

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL

GABRIEL COMERLATO COSTA

**IMPRESSÃO 3D DE CONCRETO: EFEITOS DA GEOMETRIA E
PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO NA CONSTRUÇÃO E
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

Farroupilha

2023

GABRIEL COMERLATO COSTA

IMPRESSÃO 3D DE CONCRETO: EFEITOS DA GEOMETRIA E PARÂMETROS
DE DEPOSIÇÃO NA CONSTRUÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia e Engenharia de Materiais para a obtenção do
grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de
Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Impressão 3D de Concreto

Orientador: Prof. Dr. Douglas Alexandre Simon

Farroupilha

2023

CIP - Catalogação na Publicação

C732i

Costa, Gabriel Comerlato, 1995-

Impressão 3D de concreto: efeitos da geometria e parâmetros de deposição na construção e resistência à compressão. / Gabriel Comerlato Costa -- 2023.

79 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) -- (Mestrado profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Farroupilha, 2023.

Orientador: Douglas Alexandre Simon.

1. Resistência de materiais. 2. Manufatura aditiva. 3. Concreto impresso. I. Simon, Douglas Alexandre, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 620.1

GABRIEL COMERLATO COSTA

IMPRESSÃO 3D DE CONCRETO: EFEITOS DA GEOMETRIA E PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO NA CONSTRUÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Branca Freitas de Oliveira - UFRGS

Prof. Dr. Paulo Ricardo de Matos– UFSC

Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti – PPGTEM/IFRS

Orientador: Prof. Dr. Douglas Alexandre Simon – PPGTEM/IFRS

Apresentado e aprovado em 28 de março de 2023.

Local da defesa: Farroupilha-RS

AGRADECIMENTOS

Com muito entusiasmo e gratidão, gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que tornaram possível o meu trabalho.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, que me educaram com amor e carinho, me ensinando valores fundamentais que foram essenciais para chegar até aqui.

Não posso deixar de agradecer à empresa Powermig Automação e Soldagem, que acreditou no potencial da minha pesquisa e cedeu o uso do braço robótico, o que foi fundamental para o desenvolvimento do meu trabalho e para os resultados obtidos. Além disso, gostaria de expressar minha gratidão ao Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS), com destaque ao campus em que minha pesquisa aconteceu, Farroupilha, que me proporcionou um espaço para aprendizado fora da minha área de ensino inicial, contribuindo significativamente para a minha formação acadêmica e ao meu desenvolvimento.

Gostaria também de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Douglas Alexandre Simon, que sempre me apoiou e seguiu firme ao longo da pesquisa, mesmo diante das adversidades. Sua orientação foi fundamental para o sucesso do meu trabalho, e sou grato por ter tido a oportunidade de trabalhar com ele.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer à minha namorada, Larissa Dresch, que me apoiou incondicionalmente em todo o processo do mestrado, incentivando e contribuindo para que o mesmo acontecesse da melhor forma possível. Esse apoio foi essencial para que eu pudesse alcançar este objetivo. Mais uma vez, expresso meus sinceros agradecimentos a todos que fizeram parte desta jornada comigo.

“Se vi mais longe foi por estar de pé sobre
ombros de gigantes”

Bernard de Chartres

RESUMO

A construção civil é um dos setores fundamentais para o desenvolvimento da sociedade. Entretanto, poucos avanços em métodos construtivos foram desenvolvidos nas últimas décadas, sendo que a maior parte das pesquisas se atentaram a melhorar a previsibilidade por meio de cálculo, o desenvolvimento de materiais de maior eficiência ou a incorporação de cargas ao concreto. A impressão 3D de argamassa é utilizada na construção civil para construir casas, pontes e obras especiais, com formas distintas e liberdade arquitetônica. Este trabalho avaliou a Impressão 3D como um novo método construtivo, mensurando o efeito dos parâmetros de impressão na imprimibilidade e resistência à compressão. Os resultados indicam que uma menor altura de camada e uma menor velocidade de deposição acentua a ligação entre as camadas, evitando o colapso prematuro do artefato impresso. Não foi identificada anisotropia na resistência à compressão, porém esta ficou 56% abaixo da resistência da argamassa, devido a presença de vazios. Dessa forma, foi possível validar a composição utilizada, a técnica de bombeamento e os parâmetros de impressão para a construção, auxiliando na sua implantação em larga escala para, por exemplo, casas populares de baixo custo.

Palavras-chave: Argamassa. Manufatura aditiva. Métodos construtivos alternativos. Concreto impresso.

ABSTRACT

The construction industry is one of the fundamental sectors for the development of society. However, few advances in construction methods have been developed in recent decades, and most research has focused on improving predictability through calculation, the development of more efficient materials, or incorporating loads into concrete. 3D printing of mortar is used in civil construction to build houses, bridges, and special structures with distinct shapes and architectural freedom. This study evaluated 3D printing of mortar as a new construction method, measuring the effect of printing parameters on printability and compressive strength. The results indicate that a lower layer height and lower deposition speed accentuate the bond between the layers, avoiding premature collapse of the printed artifact. No anisotropy was identified in compressive strength, but it was 56% lower than the strength of the mortar due to the presence of voids. Thus, it was possible to validate the mixture used, the pumping technique, and the printing parameters for construction, assisting in its large-scale implementation for, for example, low-cost housing.

Keywords: Mortar. Additive manufacturing. Alternative constructive methods. Printed concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas de um processo de manufatura aditiva exemplo. Da esquerda para a direita: Modelo em CAD, modelo fatiado e objeto impresso. Adaptado de Junk e Kuen (2016).	5
Figura 2 – Exemplos de impressão em concreto do tipo counter crafting (a), trabalho da universidade de Loughborough (b); impressão pelas empresas Winsun (c) e Xtree (d); impressão de residência em Apis-cor na França (e); e projeto denominado mini-builder na Espanha (f).	6
Figura 3 - O aumento da manufatura aditiva para aplicações de construção desde o início do conceito em 1997. Adaptado de Buswell <i>et al.</i> (2018).....	7
Figura 4 - Funcionamento da Countor Crafting. Zhang, Khoshnevis (2013).	8
Figura 5 – Sistema de impressão 3D em pórtico. Adaptado de Lee <i>et al.</i> (2012).....	9
Figura 6 - Requisitos reológicos do processo de impressão 3D de argamassa. Adaptado e traduzido de Zhang <i>et al.</i> (2021)	11
Figura 7 – Exemplo de teste de <i>printability</i> de argamassa. Adaptado de WOLFS <i>et al.</i> (2019)	12
Figura 8 - Tensão de Cisalhamento para diferentes fluídos. Adaptado de Zhang et al, 2021.	14
Figura 9 - Janela de impressão em função do tempo. Adaptado de Buswell et al. (2018)	15
Figura 10 - Teste de <i>buildability</i> empírica para testar estabilidade vertical da composição da mistura ou dos parâmetros de impressão. Adaptado de Le et al. (2012)	16
Figura 11 - Possível deformação do elemento final ao longo dos depósitos de camadas verticais. Adaptado de Buswell et al. (2018)	17
Figura 12 - Impressão 3d em concreto, configuração maciça. Adaptado e traduzido de Guamán-Rivera <i>et al.</i> (2022)	18
Figura 13 - Impressão 3d em concreto, configuração reforçada. Adaptado e traduzido de Guamán-Rivera <i>et al.</i> (2022)	18
Figura 14 - Diagrama tensão-deformação do concreto em um teste de compressão típico e o desenvolvimento de microfissuras durante a carga aplicada. Adaptado de Mang et al. (2003).....	19
Figura 15 - Diagrama tensão-deformação do concreto em um teste de tração típico e o desenvolvimento de microfissuras durante a carga aplicada. Adaptado de Mang et al. (2003).....	20
Figura 16 - Fluxograma de pesquisa	24
Figura 17 - Esquema do sistema completo de bombeamento e impressão.....	26

Figura 18 - Braço robótico utilizado na pesquisa para movimentação do tubo de deposição de argamassa	27
Figura 19 – Colapso prematuro da amostra por falta de resistência ao peso próprio	28
Figura 20 - Esquema de percurso das paredes: a) simples, b) dupla e c) tripla.	29
Figura 21 - Variáveis aplicadas no elemento impresso em 3D.....	30
Figura 22 - Esquema para extração dos corpos de prova da impressão.	33
Figura 23 - Extração do Corpo de Prova na direção “z”.	34
Figura 24 - Corpo de prova contínuo, sem a divisão e ajuste para medida final.....	35
Figura 25 - Corpos de Prova antes do rompimento.....	36
Figura 26 - Prensa hidráulica com corpo de prova para rompimento.....	37
Figura 27 - Impressão da amostra S45-38 no momento antes da queda	39
Figura 28 - Valores de largura e altura de camada na parede simples, S45-38.	40
Figura 29 - Empacotamento nas amostras de parede dupla: a) D45-38, b) D55-38, c) D35-38, d) D45-44, e) D45-32, f) D45-38-30.....	41
Figura 30 - Altura total das amostras duplas antes do colapso	42
Figura 31 – Quantidade de camadas e altura média total antes do colapso em centímetros	43
Figura 32 – Altura média das amostras duplas comparada com altura média das 4 últimas camadas.....	45
Figura 33 – Altura média total x largura média das amostras duplas.....	46
Figura 34 – Quantidade de camadas x largura média das amostras duplas.....	47
Figura 35 - Parâmetros avaliados na amostra T43-38.	48
Figura 36 - Valores de largura média das camadas simples (S45-38 em verde), dupla (D45-38 em azul escuro) e tripla (T45-38 em laranja). A altura média é indicada em azul.	49
Figura 37 - Indicação de vazios encontrados na amostra D45-38-30. Números correspondem a largura em milímetros (medida na horizontal)	51
Figura 38 - Comparativo entre a amostra D45-38-30 (deste trabalho) (a), e resultados de Tay et al., 2019 (b) e Ma et al., 2018 (c).....	53
Figura 39 - Resistência à compressão por amostra	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composições de argamassa para 3DCP, adaptado de PAUL <i>et al</i> , 2018	22
Tabela 2 - Composição de argamassa utilizado.....	25
Tabela 3 - Programação para cada amostra	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo geral	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 MANUFATURA ADITIVA.....	4
2.2 MANUFATURA ADITIVA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	5
2.3 SISTEMAS DE IMPRESSÃO	8
2.4 CONCRETO E ARGAMASSA.....	9
2.5 PROPRIEDADES DA ARGAMASSA PARA MANUFATURA ADITIVA	11
2.5.1 <i>Printability</i>	12
2.5.2 Bombeamento	13
2.5.3 Janela de Impressão	14
2.5.4 <i>Buildability</i>	15
2.6 CONSTRUÇÃO DE PAREDES.....	17
2.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ELEMENTO IMPRESSO.....	19
2.7.1 <i>Resistência da Argamassa</i>	19
2.7.2 <i>Impacto do processo nas propriedades</i>	20
2.7.3 <i>Composições de argamassa</i>	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 MATERIAIS	25
3.2 MISTURA DE ARGAMASSA.....	25
3.3 BOMBEAMENTO DE ARGAMASSA	26
3.4 IMPRESSÃO	27
3.4.1 Geometria do Elemento impresso	28
3.4.2 <i>Pumpability e Buildability</i>	30

3.5 CARACTERIZAÇÃO	31
3.5.1 Teste de <i>Slump</i>	31
3.5.2 Empacotamento de camada.....	32
3.5.3 Avaliação dos vazios	33
3.5.4 Extração das amostras.....	33
3.5.5 Ensaio de compressão	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 TESTE DE SLUMP	38
4.2 EMPACOTAMENTO DE CAMADAS.....	38
4.2.1 Amostras com paredes simples	38
4.2.2 Amostras com paredes duplas	41
4.2.3 Amostras com paredes triplas	48
4.2.4 Avaliação dos vazios	50
4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	53
5 CONCLUSÕES	56
5.1 POSSIBILIDADES DE TRABALHOS FUTUROS.....	57
REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

A automação das indústrias vem crescendo desde o século 20, afetando diversas áreas e segmentos, mas para a indústria da construção civil, a digitalização ainda está começando (KHOSHNEVIS, 2004; REITER *et al*, 2018). Na última década, a construção civil se mostrou arcaica frente às demais indústrias, trazendo baixa produtividade de trabalho, altas taxas de acidentes e má qualidade de trabalho e controle de processos (HOU *et al.*, 2021; KHOSHNEVIS, 2004; MECHTCHERINEA *et al*, 2019). Desta forma, nos últimos anos, a forma de trabalhar com o concreto começou a mudar, e surge a impressão 3D em concreto, uma tecnologia inovadora e com grande potencial para automatizar o canteiro de obras como meio de reduzir as taxas de acidente e lesões, baixa eficiência, dependência de mão de obra e altos custos (ROUSSEL, 2018; GEERT DE SCHUTTER, MECHTERINE, HABERT, 2018; LE *et al*, 2012; MECHTCHERINEA *et al*, 2019).

A manufatura aditiva em concreto ou argamassa é um novo método de construção onde é possível moldar camadas finas sobrepostas para obter uma construção tridimensional, possibilitando a produção de formas complexas sem a necessidade de fôrmas, sendo uma vantagem considerável sobre as técnicas convencionais de construção (LE *et al*, 2012; MECHTCHERINEA *et al*, 2019; MALAEB *et al*, 2015; SANJAYAN *et al*, 2018). O processo consiste na deposição sequencial de camadas de um extrudado contínuo de concreto com alto teor de cimento, bombeado através de um bico, movimentado por um braço ou pórtico robótico, que posiciona o material durante o processo de construção (BUSWELL *et al*, 2018). Entretanto, ainda existem diversos desafios a serem resolvidos para que a tecnologia possa substituir o método atual e ser amplamente utilizada como ajustes nos parâmetros de impressão, método de impressão mais aconselhável, ligação entre camadas e composições de argamassas econômicos e viáveis (SANJAYAN *et al*, 2018; HOJATI *et al*, 2018).

Quando comparado com as técnicas usuais de construção a partir de fôrmas ou de elementos pré-fabricados, a construção por impressão tende a levar a redução do tempo de construção, evita desperdícios de material, o que aumenta a sustentabilidade ambiental na execução e permite uma liberdade arquitetônica para formas complexas (KHOSHNEVIS, 2004; WARSZAWSKI, NAVON, 1998; SANJAYAN *et al*, 2018). A possibilidade de poder moldar estruturas sem fôrmas é uma grande

vantagem em termos de tempo de produção e custos, sendo que essa etapa representa entre 35-60% dos custos totais de estruturas de concreto armado (LLORET *et al*, 2014). No entanto, uma compreensão das particularidades do processo de impressão e a sua relação com as propriedades do elemento impresso ainda estão em pesquisa e necessitam de maiores estudos para melhores definições (WOLFS, BOS, SALET, 2018; NERELLA, KRAUS, MECHTCHERINE, 2020).

Como o material depositado em cada camada deve adquirir resistência ao escoamento em um curto tempo, permitindo que novas camadas sejam sobrepostas sem deformação, a argamassa precisa possuir requisitos reológicos que façam com que o material possa ser impresso sem uso de fôrmas. Dessa forma, o controle do tempo de cura e compactação, a manutenção da trabalhabilidade, capacidade de construção por impressão (denominada *buildability*) e de bombeamento (*pumpability*) são primordiais para favorecer a aplicação desta tecnologia em obras (SANJAYAN *et al*, 2018). Algumas pesquisas, como a *contour crafting* (KHOSHNEVIS *et al*, 2001), *concrete printing* (LE *et al*, 2012) e *CONPrint3D* (NERELLA *et al*, 2016) já obtiveram resultados promissores utilizando-se de sistemas de bombeamento e movimentação de impressão distintos.

Diversas composições de argamassa são descritas na literatura como aptas para o bombeamento, deposição e manufatura de peças em concreto ou argamassa. Dentre os principais componentes presentes estão o cimento, as cinzas volantes, adições pozolânicas e sílica ativa (MALAEB *et al*, 2015; NERELLA *et al*, 2016; LE *et al*, 2012; ANELL, 2015). Entretanto, ainda faltam estudos sobre os parâmetros otimizados de deposição da argamassa para que impressão.

A impressão de concreto é um dos métodos mais inovadores para remodelar a forma com que a construção funciona atualmente. Entretanto, a falta de domínio sobre os parâmetros de composição da mistura, sistema de bombeamento e definição do percurso de deposição dificultam a comparação dos elementos impressos com os construídos por derramamento (técnica usual de conformação usando fôrmas para conformar concreto e argamassa).

Esta pesquisa visa analisar diferentes parâmetros de impressão de argamassa, como quantidade de camadas: simples, dupla e tripla, variação na largura média de camada, variação na altura de deposição e sua influência na capacidade de

construção do elemento final. Foram preparadas amostras impressas e moldadas de forma usual para avaliar a influência da largura e distância de parede impressa, altura da camada e grau de empacotamento da camada depositada a fim de medir a influência sobre a facilidade de impressão, a geração de defeitos e a resistência à compressão do elemento.

1.2 Objetivos

Nesta seção estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa busca obter uma deposição contínua de argamassa por impressão 3D e avaliar o comportamento da impressão e a resistência a compressão do elemento impresso nas direções x, y e z.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão listados abaixo:

- a) Desenvolver um equipamento capaz de realizar o bombeamento adequado de argamassa por uma tubulação flexível;
- b) Estabelecer os parâmetros para deposição da argamassa a partir de um bico manipulado por um braço robótico;
- c) Desenvolver uma composição de argamassa que possua *pumpability* e *buildability*;
- d) Avaliar a resistência à compressão da argamassa desenvolvida;
- e) Avaliar a resistência à compressão de corpos de prova extraídos do elemento impresso;
- f) Avaliar a influência da quantidade de paredes verticais na capacidade de construção da altura do elemento impresso.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Manufatura Aditiva

O sucesso da rápida industrialização ao redor do mundo pode ser explicado pelos processos de automação que levaram a uma forma mais rápida e barata de produção. A manufatura aditiva ou tecnologia de impressão tridimensional, surgiu como um processo de cura de resinas poliméricas por luz ultravioleta localizada, camada sobre camada, em oposição à fabricação subtrativa e fabricação formativa (ASTM, 2021; PAUL *et al.*, 2018). A liberdade geométrica, a facilidade de construção e a ausência de geração de resíduos chamaram a atenção desde o início.

A impressão dimensional (3DP) foi introduzida pela primeira vez em 1987 como um meio de gerar protótipos de forma rápida (HULL, 1986; CHUA; LEONG, 2014). A ASTM (2012) catalogou as tecnologias de impressão 3D em sete grupos, que foram desenvolvidos para funções diferentes e encontram-se disponíveis no mercado, sendo por: jato de aglutinante (*binder jetting*), deposição de energia direcionada (*Directed Energy Deposition*), por extrusão de material (*Material Extrusion*), por jato de material (*Material Jetting*), por leito de pó (*Powder Bed Fusion*); por laminação de folhas (*Sheet Lamination*) e por fotopolimerização (*Vat photopolymerization*).

O processo de fabricação de um elemento impresso em manufatura aditiva difere dos usuais de forma fundamental. Inicialmente é realizada uma modelagem computacional em software CAD (*computer aided design*). Após, um arquivo é gerado contendo informações sobre a geometria do objeto modelado, normalmente em formato “stl”. Este arquivo é então importado em um software de fatiamento (*slicer*), que irá transformar o modelo em uma sucessão de camadas sob camadas com orientações em um plano de coordenadas. O *slicer* também define o caminho de deposição e gera uma sequência de instruções para a impressora executar a deposição coordenada do material. No *slicer* também são definidos os parâmetros de execução como velocidade de impressão, altura de camada, geração de suportes, aquecimentos e resfriamentos (para fusão do polímero, por exemplo), potência da fonte de energia (para sinterização de metais, por exemplo), entre outras. A execução é então realizada pela deposição, cura, laminação ou agregação de partículas, camada por camada, até a obtenção física do modelo desenhado em CAD. A Figura 1 mostra um exemplo destas etapas.



Figura 1 – Etapas de um processo de manufatura aditiva exemplo. Da esquerda para a direita: Modelo em CAD, modelo fatiado e objeto impresso.

Adaptado de Junk e Kuen (2016).

Dada a liberdade construtiva e o campo de aplicação, manufatura aditiva tem atraído o interesse de diversos segmentos de indústrias, sendo usada em aplicações distintas como para produzir sistema de irrigação para órgãos na área médica, coleções de joias de metais nobres, motor de foguetes, pontes de aço, componentes para a indústria aeronáutica, equipamento militar, peças de reposição e outros (HAGER *et al.*, 2016; GIBSON *et al.*, 2010; VAEZI *et al.*, 2013; HUANG, 2013; MUELLER *et al.*, 2016; WERKHEISER *et al.*, 2015).

2.2 Manufatura Aditiva na Construção Civil

A primeira tentativa registrada de imprimir em 3D um material cimentício foi por Joseph Penga em 1997 (YASSIN *et al.*, 2020; PEGNA *et al.*, 1997). Os primeiros estudos na área de impressão 3D de concreto (3DCP) se concentraram nas propriedades dos materiais. SIDDIKA *et al.* (2019), BUSWELL *et al.*, (2018), WANGLER *et al.* (2019) e LU *et al.* (2019) revisaram as propriedades e sistematizaram diversos requisitos para impressão de argamassa.

Uma outra área de estudos se concentrou na parte de classificação do processo por mecanismo de impressão (YIN *et al.*, 2018; TAY *et al.*, 2017; PAOLINI *et al.*, 2019; CAMACHO *et al.*, 2018; CHAVEIRO *et al.*, 2019; LABONNOTE *et al.*,

2016). Outros estudos realizados foram focados em tipos de impressão 3D específicos, com foco em técnicas baseadas em extrusão (DUBALLET *et al.*, 2017; WANGLER *et al.*, 2016), técnicas de ligação em leito de pó (LOWKE *et al.*, 2018; ASPRONE *et al.*, 2018) e métodos de reforço para impressão de argamassa (ASPRONE *et al.*, 2018). Alguns exemplos são apresentados na Figura 2 .



Figura 2 – Exemplos de impressão em concreto do tipo counter crafting (a), trabalho da universidade de Loughborough (b); impressão pelas empresas Winsun (c) e Xtree (d); impressão de residência em Apis-cor na França (e); e projeto denominado mini-builder na Espanha (f).

O método de *contour crafting* (KHOSHNEVIS & DUTTON, 1998) é baseado na extrusão de concreto de um bocal movimentado por um pórtico robótico. As camadas de concreto extrudadas são utilizadas para fazer a forma desejada. Espátulas presas ao bocal proporcionam um acabamento na superfície externa do elemento impresso. O caminho de deslocamento é gerado por meio de um software vinculado a um braço robótico (KHOSHNEVIS, 2004).

Nos últimos anos diversas técnicas e pesquisas surgiram com o intuito de desenvolver meios otimizados e proprietários de processo de construção, como pode ser visto na Figura 3.

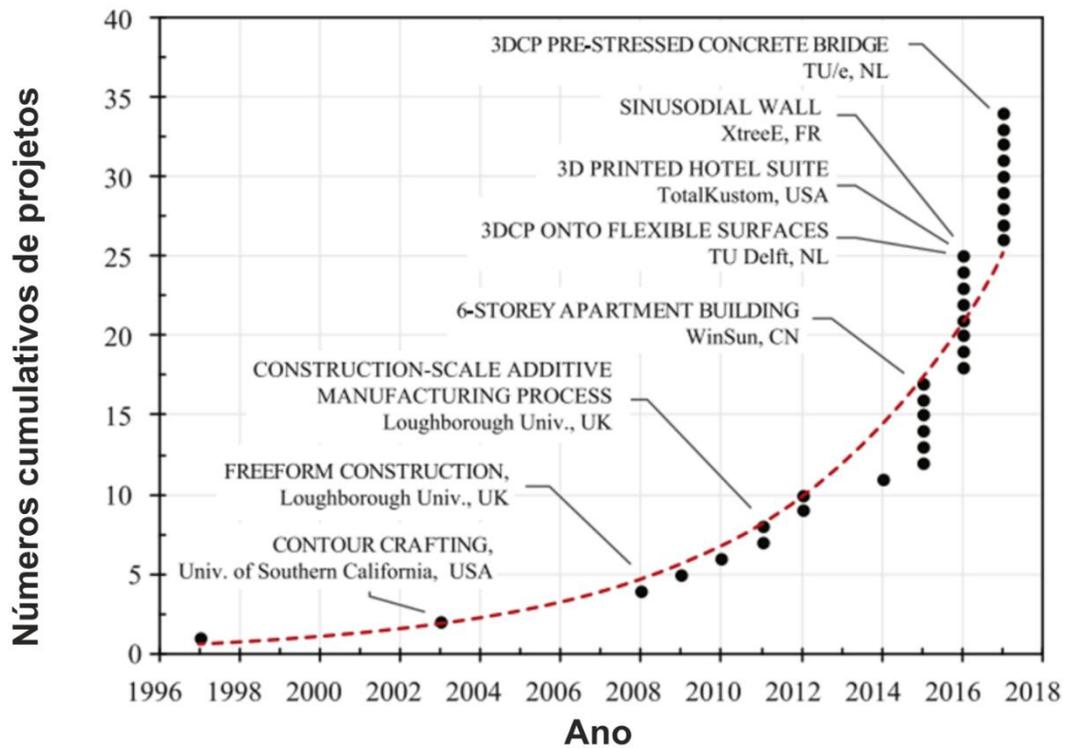


Figura 3 - O aumento da manufatura aditiva para aplicações de construção desde o início do conceito em 1997. Adaptado de Buswell *et al.* (2018)

Alguns métodos similares ao *contour crafting* (Figura 4) foram desenvolvidos, como o *Concrete Printing*, em que utiliza um bocal de tamanho inferior, proporcionando maior precisão e mais tempo de impressão (BUSWELL *et al.*, 2012). Métodos totalmente divergentes dos citados acima também foram criados, como impressão com um braço robótico de 6 eixos, explorando a potencialidade geométrica da impressão 3D, exemplificado com pilares em formatos de troncos de árvores, e um método de continuidade tangencial (GOSSELIN *et al.*, 2016).

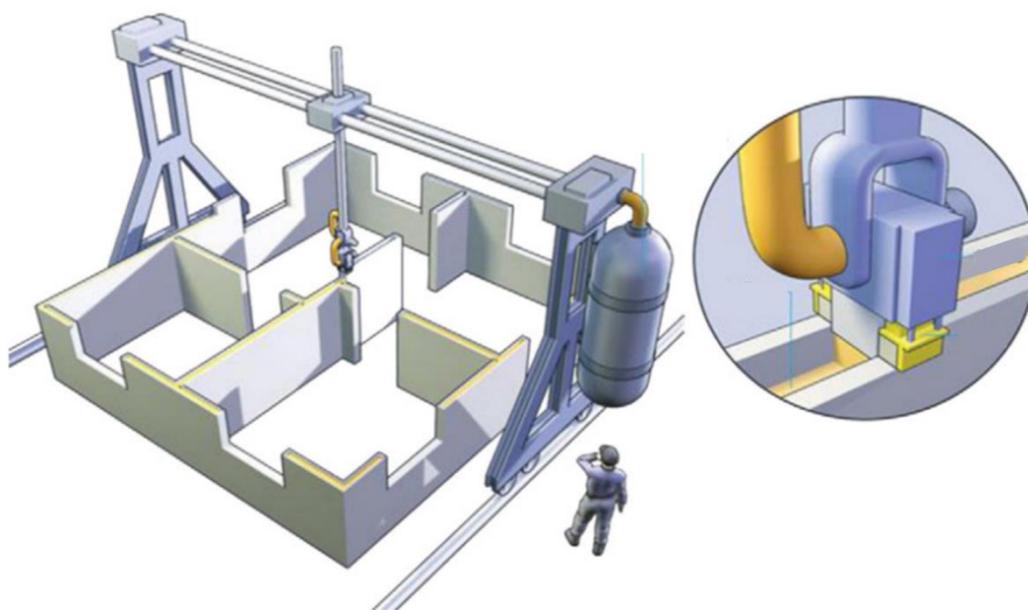


Figura 4 - Funcionamento da Countor Crafting. Zhang, Khoshnevis (2013).

Wangler *et al.* aponta para diversas dificuldades e desafios que precisam ser solucionados para permitir uma aplicação industrial abrangente, como: controle de bombeamento do concreto, controle de hidratação, adição de armaduras e uso de fibras como reforço (WANGLER *et al.*, 2016; YIWEI *et al.*, 2016).

Apesar do 3DCP trazer benefícios, ainda é necessário o domínio da técnica para que sejam medidos os ganhos em relação a redução de custo e desperdício de materiais (NGO *et al.*, 2018), não utilização de forma (LIM *et al.*, 2020), melhores condições de trabalho (MECHTCHERINE *et al.*, 2019), diminuição do impacto ambiental (MOHAMMAD *et al.*, 2020) e liberdade geométrica de estruturas (AGUSTI *et al.*, 2017; LIM *et al.*, 2012). Também precisam ser avaliados o potencial sustentável, energético e ambiental de edifícios de 3DCP frente as construções convencionais (AGUSTI-JUAN; HABERT, 2016; ASPRONE *et al.*, 2018; CAMACHO *et al.*, 2018).

2.3 Sistemas de Impressão

O método de impressão de argamassa direciona o bocal de deposição de material até o ponto escolhido por meio de um sistema de movimentação, podendo

ser por meio de braços robóticos (REITER *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2018; BOS *et al.*, 2016), um conjunto suspenso por polias e cabos (BARNETT *et al.*, 2015) ou por um sistema de pórticos, com movimentação nos eixos “X” e “Y” e com incremento em “Z”, similar à técnica de impressão de polímeros por deposição de filamento fundido (FDM) (LE *et al.*, 2012). Dentre estas técnicas o sistema de movimentação com braços robóticos o que traz maior liberdade geométrica nas impressões 3D de concreto, mas com velocidades inferiores de deposição de material (LI *et al.*, 2020). As impressões com pórticos são as mais utilizadas (BOS *et al.*, 2016), e possuem maior velocidade de impressão, são mais simples em caso de aumento da área de impressão e conseguem suportar maior carga útil, visto seu sistema mais robusto (KHAN, SANCHEZ, ZHOU, 2020), Figura 5.



Figura 5 – Sistema de impressão 3D em pórtico. Adaptado de *Lee et al.* (2012)

2.4 Concreto e argamassa

A construção civil está associada ao concreto, sendo o material mais utilizado no mundo para a produção de obras civis, servindo como estrutura, elemento de

design como acabamentos, revestimentos e produtos para montagem. Apesar da manufatura aditiva do concreto ser o termo mais usual encontrado na literatura, em inglês *3d printed concrete* (3DCP), a maior parte das tecnologias e pesquisa referem-se à deposição de argamassa, ou seja, o agregado graúdo está ausente na mistura. Dessa forma, os termos são considerados intercambiáveis neste trabalho.

Na Impressão 3D de argamassa, há duas formas distintas de se referir ao método: impressão 3D de argamassa ou impressão 3D de concreto, ambas corretas. A argamassa é uma mistura de cimento, areia (agregado miúdo) e água utilizada, normalmente, para fins não estruturais, enquanto o concreto é composto por cimento, areia (agregado miúdo), pedra (agregado graúdo) e água, sendo utilizado para a produção de elementos estruturais. Para fins de simplificação na forma de descrever o processo, será utilizado o termo impressão 3D de argamassa, visto que a mistura não possui agregado graúdo, entretanto possui resistência à compressão suficiente para ser considerado um elemento estrutural.

O concreto é elaborado por meio de uma dosagem de componentes, ou composição de mistura, que possui como elementos secos o cimento, agregados (graúdo e miúdo com variação de granulometria). Junto a estes elementos é possível a adição de alguns itens secos (casca de arroz, areia industrial, polímeros) e líquidos (plastificantes, retardadores de pega, aceleradores de reação). A hidratação é realizada com água, que tem a função de controlar a fluidez e moldabilidade e tem ação na realização da pega e endurecimento.

Visto que grande parte das pesquisas de impressão 3D trabalham com pressurização na tubulação, para bombeamento do material, a utilização de materiais secos com maior granulometria dificultam a movimentação destes fluídos. Logo, a escolha por viscosidades menores da pasta de argamassa é importante para viabilizar o bombeamento e impedir entupimentos na tubulação. A fim de manter evitar a adição excessiva de água, são utilizados de aditivos e plastificantes para um controle mais adequado da viscosidade, tempo de pega e velocidade de endurecimento.

2.5 Propriedades da argamassa para manufatura aditiva

A necessidade de bombeamento, o requisito de deposição de camadas sobre camadas com baixo tempo entre elas, a adesão entre camadas, o deslocamento pós-deposição e outras características são diretamente dependentes das propriedades da argamassa, ou seja, da escolha adequada dos componentes e concentrações que compõe sua composição. A diferença entre o 3DCP e o método tradicional de conformação do concreto por derramamento são visíveis, especialmente quanto ao seu comportamento no estado fresco e endurecido e a relação deste com a propriedades mecânica do material impresso (WOLFS *et al*, 2019).

Para a impressão de um elemento de concreto, ele precisa inicialmente ser bombeado por algum método mecânico com vazão constantes, por toda a tubulação entre a bomba e o bico de deposição, sem causar o bloqueio ou o entupimento da tubulação ou do bocal de impressão ou gerar variação no fluxo de extrusão. Logo após a saída do bocal e deposição é necessário que ele apresente resistência ao escoamento a fim de preservar a forma impressa e resistir ao peso das demais camadas que serão depositas sucessivamente. Dessa forma, os parâmetros fundamentais de *printability*, bombeamento, janela de impressão e *buildability* são discutidos abaixo na Figura 6.

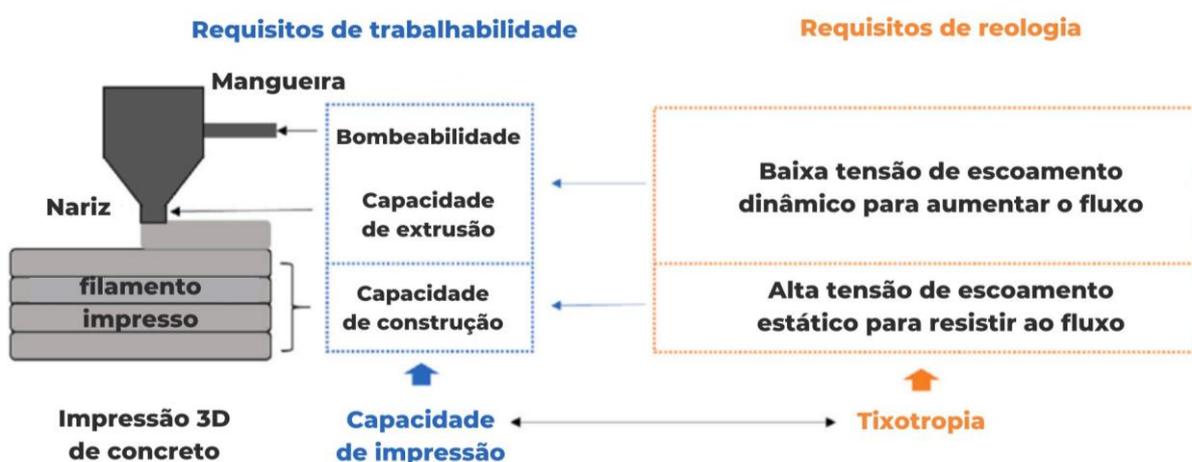


Figura 6 - Requisitos reológicos do processo de impressão 3D de argamassa.
Adaptado e traduzido de Zhang *et al.* (2021)

2.5.1 *Printability*

A *printability* poderia ser traduzida em imprimibilidade, ou seja, sua capacidade de um material em conseguir ser impresso em uma dada técnica de impressão. No 3DCP esta propriedade está atrelada à capacidade do concreto em formar um elemento de apoio ou filamento contínuo e homogêneo, seguindo parâmetros pré-definidos, como largura do filamento, altura de deposição, espessura e retiniedade do elemento impresso (LE *et al*, 2012). Para BUSWELL *et al.* (2018, apud RUBIN, 2021), existem três requisitos para que um elemento impresso seja aceito quanto a estes parâmetros: a camada deve estar livre de defeitos, rachaduras ou rupturas do material, incluindo descontinuidade ou coesão inadequada; as bordas das camadas devem ser visíveis e definidas; e as camadas devem apresentar conformidade dimensional. Com a garantia destes se obtém um elemento final com parâmetros controlados e um resultado adequado, Figura 7.



Figura 7 – Exemplo de teste de *printability* de argamassa. Adaptado de WOLFS *et al.* (2019)

A forma de avaliar este parâmetro é visual (BUSWELL *et al.*, 2018) e a avaliação pode ser feita elaborando uma primeira bateria de testes de impressão para

avaliação das condições de propriedades. Este é um dos parâmetros mais importantes para impressão de argamassa, pois atesta a qualidade e capacidade de construção das peças, e a sua avaliação incorreta pode gerar pontos de fragilidade e impedir a execução de geometrias ou de elementos.

2.5.2 Bombeamento

A capacidade de bombeamento é a facilidade com que a mistura fresca é transportada da bomba para o bico de extrusão (LE *et al.*, 2012). Um dos maiores problemas associados ao bombeamento é o bloqueio da mangueira de bombeamento por segregação da mistura (BUSWELL *et al.*, 2018), o que ocasiona a pressurização do sistema, remoção da água de hidratação da mistura e interrupção momentânea ou permanente da impressão.

O comportamento de fluxo de argamassa é descrito pelo modelo de Bingham (Figura 8). Este modelo descreve fluidos não-newtonianos e é caracterizado pela característica de sólido em valores baixos da tensão de cisalhamento, mas como um fluido newtoniano quando a tensão de cisalhamento ultrapassa um valor crítico, segundo a equação 1, onde τ é a Tensão de cisalhamento (Pa), τ_0 é a Tensão inicial de Bingham (Pa), μ_∞ é a Viscosidade newtoniana limite (Pa.s), também chamada de Viscosidade plástica de Bingham e $\dot{\gamma}$ é a Taxa de deformação (s⁻¹).

$$\text{Eq. 1} \quad \tau = \tau_0 + \mu_\infty \dot{\gamma}$$

Para alta fluidez do material, a tensão de escoamento e a viscosidade devem ser as mais baixas possíveis (LI *et al.*, 2020). Entretanto, muitos fatores podem influenciar na viscosidade do material, como temperatura, tempo, preparação da argamassa.

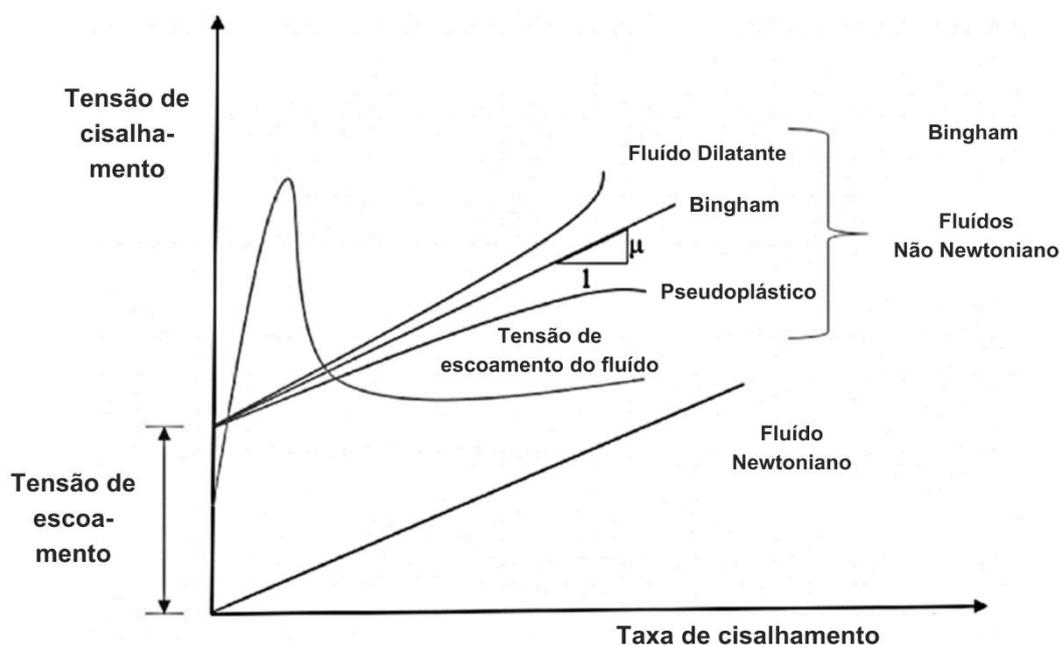


Figura 8 - Tensão de Cisalhamento para diferentes fluidos. Adaptado de Zhang et al, 2021.

2.5.3 Janela de Impressão

Janela de impressão é o tempo no qual o composto produzido pode ser utilizado mantendo suas características para a impressão. No concreto convencional, essa expressão está associada à perda de abatimento do concreto, ou seja, aceleração da reação de hidratação da mistura e drástico aumento da viscosidade, com predominância do comportamento sólido. O termo “janela de impressão” está relacionado ao período em que um determinado volume de material deve ser extrudado para consolidação da peça final (WANGLER et al., 2016).

No 3DCP esse termo está associado a manutenção da viscosidade e a tensão de escoamento da mistura e delimita o período adequado para deposição após preparação da mistura (BUSWELL et al., 2018). A Figura 9 apresenta um experimento relacionado a deposição de argamassa por um período entre 6 e 99 minutos após o preparo. Neste estudo, em tempos inferiores a 60 minutos a argamassa não adquiriu resistência a deformação suficiente para suportar a adição de novas camadas sobrepostas. Entre 60 e 80 minutos foi possível a construção do elemento impresso, mas se destaca a diferença de altura entre as amostras. No tempo de 99 minutos o

excessivo endurecimento da argamassa, com uma redução drástica da componente plástica da viscosidade levou a ruptura do elemento, em geral causada pela variação de fluxo de deposição.

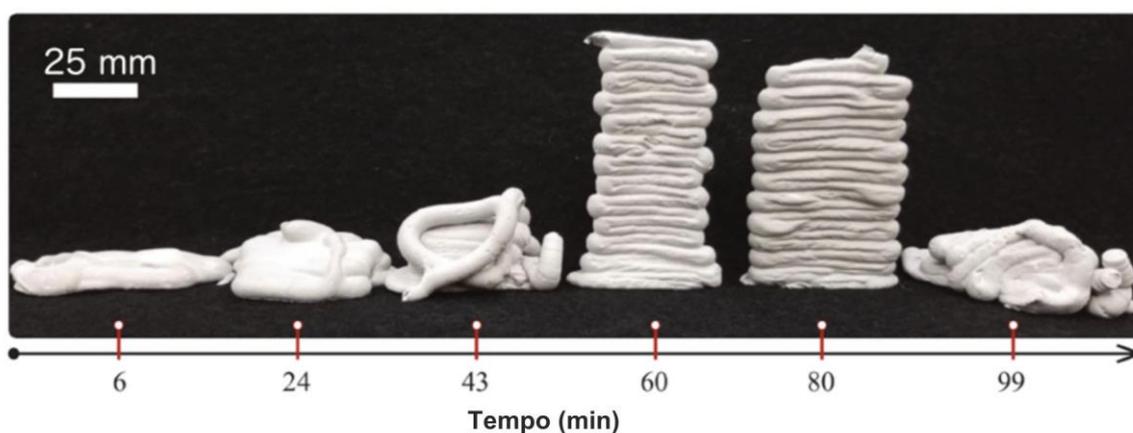


Figura 9 - Janela de impressão em função do tempo. Adaptado de Buswell et al. (2018)

Vários métodos podem ser empregados a fim de garantir ou atestar a janela de impressão das amostras. O ensaio de *slump flow* avalia a variação da fluidez após intervalos específicos (MALAEB *et al.*, 2015). Já alguns pesquisadores utilizaram do teste do reômetro para determinar esta mudança (LE *et al.*, 2012; PANDA *et al.*, 2018).

2.5.4 Buildability

A *buildability*, ou capacidade construtiva, refere-se à resistência do concreto impresso à deformação sob ação de cargas (LE *et al.*, 2012; LIM *et al.*, 2012). Sem a utilização de fôrmas, o material de impressão fresco deve ter capacidade de suporte de cargas suficiente para ser rígido logo após a extrusão, ou seja, deve sustentar o seu próprio peso e o das camadas adjacentes, como exemplificado no experimento da Figura 10, (MA; WANG; JU, 2017).



Figura 10 - Teste de *buildability* empírica para testar estabilidade vertical da composição da mistura ou dos parâmetros de impressão. Adaptado de Le et al.

(2012)

Um dos problemas associados à *buildability* é a que a falta de precisão geométrica do material depositado leva a estrutura a ficar propensa ao colapso (LI et al, 2020). Em caso de *buildability* insuficiente, as camadas depositadas verticais acabam sofrendo uma variação na sua direção horizontal, gerando mudanças significativas no elemento final impresso e a possível perda de estabilidade, Figura 11.

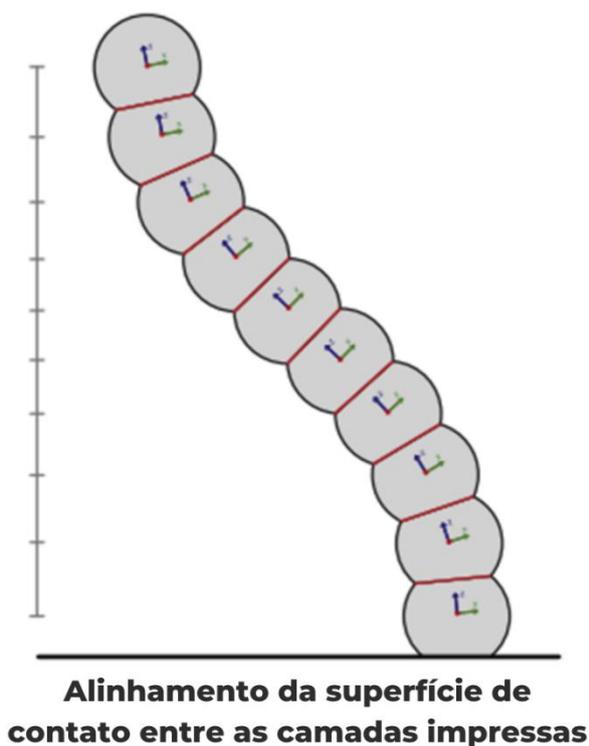


Figura 11 - Possível deformação do elemento final ao longo dos depósitos de camadas verticais. Adaptado de Buswell et al. (2018)

2.6 Construção de paredes

O método de construção das paredes impacta diretamente no resultado da impressão. Diversas configurações foram criadas para executar diferentes aplicações, podendo variar os números de camadas por paredes, a presença de curvas, o uso de paredes paralelas com material de preenchimento na parte interior, sistemas contendo treliçados e até mesmo reforçadas com elementos metálicos. Estas configurações podem ser divididas em maciças, Figura 12, ou reforçadas, Figura 13.

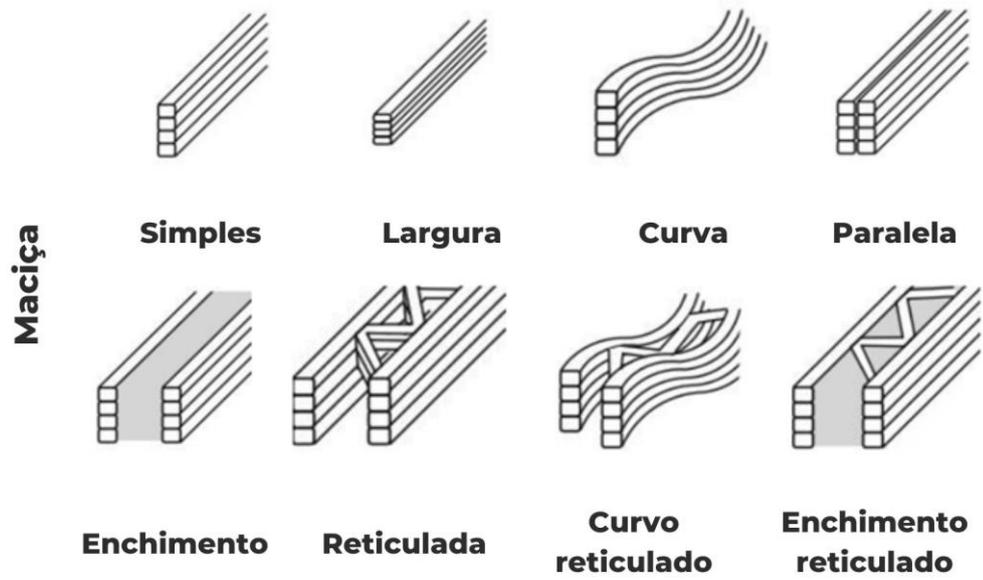


Figura 12 - Impressão 3d em concreto, configuração maciça. Adaptado e traduzido de Guamán-Rivera *et al.* (2022)

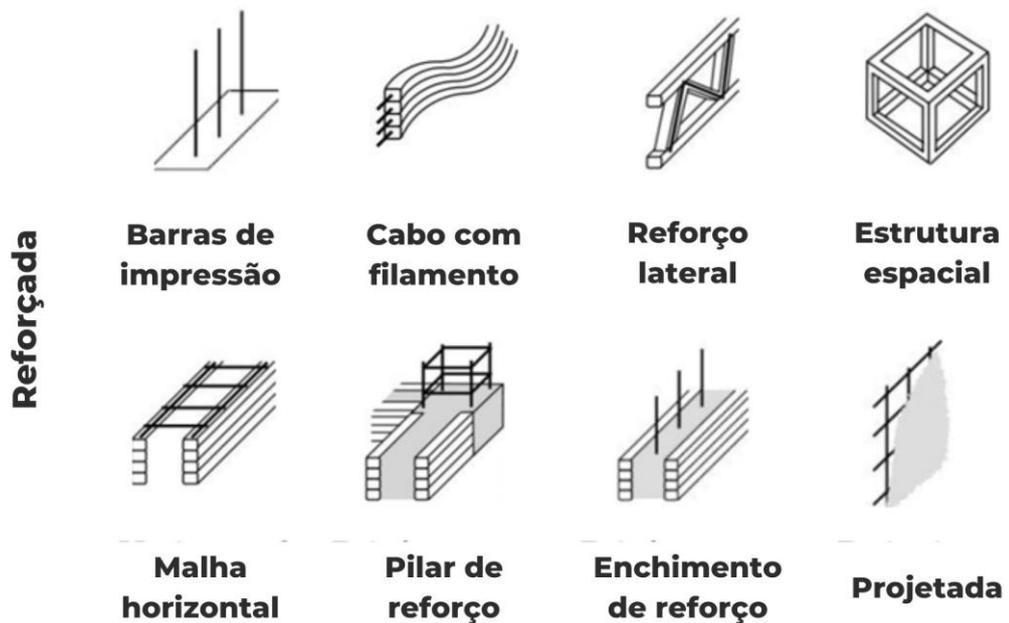


Figura 13 - Impressão 3d em concreto, configuração reforçada. Adaptado e traduzido de Guamán-Rivera *et al.* (2022)

2.7 Propriedades mecânicas do elemento impresso

2.7.1 Resistência da Argamassa

O concreto é um material anisotrópico, o que significa que ele assume diferentes propriedades em diferentes direções. Sua considerável resistência à compressão o caracteriza juntamente com baixa resistência à tração e falhas frágeis.

Ao realizar um teste de compressão típico, o comportamento compressivo uniaxial do concreto possui três estágios definidos, fortemente influenciados pela presença de microfissuras na estrutura devido à retração por secagem e hidratação incompleta. Os estágios são mostrados no diagrama tensão-deformação na Figura 14. As microfissuras existentes não aumentam quando pequenas cargas são aplicadas e a curva pode ser simplificado como linear até 30% da resistência à compressão uniaxial (seção a-b). No entanto, à medida que a carga aumenta, as deformações perpendiculares levam ao aparecimento de trincas (seção b-c). As rachaduras adicionais levam a uma curvatura não-linear no diagrama tensão-deformação. Com aproximadamente 70% da resistência à compressão uniaxial a quantidade e a propagação das fissuras aumentam e iniciam-se a ruptura do material. Neste ponto o concreto não pode mais suportar a carga aplicada, resultando em uma queda rápida da curva (após ponto d) (Mang et al., 2003).

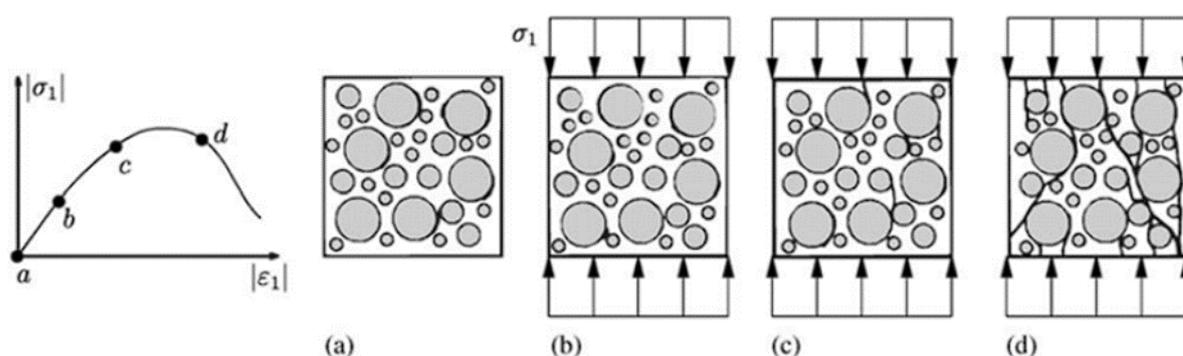


Figura 14 - Diagrama tensão-deformação do concreto em um teste de compressão típico e o desenvolvimento de microfissuras durante a carga aplicada.

Adaptado de Mang et al. (2003).

Da mesma forma, ao realizar um teste de tração típico, o comportamento de tração uniaxial é limitado devido à fragilidade do material. A Figura 15 mostra um gráfico típico de tensão-deformação do concreto durante um ensaio de tração. Devido às microfissuras pré-existentes no material, a curva permanece aproximadamente linear até 60% da resistência à tração uniaxial (seção a-b). A medida que o material continua a ser carregado, a relação entre a tensão e a deformação torna-se não linear, sendo que nesta fase surgem rachaduras adicionais e a rigidez é reduzida (a partir do ponto c) (Mang et al., 2003). Quando a resistência à tração uniaxial é atingida, as fissuras que foram desenvolvidas de forma local se propagam numa faixa perpendicular à carga aplicada. As fissuras resultam em uma rápida queda da curva (a partir do ponto d), e a capacidade de carga de tração é diminuída consideravelmente (Mang et al., 2003).

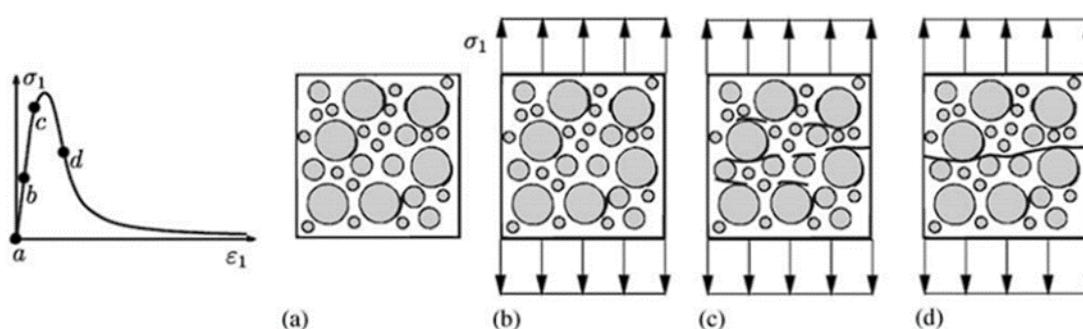


Figura 15 - Diagrama tensão-deformação do concreto em um teste de tração típico e o desenvolvimento de microfissuras durante a carga aplicada. Adaptado de Mang et al. (2003).

2.7.2 Impacto do processo nas propriedades

Além das resistências intrínsecas do material utilizado para a impressão, a técnica de construção de sobreposição de camadas gera outros pontos de complexidade e possibilidade de enfraquecimento da resistência percebida. A resistência à compressão dos elementos impressos em 3D é mais sensível do que usualmente identificado na construção civil com concreto tradicional. Isto deve-se a

diversos fatores podem impactar nesta, como: ligação das camadas, índice de vazios, empacotamento de camadas e outros.

Devido à existência de uma interface entre as camadas, a resistência do elemento impresso não é só afetada pela resistência do material, mas também pela aderência entre as camadas, que normalmente é menor do que um concreto moldado (ZHANG *et al*, 2021). Como as misturas e composições utilizados na maioria das pesquisas possui alta quantidade de cimentícios e pouca de agregados, isso também torna a mistura vulnerável a fissuras por retração, o que também pode gerar divergência em resultados esperados (PAUL *et al*, 2018).

As juntas fracas entre camadas são uma preocupação quando se trata de durabilidade do elemento impresso em 3D. Elas permitem a entrada de água e outros fluidos nocivos nos elementos, que podem reduzir tanto a durabilidade do concreto impresso quanto sua função protetora em relação ao reforço de aço, se houver no mesmo (SCHROFL, NERELLA, MECHTCHERINE, 2019).

Outros são os desafios de durabilidade em 3DPC na sua composição de mistura e na ausência de formas para moldagem do elemento final. Visto o alto consumo de cimento na composição da pasta/argamassa e nenhuma quantidade de agregados graúdos, levam a um aumento na probabilidade de fissuras de retração plástica no estado fresco e por retração no estado endurecido (ZHANG *et al*, 2021). A ausência de forma em combinação com a possibilidades limitada para a cura do elemento, leva a um maior encolhimento e outras formas de rachaduras em concretos impressos. Muitas vezes, os requisitos de capacidade de construção em estado fresco são alcançados usando altas dosagens de aceleradores, o que resulta em problemas de durabilidade devido à potencial cristalização de sal a partir da alta dosagem do cálcio aceleradores à base de nitrato (LLORET-FRITSCHI *et al*, 2019).

O processo de deposição de material geralmente gera alguma deformação no extrudado, o que auxilia na adesão entre as camadas. A tensão de escoamento baixa para o bombeamento, ocasiona que o filamento mantenha sua geometria quando impressa, mas uma pequena variação dessa tensão pode causa pequenas variações ao longo da altura do elemento (BUSWELL *et al*, 2018).

À medida que a altura do elemento impresso aumenta, automaticamente as camadas se comprimem sob um maior peso próprio. Normalmente, é mantido uma

altura constante para impressão, fazendo com que a distância entre o bocal de impressão e a camada anteriormente impressa aumente, podendo fazer com que a forma do extrudado mude e afete na adesão entre estas camadas (PANDA *et al*, 2018). Como a adesão entre as camadas é afetada a cada nova camada, provavelmente o material depositado tenda a flambar e colapsar a estrutura, como indicado na Figura 10 anteriormente.

2.7.3 Composições de argamassa

O processo de escolha das composições para a mistura foi realizado com base na Tabela 1, contendo um sumário das misturas encontradas na literatura. A relação água/cimento (a/c) foi identificada entre 34 e 42% para os artigos listados, com agregados finos/cimento (Agreg/C) variando de 200 a 370%. A correção do slump é realizada pelo uso de superplastificante, tendo sido encontrado que a maior parte dos trabalhos usam a relação SP/C em torno de 1,8 a 2,8%, destacando-se Perrot *et al*. (2016) com apenas 0,3%.

Tabela 1 – Composições de argamassa para 3DCP, adaptado de PAUL *et al*, 2018

Autores	Relação de materiais (kg/m ³)						
	Cimento	Cinza volante	Silica	Areia	Água	Super Plastificante (SP)	Fibra de polipropileno
Nerrela <i>et al.</i> (2016)	430	170	180	1240	180	10	0
Le <i>et al.</i> (2012)	579	165	83	1241	232	16,5	1,2
Anell (2015)	659	87	83	1140	228	11,6	1,2
Weng <i>et al.</i> (2018)	1000	1000	100	500	0,15 (a/c)	1,3 (g/L)	0
Zhang <i>et al.</i> (2018)	1000	20	20	1000	0,35 (a/c)	0	0
Perrot <i>et al.</i> (2016)	Conteúdo da mistura por porcentagem de peso: cimento 50%, fibra de calcário 25%, caulino 25%, água/cimento = 0,41 SP/cimento = 0,3%						
Malaeb <i>et al.</i> (2015)	Cimento 125g, areia 80g, enchimento 160g, água/cimento = 0,39, SP = 0,51mL						

A utilização de materiais encontrados facilmente e baixa seletividade é um parâmetro importante para viabilidade impressões 3D de concreto com menor custo. Além disso, as proporções de A/C, agreg/C e SP/C devem ser ajustadas para garantir o adequado bombeamento, o que é dependente da técnica e equipamento usado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O processo para impressão 3D em argamassa é composto por três pilares: mistura, bombeamento e impressão. A seguir será apresentado na Figura 16 o fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho, detalhando os pilares e suas etapas.

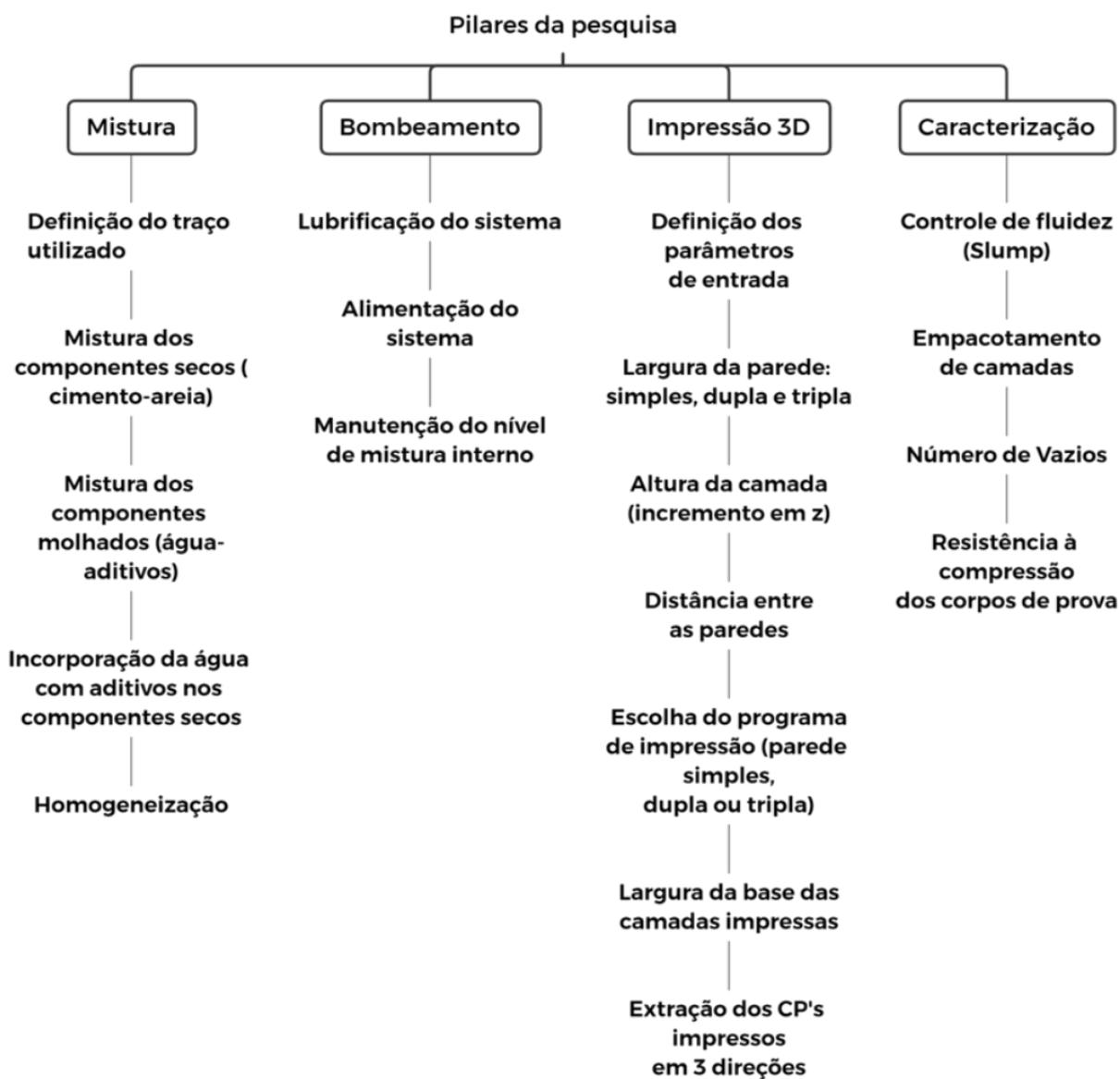


Figura 16 - Fluxograma de pesquisa

3.1 Materiais

A fim de aumentar a reprodutibilidade e repetibilidade, foram catalogados todos os materiais utilizados. Neste trabalho, foi utilizado cimento Portland CP 2, produzido pela Votorantim Cimentos. O agregado miúdo, areia de granulometria fina, com grãos de diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 0,2 mm, proveniente de jazida de água doce da região da Serra Gaúcha. A água usada foi da rede de abastecimento urbano da cidade de Caxias do Sul - RS, com pH ~7,3. Plastificante polifuncional Mira Flow 973 (comercializado pela GCP Applied Technologies), com densidade de 1,03 g/cm³ e EcoTec 10 (comercializado pela GCP Applied Technologies), com densidade de 1,10 g/cm³, foram empregados para controle do tempo de secagem e inibição da hidratação.

3.2 Mistura de argamassa

A umidade presente na areia foi mensurada efetuando a secagem em um forno de indução a 180°C por 50 minutos, sendo identificado em 8% massa/massa. Para relação final de água/cimento, foi adicionado água na mistura levando em consideração a água presente na areia na formulação final. A mistura dos materiais ocorreu por homogeneização mecânica, inicialmente entre materiais secos (cimento e areia) com posterior adição de 50% da mistura água-aditivo e homogeneizado por 10 minutos. Uma segunda adição de mais 40% da mistura da água aditivada seguida por mistura por 10 minutos e após acrescentado o restante da mistura e homogeneizado por 5 minutos. A composição é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição de argamassa utilizado

Cimento (g)	Areia Natural (g)	Água (ml)	Mira Flow973 (ml)	EcoTec10 (ml)	Relação água/cimento
1000	1860	520	88	33	0,52

3.3 Bombeamento de argamassa

O sistema de bombeamento adotado consiste na utilização de um sistema de rosca sem fim para transporte e pressurização da argamassa a partir de um funil metálico, conforme esquema, Figura 17.

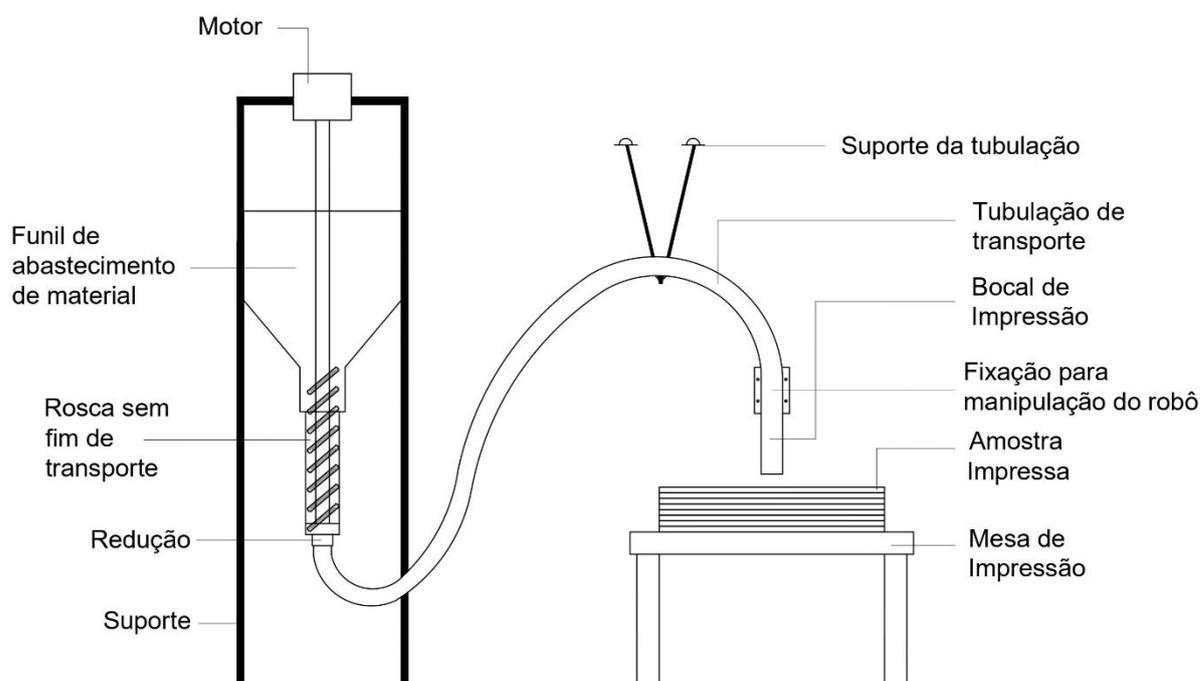


Figura 17 - Esquema do sistema completo de bombeamento e impressão

O sistema de bombeamento foi desenvolvido e construído para a realização desta pesquisa. Várias iterações foram realizadas para se chegar ao sistema utilizado, sendo testadas rosca sem fim de diâmetros maior e menor, posição de bombeamento horizontal e vertical, uso de misturadores e batedores auxiliares no funil, nível de carregamento do funil, altura do suporte da tubulação, método de fixação do bocal, diâmetro e comprimento do bocal, altura da mesa de impressão, entre outros.

A argamassa é colocada no funil e desliza por gravidade e vibração do conjunto até a rosca sem fim com diâmetro de 70mm. O fluxo é direcionado por meio de um duto flexível de policloreto de vinila reforçado com aço de diâmetro interno de 32 mm, até o ponto de deposição movimentado pelo braço robótico. Como bocal, é utilizado um bocal circular de diâmetro igual à tubulação para a impressão, 32mm.

A lubrificação do sistema de bombeamento foi feita utilizando água corrente antes de iniciar as baterias de teste com água, sendo descartado o bombeamento inicial para evitar alteração na relação água/cimento.

Para garantir uma vazão constante durante a impressão, foi efetuado o controle do nível de abastecimento de argamassa durante todo o tempo, por meio da reposição manual e controle visual.

3.4 Impressão

A impressão 3D da argamassa foi realizada via braço robótico da marca Hyundai, modelo HH020 com alcance máximo de 1742mm e repetibilidade de 0,08mm, cedido pela empresa Powermig Automação e Soldagem, Figura 18.



Figura 18 - Braço robótico utilizado na pesquisa para movimentação do tubo de deposição de argamassa

A velocidade de movimentação adotada para movimentação do braço robótico foi de 30 e 50 mm/s para as impressões, semelhante ao método utilizado em outras pesquisas (LIM *et al*, 2016; SILVA, 2017; MURCIA, GENEDY, REDA TAHA, 2020).

As amostras foram impressas com comprimento de 300 mm, similar aos trabalhos de Buswell e Gibson *et al*. (LE *et al*, 2012; MURCIA, GENEDY, REDA TAHA, 2020; PAUL *et al*, 2018), e com largura de 38 mm, para parede simples, e 76 e 114 mm para as paredes dupla e tripla, respectivamente. A impressão foi conduzida até a altura limite de 300mm, semelhante ao trabalho de Hou *et al* (2021) ou até o colapso da amostra, o que pode ser visto na Figura 19.



Figura 19 – Colapso prematuro da amostra por falta de resistência ao peso próprio

3.4.1 Geometria do Elemento impresso

A espessura final de uma parede tende a implicar na estabilidade da impressão. Dessa forma, foram avaliadas impressões com de paredes simples, duplas e triplas.

A Figura 20 apresenta as configurações do trajeto para deposição de material durante a impressão das amostras, com a flecha sendo o sentido de impressão conduzida pelo robô.

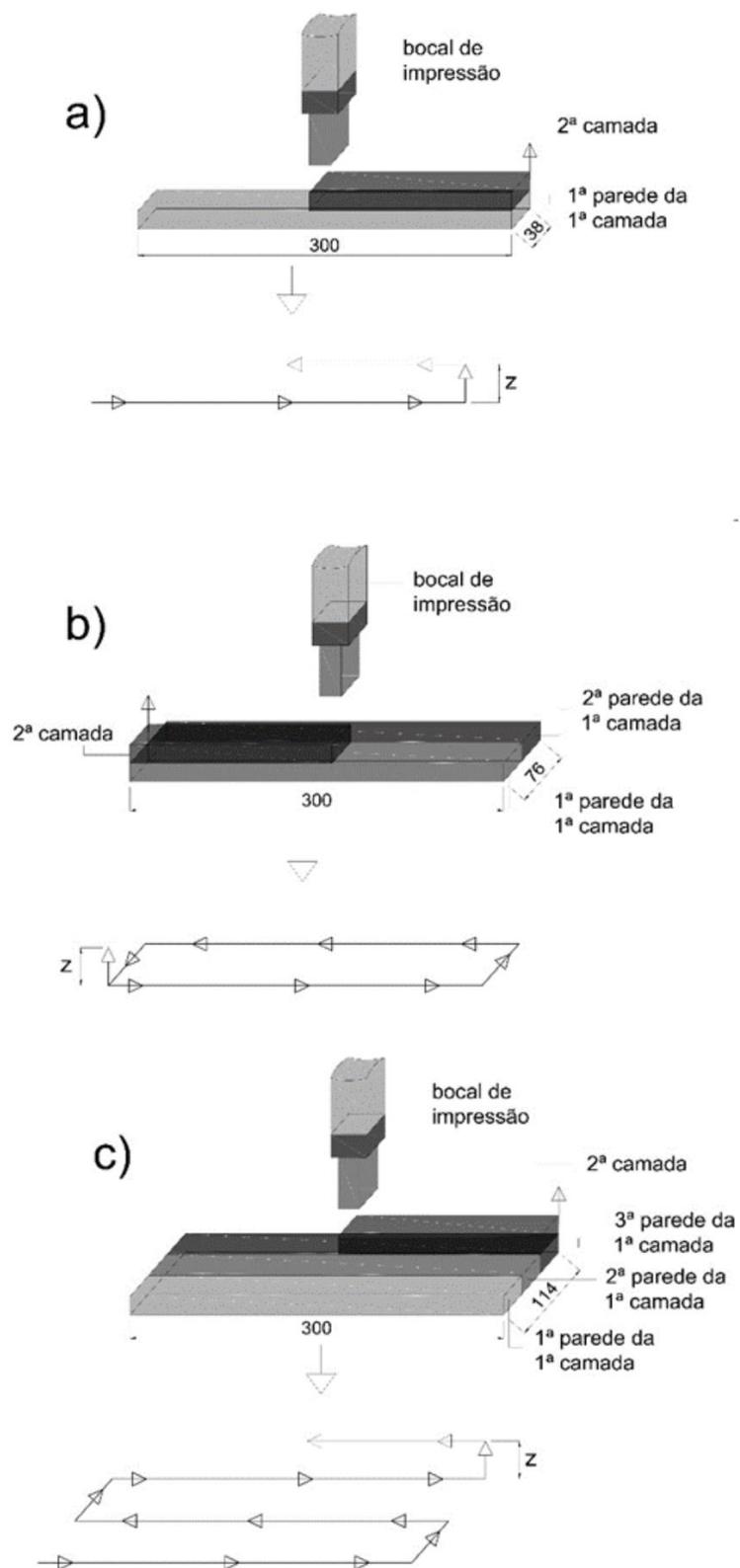


Figura 20 - Esquema de percurso das paredes: a) simples, b) dupla e c) tripla.

A ligação lateral entre as paredes também é um ponto fundamental na resistência final do elemento impresso. Uma distância alta pode levar a uma redução da densidade do elemento no encontro de paredes enquanto uma distância muito próxima pode levar a parede depositada sobrepor a anterior, causando fragilidade ou instabilidade geométrica na impressão. A adequada a distância é influenciada pela geometria e diâmetro do bico, velocidade de deposição e bombeamento, e fatores reológicos do material.

3.4.2 Pumpability e Buildability

Para mensuração da capacidade de bombeamento e capacidade de construção (*buildability*) foram realizados a preparação de 8 amostras, conforme Tabela 3. A altura da camada e a distância entre paredes são parâmetros de configuração do software do braço articulado robótico, não sendo mensurados em milímetros, sendo adimensionais. Para facilitar a compreensão, a Figura 21 demonstra um desenho esquemático da disposição de deposição dos materiais com as variáveis estudadas.

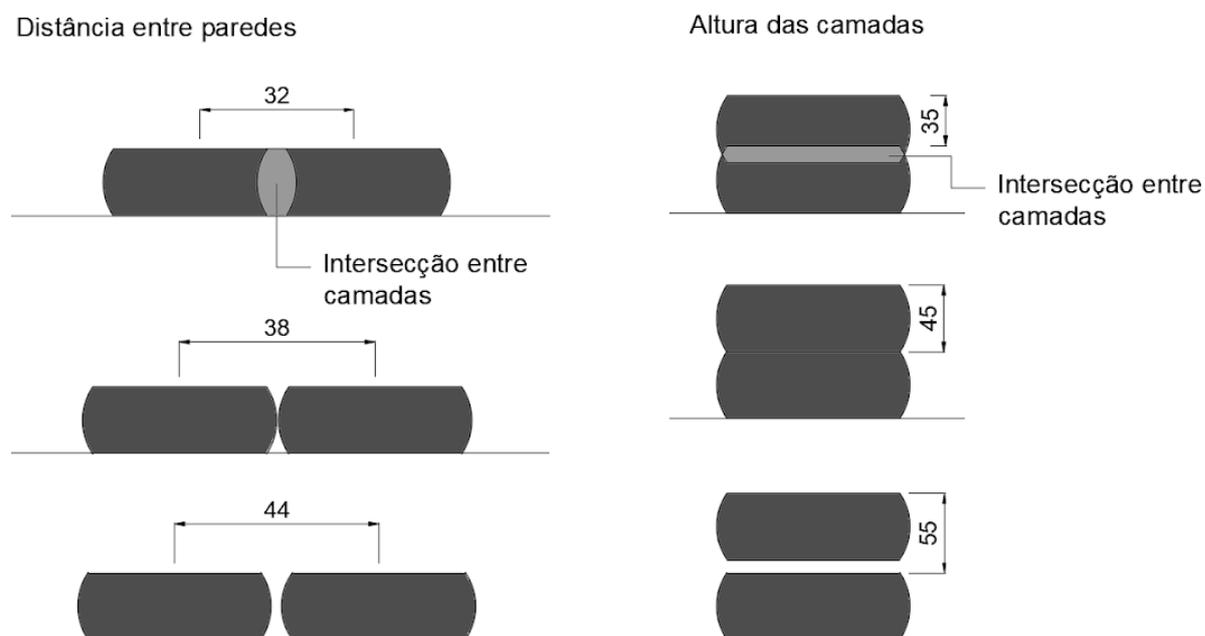


Figura 21 - Variáveis aplicadas no elemento impresso em 3D

Tabela 3 - Programação para cada amostra

Amostra	Parâmetros			
	Altura da camada (adimensional)	Distância entre paredes (adimensional)	Velocidade de movimentação (mm/s)	Paredes
S45-38	z=45	x=38	50	Simplex
D45-38	z=45	x=38	50	Dupla
T45-38	z=45	x=38	50	Tripla
D35-38	z=35	x=38	50	Dupla
D55-38	z=55	x=38	50	Dupla
D45-32	z=45	x=32	50	Dupla
D45-44	z=45	x=44	50	Dupla
D45-38-30	z=45	x=38	30	Dupla

A avaliação da distância entre paredes foi efetuada com intuito de analisar a homogeneidade da ligação e aderência entre camadas. A ligação entre camadas e paredes é um dos motivos de falhas no modelo de impressão, ocasionando o colapso do elemento (LI *et al*, 2020).

3.5 Caracterização

3.5.1 Teste de *Slump*

O ensaio do abatimento da argamassa, também conhecido como teste de *slump*, é uma medida da consistência do concreto fresco. O teste consiste em encher

um molde com a argamassa fresca e, em seguida, levantá-lo e deixá-lo cair de uma determinada altura. A ASTM C143 (2015) estabelece os parâmetros para a realização do teste, incluindo a forma e dimensões do molde, a altura de queda e o método de medição do abatimento, que é a diferença entre a altura original da argamassa no molde e a altura da porção abatida após a queda. O abatimento é um indicador da trabalhabilidade e da capacidade de fluidez da argamassa, e pode ser utilizado para ajustar a quantidade de água ou outros aditivos adicionados para atingir a consistência desejada.

Além de ser um indicador da consistência do concreto fresco, o ensaio do abatimento da argamassa também é importante para garantir a qualidade e a uniformidade do concreto utilizado nas amostras. Por exemplo, se a consistência do concreto não for apropriada, pode haver dificuldades na sua deposição e compactação, resultando em problemas como segregação, fissuras e porosidade excessiva. O teste também é utilizado como uma ferramenta de controle de qualidade na produção do concreto, permitindo que seja monitorado e ajustado a consistência do material em tempo real. Para definição dos valores utilizados de abatimento o teste foi realizado em triplicata.

3.5.2 Empacotamento de camada

O empacotamento de camada consiste na redução da espessura das camadas inferiores pela ação da pressão exercida pelas camadas superiores durante a deposição. Foram mensuradas a altura da terceira camada depositada e a altura das quatro primeiras camadas impressas, permitindo observar o comportamento da estabilização do grau de empacotamento da argamassa.

As amostras foram fotografadas utilizando-se um smartphone Samsung Galaxy S9+, com tamanho do obturador F2.4 e resolução de 4032 x 3024 pixels. Para mensuração dos valores dimensionais foi utilizado o software ImageJ, versão 1.8.0, desenvolvido pela Universidade de Wisconsin, EUA.

3.5.3 Avaliação dos vazios

A avaliação dos vazios presentes na amostra foi obtida por meio de avaliação visual entre as amostras impressas diretamente na superfície externa. A análise ocorreu por contraste, identificando o tamanho médio dos pontos vazios presentes na superfície da amostra. Para esta medição, foi utilizado o software ImageJ, versão 1.8.0, para correlacionar a imagem com valores em milímetros. A fim de obter a avaliação das condições da densidade de vazios, foi comparado o presente trabalho com outros artigos da literatura.

3.5.4 Extração das amostras

A extração dos corpos de prova (CP) para posterior avaliação da resistência à compressão foi efetuada nas três direções da amostra, Figura 22.

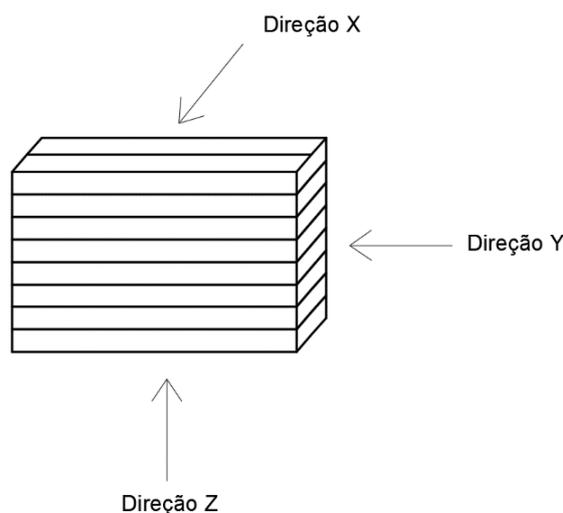


Figura 22 - Esquema para extração dos corpos de prova da impressão.

A escolha do local de remoção, em todas as direções da amostra: X, Y e Z, e a dimensão dos corpos de prova da amostra impressa, 50x100mm, foram adotados conforme pesquisas já realizadas (MECHTCHERINEA *et al*, 2019; SANJAYAN *et al*, 2018; LE *et al*, 2012, PAUL *et al*, 2018; FENG *et al*, 2015), a fim de obter uma comparação entre os resultados obtidos. Foram removidos dois corpos de prova para cada uma das direções mensuradas. A remoção foi feita com uma perfuratriz com

broca diamantada, da marca Bosch, modelo GDB-350, de diâmetro 50 mm e com utilização de água para remoção das amostras, Figura 23.



Figura 23 - Extração do Corpo de Prova na direção “z”.

As amostras utilizadas no estudo foram obtidas por meio da retirada de um cilindro contínuo do material de amostra. Após a extração, cada amostra foi dividida em duas unidades distintas, a fim de permitir a realização do rompimento em ambas as partes. A Figura 24 ilustra o corpo de prova contínuo, antes da divisão e retificação para ensino de compressão.



Figura 24 - Corpo de prova contínuo, sem a divisão e ajuste para medida final.

Para a pesquisa, foi adotado um processo específico para a moldagem e preparação das amostras utilizadas no ensaio de resistência do concreto. Após a extração do cilindro contínuo, todas as amostras foram submetidas a um processo de retificação para correção de possíveis anomalias no formato, garantindo uma geometria precisa e uniforme. As dimensões finais das amostras foram de 44x88mm, com uma área total de 15,903 cm², seguindo as orientações estabelecidas pela NBR 5738/2015 “Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova”. De acordo com a norma, a relação entre a largura e a altura das amostras deve ser mantida em uma faixa específica para garantir a precisão dos resultados obtidos. A Figura 25 apresenta as amostras pós-preparação das amostras. A adoção deste processo rigoroso de preparação das amostras é fundamental para garantir a validade dos resultados obtidos.



Figura 25 - Corpos de Prova antes do rompimento.

A fim de garantir a rastreabilidade e identificação das amostras utilizadas neste estudo, foi adotado um sistema de nomenclatura padronizado. Para cada amostra extraída, foi utilizado um prefixo que indicava a orientação da peça em relação aos eixos de referência, seguido de um número que identifica de forma única cada amostra. Por exemplo, a primeira amostra extraída da peça inicial no eixo “z” foi identificada como Z1, enquanto a segunda amostra extraída no mesmo eixo foi identificada como Z2, e assim sucessivamente, como é possível ver na figura acima.

3.5.5 Ensaio de compressão

Para definição e análise da resistência à compressão foi realizada a ruptura dos corpos de prova extraídos e retificados em prensa de compressão para concreto

(marca EMIC, modelo PCE100C), com capacidade de 100000 kgf, com base na norma ASTM C39 (2020) e NBR 5738 (2018), Figura 26.



Figura 26 - Prensa hidráulica com corpo de prova para rompimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teste de Slump

Para o ensaio de abatimento foram obtidos 3 resultados de medidas, com valor médio de 185 mm (desvio padrão 20mm) para os testes realizados. Estudos sugerem argamassas com *slump* de 40 a 80 mm (MURCIA, GENEDY, REDA TAHA, 2020; SOUZA *et al*, 2020; LI *et al*, 2018⁹), para melhores resultados de *buildability*. A faixa de valores de 40 a 80 mm impossibilita o bombeamento da argamassa pelo sistema de bombeamento utilizado, sendo mais semelhante com o trabalho do Malaeb *et al.* (2015), que também utiliza argamassa com valor médio 180 mm e desvio padrão de 20 mm. Entre os valores de diretrizes para a região aceita de impressão, sugere-se 150mm a 200mm (TAY, QIAN, TAN, 2019).

Tay *et al.* (2019) e Murcia *et al.* (2020) identificam que valores de slump inferiores resultaram em impressões com menores deformações e reduzido empacotamento de camadas. Entretanto são elevados o grau de fissuração e vazios, o que pode ocasionar a perda severa de resistência mecânica do artefato impresso. Junto a isso, para valores inferiores de *slump*, há necessidade de redução da razão água/cimento na composição da argamassa, o que influencia nas propriedades como resistência à compressão, fluidez, *pumpability* e *buildability*.

4.2 Empacotamento de camadas

A avaliação do empacotamento de camada foi efetuada para cada amostra. O intuito desta avaliação é identificar se a quantidade de paredes do elemento iria afetar nas condições de *buildability* da amostra impressa final. A seguir é apresentado estes resultados separados por tipo de amostras.

4.2.1 Amostras com paredes simples

A avaliação da amostra de parede simples foi considerada visto a facilidade de impressão com uma única camada e o ganho em tempo de impressão total por este mesmo fato. A Figura 27, apresenta a imagem da amostra S45-38 durante a

impressão, além de indicar os parâmetros avaliados. A impressão desse artefato atingiu 16 camadas antes do colapso, correspondendo a uma altura de 151 mm.

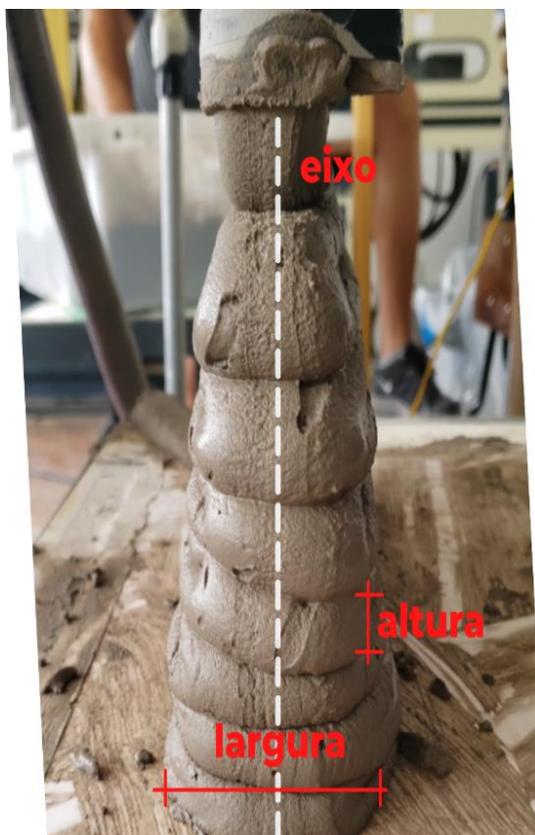


Figura 27 - Impressão da amostra S45-38 no momento antes da queda

Os valores de largura e altura das camadas impressas, medidas do eixo central, são demonstrados na Figura 28. Na base da amostra é possível verificar um alargamento e achatamento frente a largura inicial prevista, provavelmente devido à baixa resistência da argamassa fresca durante a deposição das camadas superiores. A medida que a altura da construção aumenta, também aumenta a pressão hidrostática e as camadas se comprimem sob peso próprio.

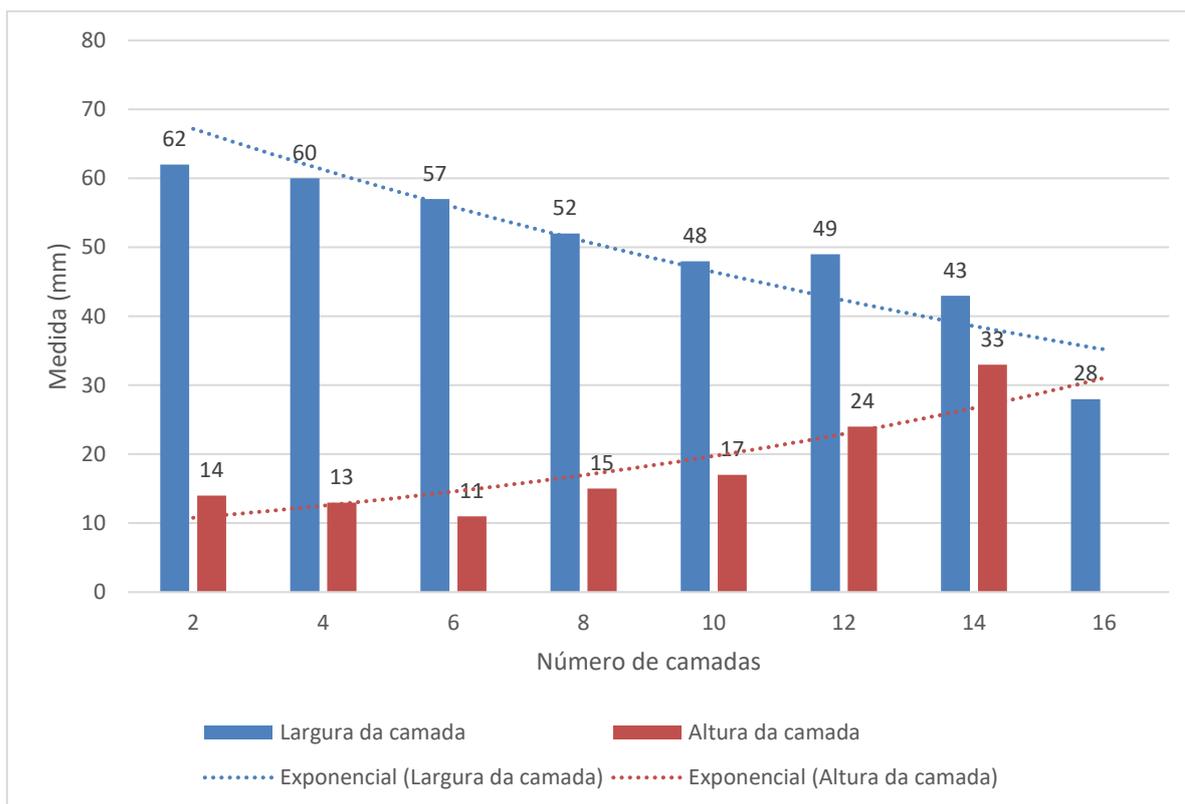


Figura 28 - Valores de largura e altura de camada na parede simples, S45-38.

Como a altura da camada a ser impressa é constante, assim a distância entre o bocal e a superfície de trabalho aumenta, fazendo com que a forma do filamento mude, potencialmente afetando a adesão das camadas, Panda *et al.* (2018). Em pesquisas realizadas com filamentos únicos (de camadas simples), como é o caso do Panda *et al.* (2018), apontam que este afastamento do bocal de impressão da camada de deposição eventualmente pode ocasionar com que o filamento serpenteie à medida que é depositado, levando à flambagem da estrutura e posterior colapso. Para evitar que esse processo aconteça, o autor sugere ou o ajuste da distância do bocal à camada de deposição ao longo da impressão ou a utilização de aditivos de endurecimento na argamassa para que as camadas sejam capazes de suportar o acréscimo de carga das camadas superiores.

É visto uma redução da altura de empacotamento da camada conforme o incremento de impressões e uma estabilização próxima ao valor de 14 mm ao atingir 8 camadas impressas. Essa condição pode indicar a existência de um valor estável do empacotamento. O colapso após a 16ª camada dificulta uma extrapolação deste

resultado para a impressão de artefatos com parede simples, sendo este resultado atingido por esbeltez do elemento impresso para condição da amostra avaliada.

Observando as linhas de tendência, é possível identificar que ao longo da impressão as camadas iniciais não obtiveram tempo suficiente de cura para obter resistência à compressão e reduzir as deformações. Isso gerou um o aumento da largura da base e diminuição na altura das primeiras camadas.

4.2.2 Amostras com paredes duplas

A avaliação das amostras com paredes duplas foi realizada conforme a Figura 29. Na Figura 30, é apresentado os valores médios de altura das amostras duplas.

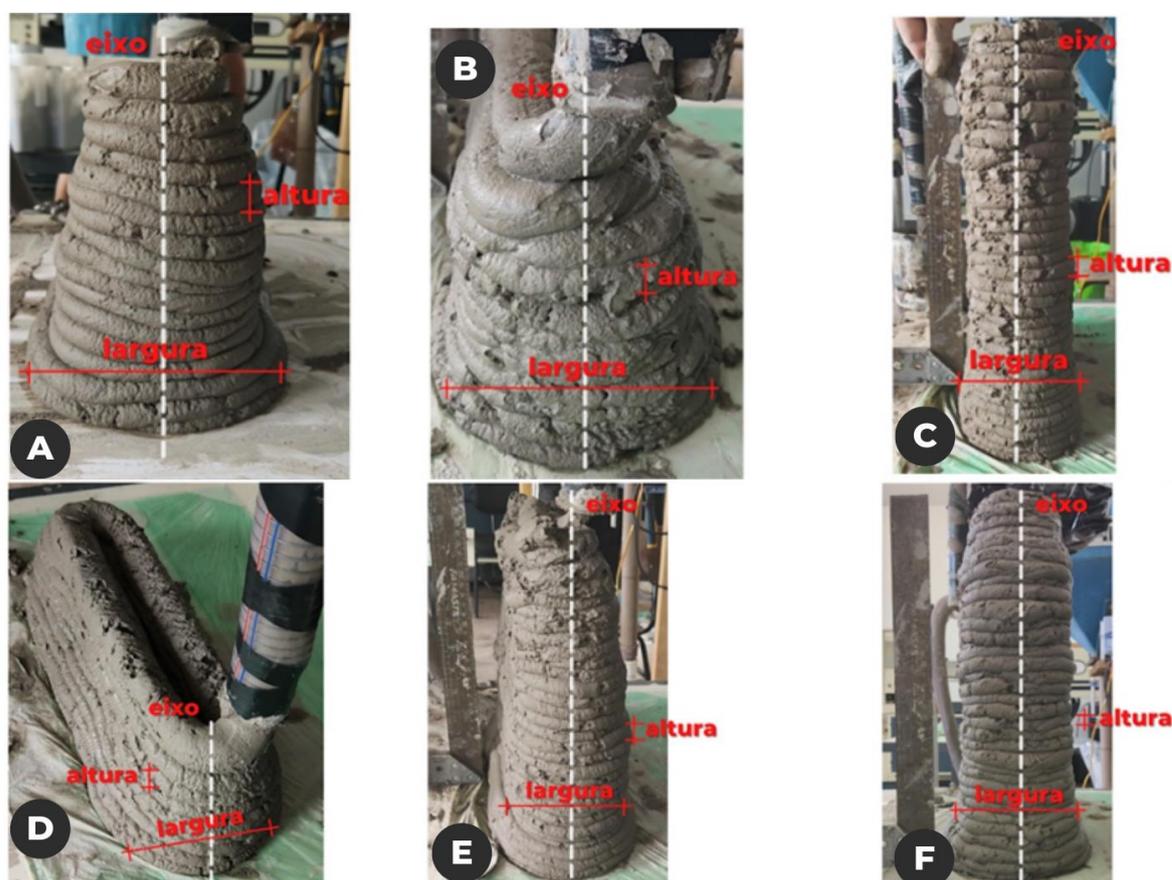


Figura 29 - Empacotamento nas amostras de parede dupla: a) D45-38, b) D55-38, c) D35-38, d) D45-44, e) D45-32, f) D45-38-30.

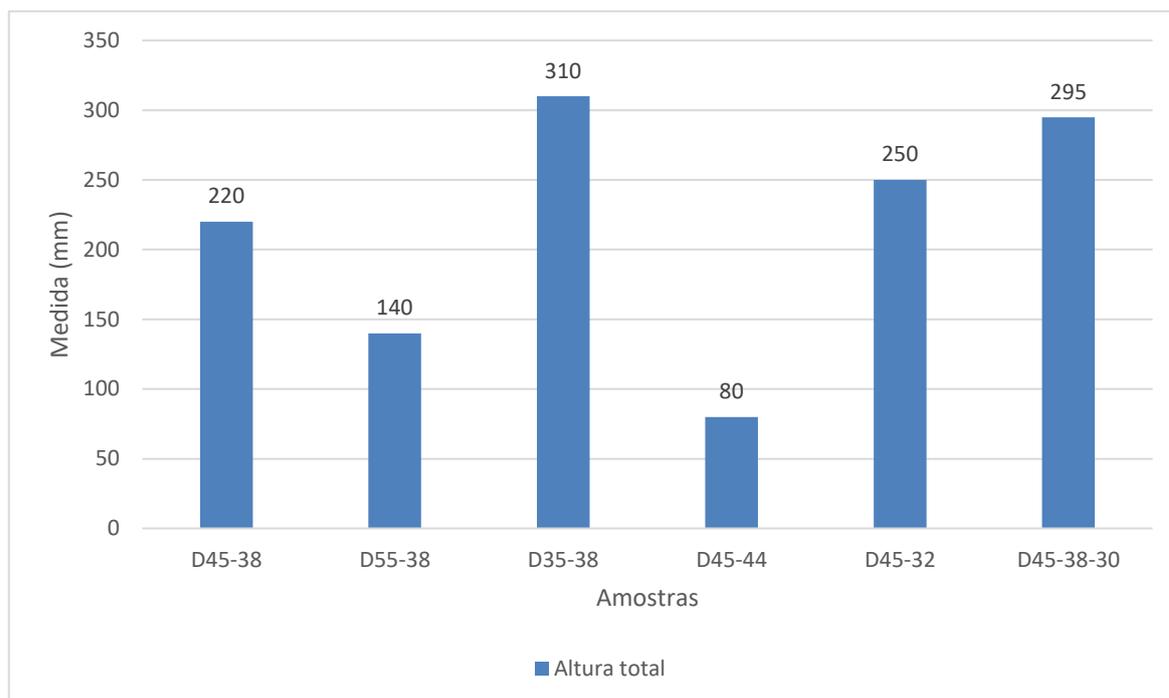


Figura 30 - Altura total das amostras duplas antes do colapso

Na Figura 30, foi avaliado a altura total da camada antes do colapso. As amostras D35-38 e D45-38-30 não colapsaram e atingiram a altura limite estipulada para a avaliação, indicando parâmetros mais adequados para impressão de argamassa. Com menor altura de camada, a amostra D35-38 acentuou a ligação entre as camadas, auxiliando na capacidade de construção da parede, mas apresentando a segunda menor medida de altura média das camadas, em 11 mm. Este valor reforça o conceito de maior adesão entre as camadas levando a um menor deslocamento posterior à deposição de cada camada.

Ambas possuem igual valor de distância entre paredes, o que contribuiu para ligação entre as camadas. Quando comparado as amostras D45-38 e D45-38-30, comprova-se que uma menor velocidade de deposição do material acarreta na construção, gerando um aumento na altura final do artefato (aproximadamente 34%).

A amostra D55-38 e D45-44 apresentaram os piores resultados quanto à altura atingida antes da queda. Elas têm em comum a maior distância entre o bico de saída e a camada anterior já impressa. Esta distância exige um maior estiramento da argamassa até atingir o local de deposição, podendo levar ao alargamento dos vazios

internos, perda de forma, além da redução significativa do diâmetro do material depositado, ocasionando uma perda de estabilidade no artefato.

Na Figura 31, é avaliado a relação entre altura média da camada (em centímetros) e quantidade de camadas das amostras duplas.

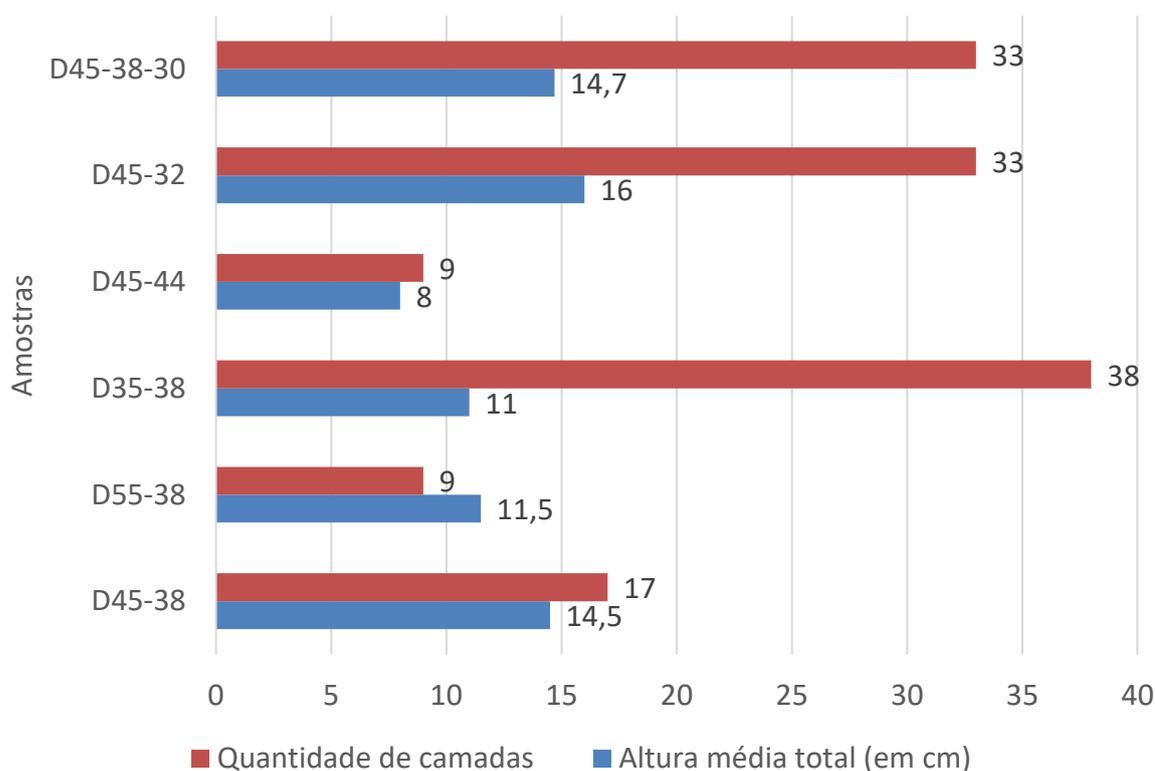


Figura 31 – Quantidade de camadas e altura média total antes do colapso em centímetros

As amostras avaliadas indicam que não há uma relação direta entre a quantidade de camadas e a altura média da peça. Um exemplo disso é a diferença de 51% na quantidade de camadas entre as amostras D45-38-30 e D45-38. É possível que a velocidade de 30mm/s tenha contribuído para uma deposição mais eficiente do material, resultando em um menor empilhamento de camadas, altura média de camada maior e, por sua vez, uma maior quantidade de camadas. Comparando a amostra D45-38-30 com a amostra D45-38, que utilizou uma velocidade de 50mm/s, é perceptível que a redução da velocidade levou a um aumento de 25% na altura total, mantendo os demais parâmetros constantes. Estes resultados indicam que a

velocidade de movimentação do bico de deposição de argamassa é um parâmetro crítico na capacidade de construção de elementos impressos.

Pode-se observar que as amostras com menor distância entre paredes atingiram uma maior quantidade de camadas em comparação com as amostras que apresentaram uma distância maior. Isso indica que a adesão entre as paredes de uma mesma camada tende a gerar resultados mais satisfatórios em termos de estabilidade do elemento final e, conseqüentemente, uma maior altura. Essa relação pode ser explicada pelo fato de que uma menor distância entre as paredes favorece a deposição mais precisa do material, permitindo uma melhor adesão entre as camadas e uma maior estabilidade estrutural do objeto. Dessa forma, é possível concluir que a distância entre as paredes é um parâmetro fundamental que deve ser levado em consideração na fabricação de objetos por deposição por extrusão, uma vez que afeta diretamente a qualidade do produto final.

Na Figura 32, é apresentado a altura média de todas as camadas em comparação a altura média das 4 últimas camadas. Isso permite avaliar o empacotamento, mensurando a influência da deposição de novas camadas.

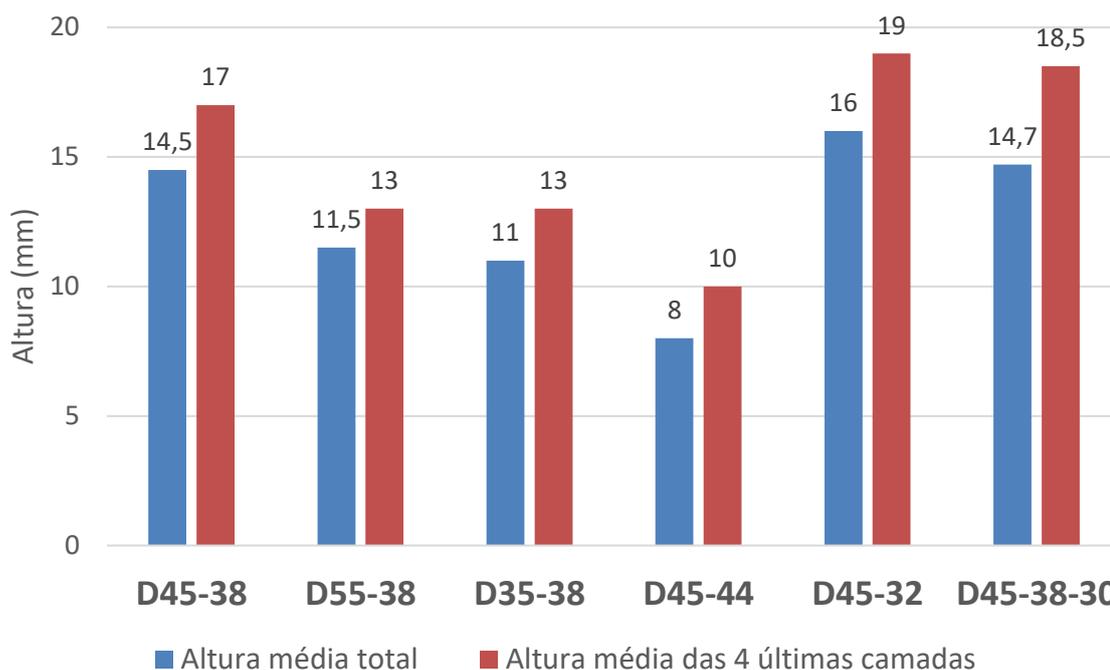


Figura 32 – Altura média das amostras duplas comparada com altura média das 4 últimas camadas

Todas as amostras avaliadas apresentarem maior valor de altura das 4 últimas camadas em comparação à média da peça. Isto, deve-se pela compressão das camadas inferiores, o que resultam em camadas menores em relação as últimas depositas.

A amostra D55-38, com altura de deposição inicial maior, apresentou percentual de variação entre as alturas de aproximadamente 11,5%. Em comparação à amostra com menor altura inicial, D35-38, esta variação foi de aproximadamente 15,4%, sugerindo que amostras com menor altura inicial apresentam maior variação em relação à peça.

Entre as amostras D45-38-30 e D45-38, é visível que o tempo de deposição da amostra D45-38-30 resulta em alturas maiores nas últimas camadas. Entretanto, quando comparado com a altura média final do artefato impresso, a compressão das camadas inferiores gera alturas médias similares.

Na Figura 33 é apresentada a altura média total em relação à largura média das amostras.

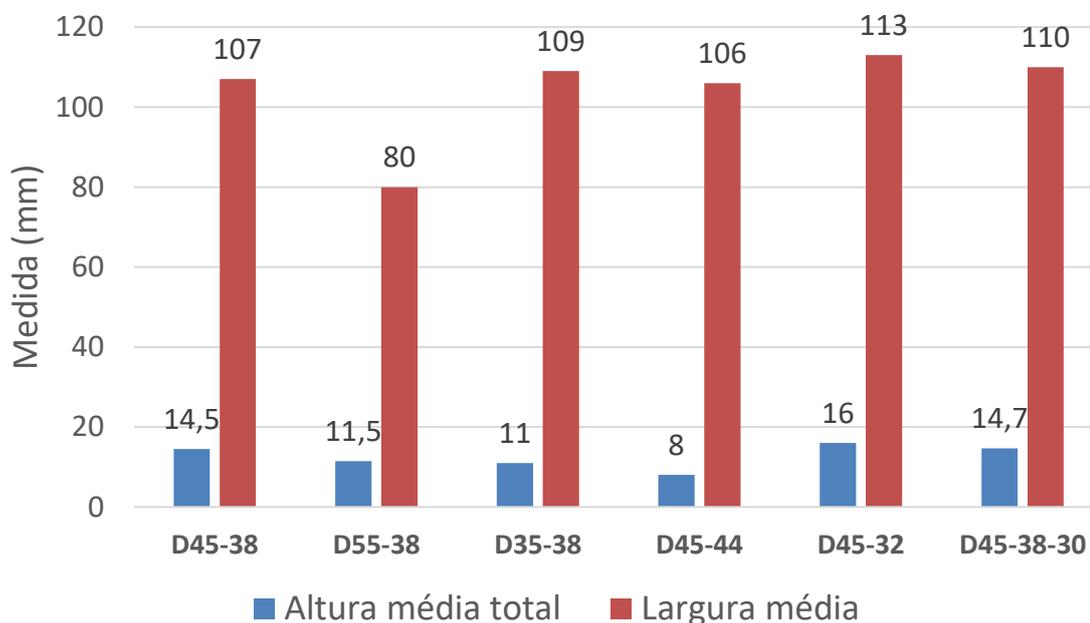


Figura 33 – Altura média total x largura média das amostras duplas

Comparando as amostras com maiores diferenças de parâmetros iniciais, D45-44 e D45-32, é possível identificar que o parâmetro de distância entre paredes não influencia significativamente na largura média total da peça. Junto a isto, menor tempo de deposição, contrapondo as amostras D45-38 e D45-38-30, também não apresenta alterações de grande magnitude na largura da peça final. Entretanto, a maior altura inicial de deposição (como na amostra D55-38), apresenta resultados de largura média total inferiores quando comparados com as demais amostras, em aproximadamente 30% inferior, comparado com a maior amostra, D45-32.

A Figura 34, relaciona a quantidade de camadas e a largura média total das amostras duplas. Amostras com maior quantidade de camadas, D35-38, D45-32 e D45-38-30, tendem a possuir maior largura média total. Isto, deve-se pelo fato de as camadas inferiores serem comprimidas e sofrem maior deformação pelo peso próprio, gerando resultados superiores de largura em relação as demais amostras. Na amostra D45-44, os valores superiores de parâmetro inicial de distância entre paredes apresentam, também, resultados de larguras maiores, entretanto com menor

quantidade de camadas no artefato final. Entretanto, esta largura total maior, com menor quantidade de camadas, influenciou para uma menor estabilidade e falha antecipada do elemento final.

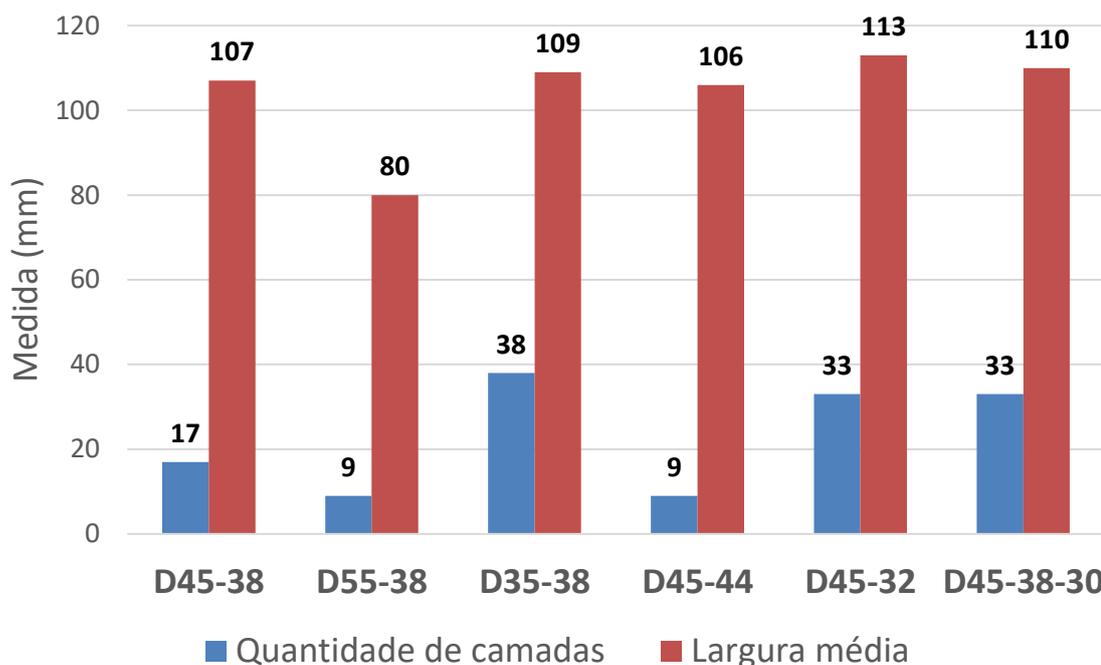


Figura 34 – Quantidade de camadas x largura média das amostras duplas

Segundo a literatura, quando o tempo de deposição entre camadas é baixo ocorre uma maior força de ligação entre elas, auxiliando na resistência final da peça (LE *et al*, 2012; WOLFS, BOS, SALET, 2019; PANDA *et al*, 2019; PANDA *et al*, 2018). Uma ligação fraca entre camadas pode gerar anisotropia mecânica e alteração na capacidade de suporte de carga do elemento impresso (BUSWELL *et al*, 2018; LI, WANG, MA, 2018; KEITA *et al*, 2019; NERELLA *et al*, 2019).

Dessa forma, apesar dos resultados mais promissores terem sido obtidos em termos de buildability para amostras com bicos mais próximos da impressão e menor velocidade, a influência sobre a resistência a compressão será investigada no tópico 4.3.

4.2.3 Amostras com paredes triplas

Na impressão da parede tripla foi possível observar maior estabilidade no conjunto, visto apresentar maior inércia em relação aos artefatos de parede dupla ou simples. A imagem final da amostra é apresentada na Figura 35.

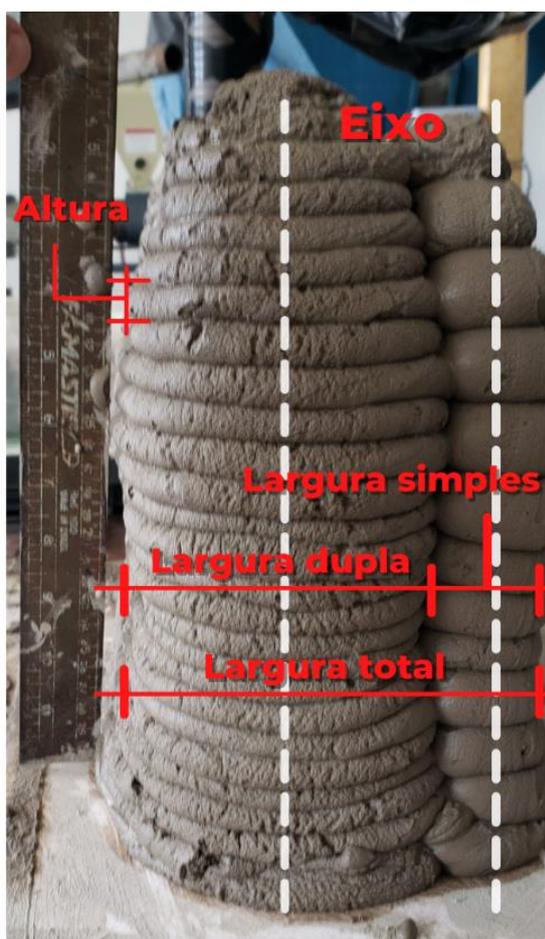


Figura 35 - Parâmetros avaliados na amostra T43-38.

A impressão final obteve a altura de 360 mm na quantidade de 27 camadas, com altura média de camada de 13,3 mm, sem apresentar falhas ou fragilidade na sua construção. Na Figura 36, são apresentados os resultados para largura e altura desta amostra.

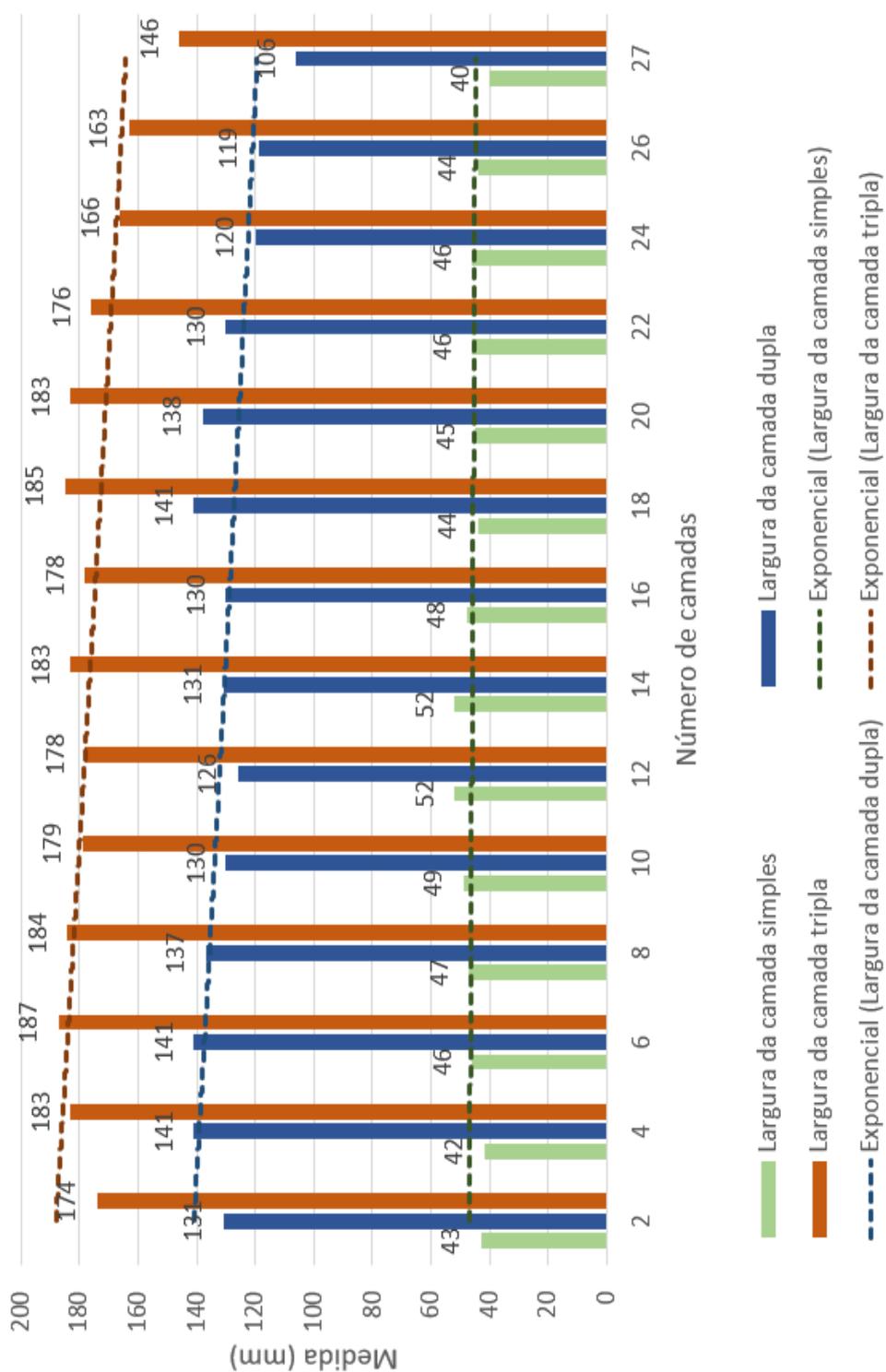


Figura 36 - Valores de largura média das camadas simples (S45-38 em verde), dupla (D45-38 em azul escuro) e tripla (T45-38 em laranja). A altura média é indicada em azul.

A amostra T45-38 apresentou a menor variação na largura média da camada ao longo da impressão, muito próximo aos valores obtidos pela amostra S45-38. Isto, deve-se ao fato de uma maior intersecção entre paredes, dificultando uma movimentação lateral por impedimento espacial. A largura média da amostra T45-38 é de 176 mm, 12% superior ao resultado obtido pela soma das larguras nas amostras S45-38 e D45-38, em 157 mm. Quando verificado de forma segmentada, as dimensões da parede simples na amostra T45-38 são muito semelhantes aos valores da amostra S45-38, indicando maior deformação no segmento de parede dupla da T45-38, em relação à amostra D45-38.

A variação média das larguras das paredes foi de aproximadamente 30% para a primeira parede, 33% para a segunda e 28% para a terceira, respectivamente, sendo muito similares. Há variação considerável entre níveis diferentes de camadas (próximo da base, no centro ou na parte superior), havendo sempre uma tendência à similaridade das larguras de parede numa mesma altura. Essa condição indica que não ocorre concentração de deformação em paredes externas ou internas, sendo somente a deformação em relação ao eixo Z o aspecto principal de mudança de geometria do elemento impresso.

De forma geral, as amostras apresentam uma melhor condição de *buildability* quando uma menor altura de camada é utilizada, o que corrobora para o entendimento de uma maior ligação entre elas e menor deformação da argamassa após passagem pelo bico, o que eleva a estabilidade no artefato, como é visto na amostra D35-38. As amostras que possuem um maior tempo de deposição entre camadas, D45-38-30 e T45-38, também obtiveram melhores resultados.

4.2.4 Avaliação dos vazios

A avaliação dos vazios consiste na quantidade de poros na amostra em uma metragem quadrada ou unidade de volume. Os valores estão diretamente relacionados a uma possível perda de resistência e estabilidade do elemento (KRUGER, PLESSIS, ZIJL, 2021). Na Figura 37 são indicados alguns pontos de vazios superficiais encontrados na amostra D45-38-30, com a representação em

círculos vermelho, com os valores indicam o tamanho na direção horizontal, em milímetros.

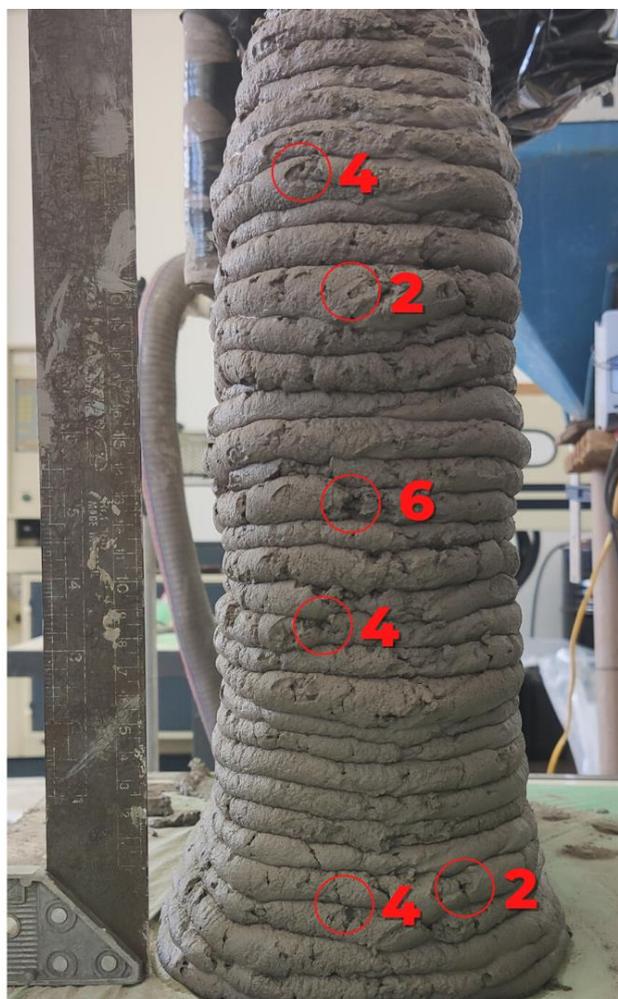


Figura 37 - Indicação de vazios encontrados na amostra D45-38-30. Números correspondem a largura em milímetros (medida na horizontal)

Os vazios encontrados no elemento impresso podem ser gerados pelo estiramento da argamassa ao deixar o bico de extrusão ou pela incorporação de ar na mistura, durante o bombeamento. Esse tipo de falha também foi encontrada em trabalhos similares, como Tay *et al.* (2019) e Ma *et al.* (2018).

Após a análise dos dados coletados em diferentes pontos da peça, não foi possível identificar uma correlação direta entre a medida dos vazios e a posição das camadas. Em outras palavras, não é possível afirmar que a presença de vazios em

uma determinada região da peça seja decorrente da posição da camada inferior ou superior. Esta observação sugere que outros fatores podem estar influenciando a formação dos vazios, como por exemplo, variações na composição do material utilizado ou no processo de impressão em si. Portanto, mais estudos são necessários para investigar as causas da formação de vazios e melhorar a qualidade do produto final.

A Figura 38 compara as imagens deste trabalho com outras encontradas na literatura a fim de identificar e confirmar que tal disposição de vazios é usualmente observada em outras pesquisas. É observada grande semelhança na quantidade e dimensão de vazios entre Figura 38(a) e Figura 38(b). Já para a imagem Figura 38(c), a menor quantidade de vazios se deve ao fato da composição utilizada por Ma *et al.* (2018) possuir slump inferior ao utilizado, o que levou ao aparecimento de distorções severas nas extremidades da amostra impressa.



Figura 38 - Comparativo entre a amostra D45-38-30 (deste trabalho) (a), e resultados de Tay et al., 2019 (b) e Ma et al., 2018 (c).

4.3 Resistência à Compressão

Os concretos da amostra extraída, T45-38, nas direções “X”, “Y” e “Z” apresentaram resistência média à compressão de 28,77MPa, 28,86MPa e 27,04MPa, aos 28 dias, respectivamente, Figura 39. A resistência à compressão do corpo de prova moldado de forma manual sem extração, apenas na direção “Z”, apresentou resultado médio de resistência de 65,45 MPa.

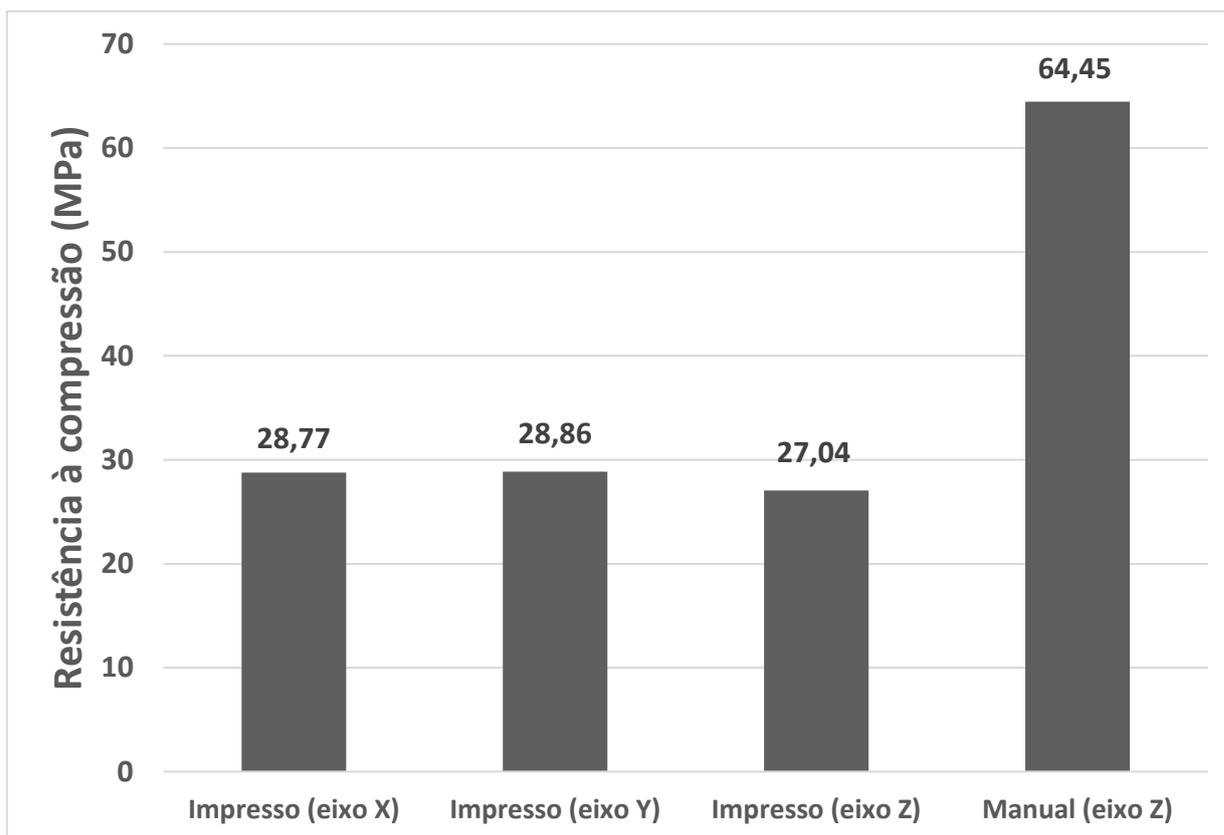


Figura 39 - Resistência à compressão por amostra

A similaridade de resistência a compressão entre os 3 eixos medidos indica que existe uma boa ligação entre camadas impressas, além da presença de vazios e falhas não contribuir de forma desigual para diferentes orientações de esforço. Chama-se a atenção para a condição em que a coesão entre as camadas tenha sido um ponto fundamental para que este resultado tenha sido alcançado.

O resultado de resistência inferior no eixo “z” pode ser explicado devido à falta de retlineidade da camada durante a impressão, sendo o elemento impresso desaprumado. Segundo Buswell et al (2018), um desalinhamento do eixo de deposição, ou seja, a perda do prumo no elemento impresso em conjunto com a aplicação da carga na orientação Z, facilita a ruptura e, conseqüentemente, perda da resistência final.

Resultados similares foram encontrados por Le et al, apontando valores de resistência à compressão semelhantes, independente da direção da remoção da amostra, com percentual de diferença de aproximadamente 10,8% entre as

orientações (LE *et al.*, 2012). Entretanto, se identificou pouca variação das amostras extraídas do elemento impresso contra o elemento moldado manual.

Os resultados de resistência à compressão superior dos corpos de prova moldados de forma manual em relação aos impressos foi identificado por outros autores (Yu e Du, 2020). Os autores indicam que possíveis pontos de falha e vazios no elemento final pode ser um fator que tenha ocasionado a redução. Eles indicam ainda que o estiramento excessivo e a alongação da argamassa durante a deposição ocasionaram o aparecimento de fissuras e vazios nos pontos de maior deformação.

A indicação de incorporação de ar na mistura durante o bombeamento da argamassa, gerando vazios, má aderência entre camadas e heterogeneidade na deposição durante a impressão é recorrente na literatura (LE *et al.*, 2012; NERELLA *et al.*, 2019; YU *et al.*, 2020; ANTON *et al.*, 2021). Considerando o aspecto visual das amostras obtidas, se considera que este fator que pode ter contribuído significativamente para os resultados de resistência mecânica. Um maior controle no processo de fabricação e ajuste no sistema de bombeamento do concreto podem levar a um aumento da resistência do elemento final impresso, se aproximando dos valores da argamassa moldada manualmente.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa avaliou a impressão de uma composição de argamassa por bombeamento obtendo uma deposição contínua. Foram identificados parâmetros importantes para controle da impressão e como eles afetam a geometria e resistência à compressão do elemento impresso nas direções x, y e z. Sendo estes resultados validos para o cenário utilizado, com o sistema de bombeamento e a composição da mistura apresentados.

O equipamento desenvolvido para bombeamento adequado de argamassa por uma tubulação flexível se mostrou válido, apesar de incluir uma parcela de ar durante o transporte. Essas condições levou a presença de falhas e vazios na peça impressa, o que influência sua resistência e pode contribuir para falha prematura de construção.

Foram medidos como os parâmetros altura da camada, distância entre paredes, velocidade de movimentação e número de paredes afetam a estabilidade do elemento impresso, sendo obtidos melhores resultados com deposição mais lenta e com paredes triplas.

Na avaliação de amostras com velocidades de deposição diferentes, a utilização de velocidades menores resultou em um aumento de 34% na altura total do artefato impresso. Distância entre camadas maiores geraram instabilidade no elemento, o que ocasiona: colapso prematuro, menor quantidade de camadas, maior largura média frente ao número de camadas impressas. Alturas de camadas menores proporcionam maior estabilidade, melhor interação entre camadas, menores alturas de camadas médias e maior variação de altura média ao longo da amostra, 15,4%.

A argamassa utilizada para o bombeamento e impressão foi analisada para determinar a resistência à compressão, sendo um parâmetro de base para comparar com a resistência do elemento impresso e que corresponde a um valor de aproximadamente 57% inferior a resistência à compressão da argamassa moldada de forma tradicional.

Em geral, os resultados sugerem que a *buildability* das amostras é melhorada quando se utiliza uma camada mais baixa. Isso fortalece a compreensão de uma maior estabilidade geométrica entre as camadas e uma menor deformação da mistura após

a deposição pelo bico contribui para a estabilidade do artefato, assim como um tempo mais longo entre as camadas de deposição apresenta resultados superiores.

Os achados desta pesquisa demonstram a viabilidade técnica e a delimitação de parâmetros importantes para a propagação da técnica de impressão 3D de argamassa como uma alternativa na construção de elementos. A adoção da tecnologia na construção civil pode levar a melhorias significativas de tempo e custo de construção, bem como aumento da liberdade geométrica.

5.1 Possibilidades de trabalhos futuros

- a) Analisar o sistema de bombeamento a fim de evitar incorporação de ar na mistura e identificar se os resultados de resistência da argamassa entre amostras impressas e moldadas ficam mais próximas;
- b) Analisar um elemento impresso em tamanho final de obra para conferir e aferir se os resultados de flambagem são coerentes;
- c) Analisar composições de misturas alternativas a fim de garantir maior rigidez no elemento impresso com menor quantidade de material;
- d) Estudar o limite de afastamento entre camadas que ainda gerem ligação suficiente entre camadas, para que não ocorra perda de resistência final;
- e) Avaliar *slump* mínimo para que o sistema de bombeamento funcione adequadamente e se ele apresenta outros resultados de empacotamento de camada;
- f) Replicar as amostras executadas em maiores quantidades para avaliar os resultados em maior escala.

REFERÊNCIAS

- _____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, Rio de Janeiro, (2015).
- _____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, (2018).
- _____. **ASTM 52900**: Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary.
- _____. **ASTM F2792-12a**, Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2012.
- _____. **ASTM. C143**, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, 2015.
- _____. **ASTM. C39**, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2020.
- ABOU YASSIN A., HAMZEH F., ALSAKKA, F. Agent based modeling to optimize workflow of robotic steel and concrete 3D printers. **Automation in Construction**, 110, 103040, 2020.
- AGUSTÍ-JUAN I., HABERT G. An Environmental Perspective on Digital Fabrication in Architecture and Construction. **In Proceedings of the 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA**, Melbourne, FL, USA, 797–806, 2016.
- AGUSTÍ-JUAN I., MÜLLER F., HACK N., WANGLER T., HABERT G., Potential benefits of digital fabrication for complex structures: environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall, **J. Clean. Prod.**, Volume 154, 330–340, 2017.
- ANELL L.H., Concrete 3D printer, **MSc thesis, Civil engineering**, Lund University, Suécia, 2015.
- ANTON, A., REITER L., WANGLER T., FRANGEZ V. FRANGEZ, FLATT R. J., DILLENBURGER B., A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns, **Automation in Construction**, Volume 122, 103467, 2021.

ASPRONE D., AURICCHIO F., MENNA C., MERCURI V., 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach, **Constr. Build. Mater.** 165, 218–231, 2018.

ASPRONE D., MENNA C., BOS F.P., SALET T.A.M., MATA-FALCON J., KAUFMANN W., Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete, **Cem. Concr. Res.** 112, 111–121, 2018.

BARNETT E., GOSSELIN C., Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot. **Additive Manufacturing**, 7, 27–44, 2015.

BOS F., WOLFS R., AHMED Z., SALET T., Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing, **Virtual and Physical Prototyping**, 11, 209-225, 2016.

BUSWELL R.A., LEAL DE SILVA W.R., JONES S.Z., DIRRENBERGER J., 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research, **Cem. Concr. Res.** 112, 37–49, 2018.

CHUA C., LEONG K. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications. **Fourth ed, World Scientific**, Singapore, 2014.

CRAVEIRO F., DUARTE J.P., BARTOLO H., BARTOLO P.J., Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: a perspective on construction 4.0, **Autom. Constr.**, Volume 103, 251–267, 2019.

DA SILVA, W.R.L., 3D Printed Constructions - Engineering Perspective, **Presentation Slides**, 2017.

DELGADO CAMACHO D., CLAYTON P., O'BRIEN W.J., SEEPERSAD C., JUENGER M., FERRON R., SALAMONE S., Applications of additive manufacturing in the construction industry – a forward-looking review, **Autom. Constr.** Volume 89, 110–119, 2018.

DUBALLET R., BAVEREL O., DIRRENBERGER J., Classification of building systems for concrete 3D printing, **Autom. Constr.**, Volume 83, 247–258, 2017.

FENG P., MENG X., CHEN J.F., YE L., Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders, **Construction and Building Materials**, Volume 93, 486-497, 2015.

GEERT DE SCHUTTER G., MECHTERINE V., HABERT G., Technical potential of 3D printing, economic and environmental potentials, **Cement and Concrete Research**, Volume 112, 25-36, 2018.

GIBSON I., ROSEN D.W., BRENT S., Additive Manufacturing Technologies, Springer, New York, 2010.

GOSSELIN C., DUBALLET R., ROUX P., GAUDILLIÈRE N., DIRRENBERGER J., MOREL P., Largescale 3D printing of ultra-high performance concrete—a new processing route for architects and builders, **Mater. Des.**, 100, 102–109, 2016.

GUAMÁN-RIVERA R., ROCAMORA A. M., ALVARADO R. G., SANGUINETTI C. M., BOHME L. F. G., CHEEIN F. A., Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts, **Buildings**, 12, 229, 2022.

HAGER I., GOLONKA A., PUTANOWICZ R., 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction. **Procedia Eng**, Volume 151, 292–299, 2016.

HOJATI M., NAZARIAN S., DUARTE J. P., RADLIŃSKA A., ASHRAFI N., CRAVEIRO F., BILÉN S., 3D printing of concrete: a continuous exploration of mix design and printing process, Conference Paper, **42nd IAHS World Congress, The housing for the dignity of mankind**, 2018.

HOU S., DUAN Z., XIAO J., YE J., A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design, **Construction and Building Materials**, Volume 273, 1-19, 2021.

HUANG S.H., LIU P., MOKASDAR A., HOU L., Additive manufacturing and its societal impact: a literature review, **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** 67, 1191–1203, 2013.

HULL C.W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. **US Patent 4575330**, 1986.

JUNK S., KUEN C., Review of Open Source and Freeware CAD Systems for Use with 3D-Printing, **Procedia CIRP**, Volume 50, 430-435, 2016.

KEITA E., BESSAIES-BEY H., ZUO W., BELIN P., ROUSSEL N., Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: measurement and physical origin, **Cem. Concr. Res.**, Volume 123, 1-7, 2019.

KHAN M. S., SANCHEZ F., ZHOU H., 3D printing of concrete: Beyond horizons. **Cement and Concrete Research**, 133, 106070, 2020.

KHOSHNEVIS B., Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies, **Autom. Constr.** 13 (1), 5–19, 2004.

KHOSHNEVIS B., BUKKAPATNAM S., KWON H., SAITO J., Experimental investigation of contour crafting using ceramics materials, **Rapid Prototy. J.**, Volume 7 (1), 32-42, 2001.

KHOSHNEVIS B., DUTTON R., Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials, **Mater. Technol.** 13 (2), 53–56, 1998.

KHOSHNEVIS B., ZHANG J. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting, **Automation in Construction**, Volume 29, 50-67, 2013.

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

LABONNOTE N., RØNNQUIST A., MANUM B., RÜTHER P., Additive construction: state-of-the-art, challenges and opportunities, **Autom. Constr.** 72, 347–366, 2016.

LE T. T., AUSTIN S. A., LIM S., BUSWELL R. A., GIBB A. G. F., THORPE T., Mix design and fresh properties for high performance printing concrete, **Materials and Structures** 45, pp. 1221-1232, 2012.

LE T.T., AUSTIN S.A., LIM A., BUSWELL R.A., LAW R., GIBB A.G.F., THORPE T., Hardened properties of high-performance printing concrete, **Cement and Concrete Research**, Volume 42, No. 3, 558-566, 2012.

LI Z., HOJATI M., WU Z., PIASENTE J., ASHRAFI N., DUARTE J. P., NAZARIAN S., BILÉN S.G., MEMARI A.M., RADLINSKA A.. Fresh and Hardened Properties of Extrusion-Based 3D-Printed Cementitious Materials: A Review. **Rapid Prototyping Journal**, Volume 24, 2018.

LIM J.H., WENG Y., PHAM Q.C., 3D printing of curved concrete surfaces using Adaptable Membrane Formwork, **Construct. Build. Mater.** Volume 232, 2020.

- LIM S., BUSWELL R., VALENTINE P., PIKER D., AUSTIN S., KESTELIER X., Modelling curved layered printing paths for fabricating large-scale construction components, **Addit. Manuf.**, Volume 12, 216–230, 2016.
- LIM S., BUSWELL R.A., LE T.T., AUSTIN S.A., GIBB A.G., THORPE T., Developments in construction-scale additive manufacturing processes, **Autom. Constr.** 21, 262–268, 2012.
- LLORET E., SHAHAB AR., LINUS M., FLATT R.J., GRAMAZIO F., KOHLER M., LANGENBERG S., Complex concrete structures: merging existing casting techniques with digital fabrication, **Computer-Aided Design**, Volume 60, 40-49, 2014.
- LLORET-FRITSCHI E., SCOTTO F., GRAMAZIO F., KOHLER M., GRASER K., WANGLER T., REITER L., FLATT R.J., MATA-FALCON J., Challenges of real-scale production with smart dynamic casting, in: T. Wangler, R.J. Flatt (Eds.), **First Rilem International Conference on Concrete and Digital Fabrication - Digital Concrete 2018**, Springer, Dordrecht, pp. 299–310, 2019.
- LOWKE D., DINI E., PERROT A., WEGER D., GEHLEN C., DILLENBURGER B., Particle-bed 3D printing in concrete construction – possibilities and challenges, **Cem. Concr. Res.** 112, 50–65, 2018.
- LU B., WENG Y., LI M., QIAN Y., LEONG K.F., TAN M.J., QIAN S., A systematical review of 3D printable cementitious materials, **Constr. Build. Mater.** Volume 207, 477–490, 2019.
- MA G., LI Z., WANG L.I., Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing, **Constr. Build. Mater.**, Volume 162,, 613–627, 2018.
- MA G., WANG L., JU Y., State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material — An emerging technique for construction. **Sci. China Ser. E Technol. Sci.**, 61, 475–495, 2017.
- MALAEB Z., HACHEM H., TOURBAH A., MAALOUF T., ZARWI N.E., HAMZEH F., 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. **Int. J. Civ. Eng. Technol.**, 6, 14–22, 2015.

MECHTCHERINE V., NERELLA V.N., WILL F., ATHER M. N., OTTO J., KRAUSE M., Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3Dprinting, **Autom. ConStruct.**, Volume 107, 2019.

MOHAMMAD M., MASAD E., AL-GHAMDI S.G. 3D Concrete Printing Sustainability: A Comparative Life Cycle Assessment of Four Construction Method Scenarios. **Buildings**, 10, 245, 2020.

MUELLER R. *et al.* Automated additive construction (AAC) for Earth and space using in-situ resources, **Proceedings of the Fifteenth Biennial ASCE Aerospace Division International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments (Earth & Space2016)**, 2016.

MURCIA D. H., GENEDY M., REDA TAHA M.M., Examining the significance of infill printing pattern on the anisotropy of 3D printed concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 262, 120559, 2020.

NERELLA V. N., KRAUS M., MECHTCHERINE V., Direct printing test for buildability of 3D-printable concrete considering economic viability, **Automation in Construction**, Volume 109, 2020.

NERELLA V.N., HEMPEL S., MECHTCHERINE V., Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing, **Constr. Build. Mater.**, Volume 205, 586-601, 2019.

NERELLA V.N., KRAUSE M., NÄTHER M., MECHTCHERINE V., CONPrint3D — 3D printing technology for onsite construction, **Concr. Australia**, Volume 42 (3), 36-39, 2016.

NERELLA V.N., KRAUSE M., NÄTHER M., MECHTCHERINE V., Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology (CONPrint3D), **Proceeding for the 25th Conference on Rheology of Building Materials**, Germany, 2016.

NGO T.D., KASHANI A., IMBALZANO G., NGUYEN K.T.Q., HUI D., Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges, **Compos. Pt. B Eng.**, Volume 143, 172–196, 2018.

PANDA B., NOOR MOHAMED N.A., PAUL S.C., BHAGATH SINGH G., TAN M.J., SAVIJA B., The effect of material fresh properties and process parameters on

buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete, **Materials (Basel)**, Volume 12 (13), 1-12, 2019.

PANDA B., PAUL S.C., MOHAMED N.A.N., TAY Y.W.D., TAN M.J. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar. **Measurement**, Volume 113, 108-116, 2018.

PANDA B., TAN M.J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. **Ceram. Int.**, 44, 10258–10265, 2018.

PAOLINI A., KOLLMANNBERGER S., RANK E., Additive manufacturing in construction: a review on processes, applications, and digital planning methods, **Add. Manufact.**, Volume 30, 2019.

PAUL S.C. *et al.*, A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects, **Rapid Prototyp. J.** 24, 784–798, 2018.

PEGNA J., Exploratory investigation of solid freeform construction, *Autom. Constr.* **5**, Volume 5, 427–437, 1997.

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

REITER L., WANGLER T., ROUSSEL N., FLATT R. J., The Role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete, **Cement and Concrete Research**, Volume 112, 86-95, 2018.

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

RUBIN A. P., Influência Da Taxa De Estruturação Nas Propriedades Reológicas, Físicas E Mecânicas De Concretos Para Impressão 3d (3DCP), **Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil**, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2021

SANJAYAN J. G., NEMATOLLAHI B., XIA M., MARCHMENT T., Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 172, 468-475, 2018.

SCHROFL C., NERELLA V.N., MECHTCHERINE V., Capillary water intake by 3D-printed concrete visualised and quantified by neutron radiography, in: T. Wangler, R. J. Flatt (Eds.), **First Rilem International Conference on Concrete and Digital Fabrication - Digital Concrete 2018**, Springer, Dordrecht, pp. 217–224, 2019.

SIDDIKA A., MAMUN M.A.A., FERDOUS W., SAHA A.K., ALYOUSEF R., 3D-printed concrete: applications, performance, and challenges, **J. Sust. Cement-Based Mater.**, 1–38, 2019.

SOUZA M. T., FERREIRA I. M., DE MORAES E. G., SENFF L., DE OLIVEIRA A. P. N., 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**, Volume 32, 1-15, 2020.

TAY Y.W.D., PANDA B., PAUL S.C., NOOR MOHAMED N.A., TAN M.J., LEONG K.F., 3D printing trends in building and construction industry: a review, **Virtual Phys. Protot.** **12** (3), 261–276, 2017.

TAY Y.W.D., QIAN Y., TAN M.J.. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. **Composites Part B**, Volume 174, 106968, 2019.

VAEZI M., SEITZ H., YANG S., A review on 3D micro-additive manufacturing technologies, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **67**, 1721–1754, 2013.

WANG Z. LI, L., MA G., Method for the enhancement of buildability and bending resistance of 3D printable tailing mortar, **International Journal of Concrete Structures and Materials**, Volume 12, pp. 37, 2018.

WANGLER T., LLORET E., REITER L., HACK N., GRAMAZIO F., KOHLER M., FLATT R., Digital concrete: opportunities and challenges, **RILEM Tech. Lett.** **1**, 67–75, 2016.

WANGLER T., ROUSSEL N., BOS F.P., SALET T.A.M., FLATT R.J., Digital concrete: a review, **Cem. Concr. Res.**, Volume 123, 2019.

WARSAWSKI A., NAVON R., Implementation of robotics in buildings: current status and future prospects, **Journal of Construction Engineering and Management**, Volume 124, 31 – 41, 1998.

WENG Y., LI M., TAN M. J., QIAN S., Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model, **Construction and Building Materials**, Volume 163, 2018.

WERKHEISER N.J., EDMUNSON J.E., FISKE M.R., KHOSHNEVIS, B. On the development of additive construction technologies for application to development of lunar/martian surface structure using in-situ materials. **AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition**. 2015.

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**, Volume 106, 103-116, 2018.

WOLFS R.J.M., BOS F.P., SALET T.A.M.. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. **Cement and Concrete Research**, Volume 119, 132-140, 2019.

YIN H., QU M., ZHANG H., LIM Y., 3D printing and buildings: a technology review and future outlook, **Technol. | Architecture+ Design 2** (1), 94–111, 2018.

YIWEI W., LU B., TAN M. J., QIAN, S. Rheology and printability of engineered cementitious composites-a literature review. **2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2016)**, 16-19, Singapore, 2016.

YU S., DU H., SANJAYAN J., Aggregate-bed 3D concrete printing with cement paste binder, **Cement and Concrete Research**, Volume 136, 106169, 2020.

ZHANG C., NERELLA V. N., KRISHNA A., WANG S., ZHANG Y., MECHTECHERINE V., BANTHIA N. Mix Design Concepts for 3D Printable Concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, 122, 104155, 2021.

ZHANG X., LI M., LIM J. H., WENG Y., TAY Y. W. D., PHAM H., PHAM Q., Large-scale 3D printing by a team of mobile robots, **Automation in Construction**, 95, pp. 98-106, 2018.

ZHANG Y., ZHANG Y., LIU G., YANG Y., WU M., PANG B., Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink, **Construction and Building Materials**, Volume 174, 2018.