020b.
- CHRISTEN, H.; VAN ZIJL, G.; DE VILLIERS, W. The incorporation of recycled brick aggregate in 3D printed concrete. **Cleaner Materials**, v. 4, p. 100090, 2022.
- CONSTRUCT. **Inovação na construção civil: 10 novidades que você precisa conhecer**. Disponível em: <<https://constructapp.io/pt/inovacao-na-construcao-civil-7-novidades-que-voce-precisa-conhecer/>>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- CYRINO, L. **Distribuição de Weibull**. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/distribuicao-de-weibull/>>. Acesso em: 9 jan. 2023.
- DE MATOS, P. *et al.* Effect of TiO₂ Nanoparticles on the Fresh Performance of 3D-Printed Cementitious Materials. **Materials**, v. 15, n. 11, p. 1–18, 2022.
- FREITAS, A. C. **Controle Tecnológico do Concreto: Como Fazer**. Disponível em: <<https://www.inovacivil.com.br/controle-tecnologico-do-concreto/>>. Acesso em: 27 dez. 2022.
- GARRETT, F. **Impressora 3D constrói casa totalmente habitável em 24 horas**. Disponível em: <<https://www.techtodo.com.br/noticias/2017/08/imprensa-3d-constroi-casa-totalmente-habitavel-em-24-horas.ghtml>>. Acesso em: 2 jan. 2023.

HUANG, X. *et al.* Study on the mechanical properties of 3D printing concrete layers and the mechanism of influence of printing parameters. **Construction and Building Materials**, v. 335, p. 127496, 2022.

JI, G. *et al.* Effects of extrusion parameters on properties of 3D printing concrete with coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 325, p. 126740, 2022.

KAZEMIAN, A. *et al.* Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 639–647, 2017.

KLOFT, H. *et al.* Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP). **Cement and Concrete Research**, v. 134, n. December 2019, p. 106078, 2020.

KRUGER, J.; ZERANKA, S.; VAN ZIJL, G. An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 372–386, 2019.

LE, T. T. *et al.* Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 45, n. 8, p. 1221–1232, 2012a.

LE, T. T. *et al.* Hardened properties of high-performance printing concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 3, p. 558–566, 2012b.

LIU, Z. *et al.* 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.

LONG, W. J. *et al.* Printability and particle packing of 3D-printable limestone calcined clay cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 282, p. 122647, 2021.

LOWKE, D. *et al.* Particle bed 3D printing by selective cement activation – Applications, material and process technology. **Cement and Concrete Research**, v. 134, n. December 2019, p. 106077, 2020.

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, 2018a.

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, 2018b.

MANIKANDAN, K. *et al.* Characterizing cement mixtures for concrete 3D printing. **Manufacturing Letters**, v. 24, p. 33–37, 2020.

NAIR, S. A. O. *et al.* Linking fresh paste microstructure, rheology and extrusion characteristics of cementitious binders for 3D printing. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 102, n. 7, p. 3951–3964, 2019.

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, n. October 2018, p. 586–601, 2019.

PANDA, B. *et al.* Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 281–288, 2017.

PANDA, B. *et al.* Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar. **Measurement**, v. 113, p. 108–116, 2018.

PANDA, B. *et al.* Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion based 3D concrete printing. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 610–619, 2019a.

PANDA, B. *et al.* The effect of material fresh properties and process parameters on

buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete. **Materials**, v. 12, n. 13, 2019b.

PANDA, B.; PAUL, S. C.; TAN, M. J. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. **Materials Letters**, v. Volume 209, p. 146–149, 2017.

PANDA, B.; TAN, M. J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymers for 3D concrete printing. **Ceramics International**, v. 44, n. 9, p. 10258–10265, 2018.

PERROT, A. *et al.* Extrusion of cement-based materials - an overview. **RILEM Technical Letters**, v. 3, n. 2018, p. 91–97, 2018.

POTTER, 3D. **3D PotterBot 10 Micro**. Disponível em: <<https://3dpotter.com/printers/potterbot-micro-10>>. Acesso em: 30 dez. 2022.

RAHUL, A. V *et al.* 3D printable concrete with natural and recycled coarse aggregates: Rheological, mechanical and shrinkage behaviour. **Cement and Concrete Composites**, v. 125, p. 104311, 2022.

RAMOS, D. *et al.* Alvenaria Estrutural E Método 3D : Comparativo De Custo para construção de habitações de interesse social. **Revista Integralização Universitária**, v. 14, p. 94–110, 2021.

ROBAYO-SALAZAR, R. *et al.* 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. **Automation in Construction**, v. 146, n. November 2022, p. 104693, 2023.

ROUSSEL, N. Rheological requirements for printable concretes. **Cement and concrete research**, v. 112, p. 76–85, 2018.

SANJAYAN, J. G. *et al.* Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 468–475, 2018.

SANJAYAN, J. G.; JAYATHILAKAGE, R.; RAJEEV, P. Vibration induced active rheology control for 3D concrete printing. **Cement and concrete research**, v. 140, p. 106–293, 2021.

SANTOS, L. *et al.* USO DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO DE PEQUENAS MORADIAS NO BRASIL Uma oportunidade ou uma utopia? Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL-ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES. 2022.

SIKORA, P. *et al.* The effects of nanosilica on the fresh and hardened properties of 3D printable mortars. **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122574, 2021.

SINAPI. **SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9270-sistema-nacional-de-pesquisa-de-custos-e-indices-da-construcao-civil.html?=&t=destaques>>.

SOUZA, M. T. *et al.* 3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects. **Journal of Building Engineering**, v. 32, n. September, 2020.

SOUZA, P. **Veja como a impressão 3D está revolucionando o mercado da construção civil**. Disponível em: <<https://www.voitto.com.br/blog/artigo/impressao-3d-na-construcao-civil>>. Acesso em: 23 nov. 2022.

TING, G. H. A.; TAY, Y. W. D.; TAN, M. J. Experimental measurement on the effects of recycled glass cullets as aggregates for construction 3D printing. **Journal of Cleaner Production**, v. 300, p. 126919, 2021.

TRAN, M. V; CU, Y. T. H.; LE, C. V. H. Rheology and shrinkage of concrete using polypropylene fiber for 3D concrete printing. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103400, 2021.

UPPUNDA, S. **10 Best 3D-Printed Houses Around The World**. Disponível em:

<<https://parametric-architecture.com/10-best-3d-printed-houses-around-the-world/>>. Acesso em: 30 dez. 2022.

WALKER, C. **Empresa chinesa produz 10 casas em 24 horas através de impressão 3D**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/601266/empresa-chinesa-produz-10-casas-em-24-horas-atraves-de-impressao-3d#:~:text=A Winsun New Materials%2C uma,por exemplo - em camadas sobrepostas.>>. Acesso em: 2 jan. 2023.

WANGLER, T. *et al.* Digital Concrete: A Review. **Cement and Concrete Research**, v. 123, n. March, 2019.

WENG, Y. *et al.* Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 600–610, 2018a.

WENG, Y. *et al.* Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 600–610, 2018b.

WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P.; SALET, T. A. M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. **Cement and Concrete Research**, v. 106, n. January, p. 103–116, 2018.

YANG, H.; CHE, Y.; SHI, M. Influences of calcium carbonate nanoparticles on the workability and strength of 3D printing cementitious materials containing limestone powder. **Journal of Building Engineering**, v. 44, n. March, p. 102976, 2021.

YANG, Y. *et al.* 3D-printing ultra-high performance fiber-reinforced concrete under triaxial confining loads. **Additive Manufacturing**, v. 50, p. 102568, 2022.

YUE, H. *et al.* Investigation on applicability of spherical electric arc furnace slag as fine aggregate in superplasticizer-free 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 319, n. December 2021, p. 126104, 2022.

ZHANG, C. *et al.* Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, n. April, p. 103406, nov. 2019a.

ZHANG, Y. *et al.* Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 263–271, 2018.

ZHANG, Y. *et al.* Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 278–285, 2019b.

ZHANG, Y. *et al.* Hardened properties and durability of large-scale 3D printed cement-based materials. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 54, n. 1, p. 1–14, 2021.

SACOMANO, J. B.; GUERRINI, F. M.; SANTOS, M. T. S.; MOCCELLIN, J. V. *Administracao de Producao Para Empresa de Construcao Civil*. São Paulo: Arte & Ciência, 2004.