



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LEONARDO DE SOUZA DIAS

**METODOLOGIA DE DOSAGEM COM BASE EM RELAÇÕES CONSTITUTIVAS
BÁSICAS DE MISTURAS PARA IMPRESSÃO 3D EM CONCRETO (3DCP)**

**Natal-RN
2022**

LEONARDO DE SOUZA DIAS

**METODOLOGIA DE DOSAGEM COM BASE EM RELAÇÕES CONSTITUTIVAS
BÁSICAS DE MISTURAS PARA IMPRESSÃO 3D EM CONCRETO (3DCP)**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

Natal-RN
2022

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Dias, Leonardo de Souza.

Metodologia de dosagem com base em relações constitutivas básicas de misturas para impressão 3d em concreto (3DCP) / Leonardo de Souza Dias. - 2022.

78 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Natal, RN, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

1. Engenharia Civil - Dissertação. 2. 3DCP - Dissertação. 3. Capacidade de impressão - Dissertação. 4. Squeeze-flow - Dissertação. I. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624(043.3)

LEONARDO DE SOUZA DIAS

**METODOLOGIA DE DOSAGEM COM BASE EM RELAÇÕES CONSTITUTIVAS
BÁSICAS DE MISTURAS PARA IMPRESSÃO 3D EM CONCRETO (3DCP)**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Presidente

Prof^ª. Dr^ª. Ana Cecilia Vieira da Nóbrega – Examinadora interna

Prof. Dr. Ulisses Targino Bezerra – Examinador externo

**Natal-RN
15 de fevereiro de 2022.**

Dedico este trabalho a Deus sempre presente em minha vida; e aos meus familiares e amigos, pela dedicação e apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por propiciar possibilidades únicas que, muitas das vezes, fugiam da minha compressão, mas que, no final, geravam grandes aprendizados.

Aos meus familiares, em especial a minha mãe Josefa Dias, por todo esforço, dedicação, conselhos e força para que eu pudesse alcançar meus objetivos e sonhos. A minha irmã Leandra Dias, que me proporciona refúgio nas horas difíceis, estando do meu lado sempre.

A João Pedro M. Capistrano, por todo apoio e paciência, sempre me encorajando e alimentando o sonho e projetos futuros, além de proporcionar conversas que sempre auxiliaram a me acalmar em muitas etapas da rotina acadêmica.

Aos professores que fizeram parte da minha formação, em especial ao meu orientador Marcos Alyssandro, pela confiança depositada neste trabalho, e por todas as conversas e direcionamentos, sempre fazendo com que eu pudesse enxergar as decisões certas a serem tomadas para enriquecer os estudos.

A Iarley M. e Rivagner R. na ajuda e apoio para montagem da impressora. Sem esse auxílio não seria possível a execução dessa pesquisa.

Aos amigos e colegas do grupo de pesquisa 3DPC, em especial a Marcela Sena. Sem sombra de dúvida esses laços foram uma das maiores conquistas nesses anos, obrigado pelos momentos vividos, e acima de tudo por todo o conhecimento e experiência compartilhados.

À banca examinadora pelas contribuições ao trabalho apresentado.

Ao IFPB – Câmpus João Pessoa, UFPB e UFRN, câmpus sede, pelas condições e estruturas disponibilizadas ao desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão de mais uma etapa da minha vida.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre
aquilo que todo mundo vê” (Arthur
Schopenhauer).

RESUMO

A impressão 3D utilizando materiais cimentícios tem ganhado destaque em pesquisas recentes, porém, ainda existem muitas lacunas nos parâmetros necessários para a dosagem das misturas com capacidade de impressão, pois tais parâmetros dependem da interação entre o sistema de impressão (tipo de impressora, bombeamento, extrusão, velocidade de impressão, etc) e as propriedades intrínsecas das misturas cimentícias, como granulometria dos materiais, tipos de cimento e adições minerais, relações volumétricas água/ligante, volume de pasta/agregados, volume de pasta, volume de água e relação areia/sólidos totais. Este artigo analisou seis misturas para impressão com variações nas relações cimento:areia (em massa), mantendo constante a relação água/materiais secos, avaliando a capacidade de impressão dessas misturas em uma impressora 3D tipo pórtico com movimentação mecanizada em seus eixos, possuindo um bico extrusor de deposição do material. A avaliação da capacidade de impressão foi realizada levando-se em consideração os aspectos visuais, de bombeabilidade e integridade do filamento, sendo as misturas posteriormente submetidas a ensaios de *mini-slump*, espalhamento em mesa de consistência, *squeeze-flow* e deformação sobre carga dos filamentos impressos em intervalos de impressão de 0 min, 15 min e 30 min, determinando em seguida as faixas ideais das relações constitutivas das misturas compatíveis com a impressão. Determinaram-se as propriedades no estado endurecido, resistência à flexão e à compressão, aderência entre as camadas, massa específica e índice de vazios de corpos de provas extraídos de peças impressas com cortes em tamanhos conforme especificação em normas de cada ensaio. Foi possível observar que para o sistema de impressão utilizado há uma faixa ideal para essas relações constitutivas, e que as misturas, mesmo apresentando viscosidades diferentes, medidos de acordo com o *squeeze flow*, podem ser imprimíveis, desde que atendam as faixas ideais para as relações determinadas. Com relação a interface das camadas impressas, essas são ponto crítico de fragilidade, possivelmente devido a fatores como formação de regiões com vazios e perda de umidade superficial, o que favorece a redução do desempenho mecânico das peças, principalmente com o aumento do tempo de deposição.

Palavras-chave: 3DCP; capacidade de impressão; *squeeze-flow*; estado endurecido.

ABSTRACT

Printing using cementitious materials has gained prominence in recent years, but there is still a lot of research on the gaps with printing capacity, as such parameters depend on the interaction between the printing system (printing type, pump, extrusion, printing speed, etc.) and as intrinsic properties of cementitious mixtures, such as material granulometry, types of cement and additions, water/binder volumetric ratios, mass/aggregates volume, mass volume, water volume and sand/total solids ratio. This kind of mixes constant mixes for printing with variations in ratios: maintaining the ability of dry prints to a mixture of printers/printing materials with 3 mechanized ratio of cements, having a cement material deposition extruder nozzle. The consistency of the printability was carried out by evaluating the mixability and visual aspects of the filament, being later changed in mini-mesabelump, spreading, and formation tests under load of the printed printers at printing intervals of 0 min, 15 min and 30 min, then determining the constitutive ratio ranges of the idealized mixtures with a print. Properties not tested and adjusted for strength parts, strength and resistance between assembly specifications, specific parts for each specimen. The printing models, as long as they are used for an inclusion the idealized printing systems to be configured and mixed, even according to different ones, that meet the idealized printing system to be configured different, which can be used as essential as ideals. determined. With the formation of the interface of the printed parts, possibly due to critical factors such as the regions with the void formation and the loss of surface moisture, which improves the reduction of the mechanical performance of the parts, mainly the increase of the position time.

Keywords: 3DCP; printability; squeeze-flow testing; hardened state.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Tendências do mercado da Manufatura Aditiva.	23
Figura 2 - Construções em impressão 3D de concreto: a) casa verde da Southeast University; b) ponte para pedestres da Universidade de Tsinghua; c) laje de concreto leve da Universidade de Graz; d) primeira residência unifamiliar impressa no Brasil.	24
Figura 3 - Seção transversal das amostras impressas no intervalo de tempo de: a) 1 min; b) 5 min; c) 10 min; e d) de 20 min	28
Figura 4 - Geometria da seção extrudada a uma taxa de fluxo de: a) 1.1; e b) 1.4. Estrutura impressa com mesmas condições de processo e material com bico: c) reto padrão; e d) projetado	29
Figura 5 - Direção do carregamento em amostras extrudadas	35

CAPÍTULO 3

Figura 6 - Caracterização granulométrica do agregado	38
Figura 7 - a) e b) Equipamentos e execução do ensaio.....	39
Figura 8 - Caracterização granulométrica do cimento e metacaulim.	40
Figura 9 - a) e b) Definição da relação água/materiais secos ideal para as condições de impressão, traço de referência (1:2)	41
Figura 10 - Fluxograma experimental.....	42
Figura 11 – Equipamento de impressão 3DCP/IFPB-UFRN.	43
Figura 12 - Ensaio no estado fresco: (a) mini-slump, (b) espalhamento na mesa de consistência	45
Figura 13 - (a) Determinação da velocidade e taxa de impressão (b) Camadas impressas, mistura 1:1.5.	46
Figura 14 - Produção e obtenção das amostras para o ensaio de deslocamento vertical e aderência entre as camadas.	47
Figura 15 – Esquema da execução do ensaio de aderência entre as camadas.	48
Figura 16 - a) direção de extração e aplicação de carga; b) exemplo de configurações de ensaio.	49

CAPÍTULO 4

Figura 17 - Abatimento e espalhamento da mistura e suas relações V_a/V_{aglo} e C_{paste}	51
Figura 18 - Retenção de forma e espalhamento.	52
Figura 19 - Aspecto das misturas imprimíveis (a) mix 1:1.5 (b) mix 1:2.0 (c) mix 1:2.5.	52
Figura 20 - Parâmetros constitutivos das composições.	53
Figura 21 - Fluxograma para dosagem de uma mistura 3DCP.	54
Figura 22 - Aspecto da mistura 1:0,25:3 imprimível.	55
Figura 23 - <i>Squeeze flow</i> das amostras imprimíveis.	56
Figura 24 - Resistência a flexão de misturas impressas aos 28 dias.	58
Figura 25 - Resistência à compressão (F_z) das misturas imprimíveis após 1 e 28 dias, e densidade aparente e porosidade aos 28 dias.	59
Figura 26 – Perda de trabalhabilidade das misturas (tempo em aberto).	60
Figura 27 - Resistência da aderência entre camadas com diferentes intervalos.	61

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 - Compilação de composições de diferentes referências.	16
--	----

CAPÍTULO 3

Tabela 2 - Parâmetros dos materiais a serem estudados e suas normas correlatas.	38
Tabela 3 - Propriedades físicas do agregado.	39
Tabela 4 – Composições adotadas.	43

CAPÍTULO 4

Tabela 5 - Parâmetros de dosagem para traços imprimíveis.	53
Tabela 6 - Análise estatística para o comportamento mecânico à flexão.	58
Tabela 7 - Análise estatística para o comportamento à compressão.	60
Tabela 8 - Análise estatística entre as misturas no instante T0.	61
Tabela 9 - Análise estatística das misturas nos instantes T0, T15 e T30.	62

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- %S - Teor de agregado total em relação a mistura)
- 3DCP - Impressão 3D com concreto
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- Cf - Consumo de finos
- MA - Manufatura aditiva
- MCS - Materiais cimentícios suplementares
- ag/aglo- Relação agregado/aglomerante
- SP - Aditivo superplastificante
- HPMC - Aditivo modificador de viscosidade
- V_p - Volume de pasta
- V_p/V_{ag} - Relação volume de pasta/volume de agregado
- V_a/V_{aglo} - Relação água/aglomerante
- A/Ms- Relação água/materiais secos (W/Md)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Aspectos históricos gerais da manufatura aditiva.....	21
2.2	Características relevantes dos processos a impressão.....	25
2.3	Materiais empregados nas misturas	30
2.4	Parâmetros de controle.....	33
2.4.1	Extrudabilidade e Capacidade de construção	34
2.4.2	Resistência mecânica e ligação entre camadas.....	35
3	METODOLOGIA	37
3.1	Materiais	37
3.1.1	Agregado.....	38
3.1.2	Aglomerante e adições	40
3.2	Método de dosagem.....	40
3.3	Sistema de impressão, mistura e cura	42
3.4	Fluidez e perda de trabalhabilidade	44
3.5	Retenção de forma	45
3.6	<i>Squeeze flow</i>	46
3.7	Aderência entre as camadas em função do tempo de impressão	47
3.8	Resistência à tração na flexão	48
3.9	Resistência à compressão.....	49
3.10.	Densidade e porosidade aberta	49

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	Fluidez e retenção de forma.....	50
4.2	Relações constitutivas para dosagem.....	52
3.3	<i>Squeeze flow</i>	55
3.4	Resistência à flexão e à compressão	57
3.5	Aderência entre as camadas em função do tempo de impressão	60
5	CONCLUSÕES	64
5.1	Sugestões para estudos futuros	65
6	REFERÊNCIAS	66

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, vem ganhando espaço e se tornando uma ferramenta intensificadora nos avanços da automação da indústria da construção civil. Essa tecnologia está baseada na junção de materiais para o desenvolvimento de uma estrutura tridimensional a partir de um modelo digital projetado. Especialmente na construção civil, existem diversas vantagens que favorecem a aplicação da impressão com concreto 3DCP tais como: o aumento da complexidade arquitetônica que o sistema proporciona, redução de custos, entre eles os relacionados ao uso de fôrmas e do tempo de produção; condições ligadas à segurança dos trabalhadores; além de fatores de sustentabilidade como a diminuição de desperdícios (HE *et al.*, 2020; SCHUTTER *et al.*, 2018). Estima-se que esta tecnologia possa ser capaz reduzir de 30% a 60% dos resíduos de construção, 50% a 80% dos custos de mão de obra e 50% a 70% do tempo de produção (ZHANG *et al.*, 2019; YASSIN; HAMZEH; SAKKA, 2020).

Apesar de promissora, a tecnologia de impressão 3D de misturas cimentícias para a construção ainda apresenta muitos desafios no nível técnico e de processamento (SCHUTTER *et al.*, 2018; SALET *et al.*, 2018), pois ainda não estão disponíveis códigos ou procedimentos para testar misturas e novos materiais, ou para analisar as propriedades estruturais do material cimentício utilizado para a impressão 3D (SALET *et al.*, 2018; KAZEMIAN *et al.*, 2017). Alguns trabalhos analisaram as propriedades no estado fresco do material para impressão 3DCP através de ensaios de abatimento, *mini-slump*, espalhamento na mesa de consistência e *squeeze flow* (SHAKOR; NEJADI; PAUL, 2019; TAY; QIAN; TAN, 2019), outros associaram as medidas de tensão de escoamento, viscosidade e tixotropia (ZHANG *et al.*, 2018). No estado endurecido as amostras de 3DCP são avaliadas em cilindros ou prismas com dimensões comumente utilizados para argamassa ou concreto moldados, contudo não há uma padronização nos tamanhos das amostras, como pode ser visto quando se comparam os espécimes empregados nos trabalhos de Ye *et al.* (2021), Zareiyan e Khoshnevis (2017), Zhang *et al.* (2019) e Moelich *et al.* (2021). No entanto, a aplicação de parâmetros de ensaios em estruturas de concreto impresso a partir da manufatura aditiva ainda não foi validada (SALET *et al.*, 2018). Portanto, esta falta de consenso na forma de avaliar produtos e processos para impressão 3DCP pode gerar insegurança em investidores e consumidores finais e atrasar aplicações práticas sobretudo em países onde o desenvolvimento dessa tecnologia ainda está na fase inicial.

A composição dos materiais empregados para impressão 3DCP requer alguns ajustes de viscosidade e tensão de escoamento do compósito cimentício ao sistema de impressão, para tanto muitos trabalhos utilizam superplastificante para reduzir a tensão de escoamento, facilitando o bombeamento e a extrusão. Com o objetivo de controlar viscosidade e estabilidade de impressão são utilizados grandes consumos de cimento, baixas relações água/cimento e elevadas quantidades de materiais cimentícios suplementares (MCS), o que faz com que vários trabalhos utilizem relação agregado/aglomerante (s/b) entre 1,0 e 1,5, e apenas algumas pesquisas utilizam relações maiores, da ordem de 1,80 a 2,54. As maiores relações ag/aglo supracitadas estão atreladas ao maior uso de MCS, como pode ser visto no recorte bibliográfico apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Compilação de composições de diferentes referências.

Referência	Cim:areia:a/c	MCS	Outros materiais	s/b	Consumo de cimento (kg/m ³)
Zhang <i>et al.</i> (2019)	1:0,6:0,35	sílica ativa	-	0,6	≈ 1094
	1:0,8:0,35	sílica ativa	-	0,8	≈ 1011
	1:1:0,35	sílica ativa	-	1,0	≈ 939
	1:1,2:0,35	sílica ativa	-	1,2	≈ 877
	1:1,5:0,35	sílica ativa	-	1,5	≈ 798
Buswell <i>et al.</i> (2020)	1:1,47:0,40	cinza volante e sílica ativa	calcário em pó	1,47	588
	1:1,47:0,40	cinza volante e sílica ativa	-	1,47	588
	1:1,55:0,28	-	calcário em pó	1,55	840
	1:1,55:0,28	-	-	1,55	840
	1:2,45:0,40	cinza volante e sílica ativa	calcário em pó	2,45	448
	1:2,54:0,28	-	calcário em pó	2,54	640
Ding <i>et al.</i> (2020)	1:1:0,305	-	-	1,00	≈ 980
	1:1:0,305	-	areia reciclada	1,00	≈ 967
Hasse <i>et al.</i> (2020)	1:1,67:0,41	sílica ativa	-	1,67	706
Xiao <i>et al.</i> (2020)	1:1:0,35	-	-	1,0	≈ 939
	1:1:0,35	-	areia reciclada	1,0	≈ 933
Ding <i>et al.</i> (2020)	1:1:0,35	-	-	1,0	≈ 947
Ma <i>et al.</i> (2019)	1:1,20:0,38	cinzas volantes e sílica ativa	-	1,20	≈ 726
Marchment and Sanjayan (2020)	1:1,5:0,3	cinzas volantes e sílica ativa -	-	1,5	≈ 652

Pham <i>et al.</i> (2020)	1:1:0,37	sílica ativa e escória de alto forno	-	1,0	483*
Rahul and Santhanam (2020)	1:1,5:0,40	cinzas volantes	-	1,5	660
Nerella <i>et al.</i> (2019)	1:2,2:0,42	-	-	2.2	627
	1:1,8:0,42	cinzas volantes e sílica ativa	-	1,8	391*
Xiao <i>et al.</i> (2021)	1:1:0,35		Nano-argila	1,0	320**
Ye <i>et al.</i> (2021)	1:0,30:0,55	cinzas volantes, sílica ativa	-	0,30	655

≈ valor aproximado calculado com base nas composições apresentadas pelo autor;

* consumo de cimento atingido por meio de uso de elevados teores de MCS;

** consumo de cimento atingido por meio de uso de elevado teor de nano-argila.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A maioria dos trabalhos reduziram a quantidade de cimento com a inclusão de adições minerais, como sílica ativa, cinza volante e escória de alto forno (ZHANG *et al.*, 2019; KASZYŃSKA; SKIBICKI, 2020; HASSE *et al.*, 2020; NERELLA *et al.*, 2019; YE *et al.*, 2021), o que pode influenciar no custo das misturas, além dificultar a disseminação dessa tecnologia em países em desenvolvimento ou em regiões sem produção local desses tipos de adições, como no caso do nordeste brasileiro. Desta forma, fazem-se necessários estudos com materiais alternativos que possam desenvolver a tecnologia 3DCP utilizando materiais com ampla disponibilidade local.

Outro fator que pode dificultar a disseminação dessa tecnologia 3DCP é que, para a dosagem de compósitos 3DCP, há necessidade de estudo da reologia desses materiais através de ensaios que requerem equipamentos específicos e não rotineiros na tecnologia do concreto. Alguns trabalhos propõem metodologias de dosagem com foco na fluidez da pasta de cimento e teor ideal de agregado, propondo uma faixa de impressão relacionada com abatimento e espalhamento da mistura (TAY; QIAN; TAN, 2019), ou ainda através de testes mais complexos com base na reologia do material, através da determinação de sua tensão de escoamento e viscosidade plástica (ZHANG *et al.*, 2019).

Sabe-se que para impressão 3D em concreto o principal teste a ser realizado é a capacidade de construção, e isto está intimamente ligado à composição ideal da mistura 3DCP

compatível com o sistema de impressão. Além disso, sabe-se ainda que protocolos de testes muito complexos baseados em reologia são de difícil acesso ao dia a dia das construções. Portanto, o presente trabalho visa avaliar quais são as relações constitutivas para dimensionamento de composições 3DCP imprimíveis, baseadas em relação volume de pasta/volume de agregado (V_p/V_{ag}), consumo de finos (C_f), volume de pasta (V_p), relação água/finos (V_a/V_f), teor de agregado total em relação a mistura (%S), volume de pasta (V_p) e relação agregado/material cimentício (s/b), propondo um método de dosagem baseado nessas relações e na capacidade de impressão, manutenção de forma e acabamento final. Procedimentos de dosagens com base nas relações de V_p/V_{ag} , consumo de finos, consumo de água e fluxograma de dosagem, semelhantes aos propostos nesta dissertação, são bastante utilizados em concretos autoadensáveis (EFNARC, 2005; NEPOMUCENO; OLIVEIRA; LOPES, 2014) e proporcionaram o amplo desenvolvimento e uso do concreto autoadensável CAA na construção civil.

1.1 Justificativa

A produtividade na indústria da construção estagnou desde a segunda metade da década de 1990, se mostrando em um grande contraste com a melhoria consistente da produtividade em outros segmentos da indústria, dando destaque ao setor de manufatura. Uma das formas promissoras de melhorar a produtividade, e que tem crescido nos últimos anos, é por meio da automação dos processos construtivos, como no caso do uso de equipes multifuncionais em projetos de construção (CHEN; SOTO; ADEY, 2018; SVEIKAUSKAS *et al.*, 2016).

A impressão 3D de concreto tem recebido atenção significativa da indústria da construção e de pesquisadores em todo o mundo e se mostra como uma alternativa promissora e de impacto sobre as demandas do setor. Vários estudos sobre a temática que abordam as principais tecnologias empregadas na impressão 3D, os aspectos de desenvolvimento das misturas e as propriedades efetivas do material impresso vêm sendo publicadas e reforçam o potencial de aplicação que essa metodologia pode ter na indústria da construção civil.

Nesse sistema é importante saber que a garantia da qualidade das estruturas impressas é função da comunicação entre as características dos materiais e das propriedades da mistura empregada, como também do controle dos padrões de impressão, o intervalo de tempo entre a deposição de camadas, os efeitos do formato do bico de saída sobre a geometria do material extrudado e sua estabilidade, a taxa de fluxo do material e a velocidade de impressão (TAY *et al.*, 2018; LAO *et al.*, 2020; TAY, LI e TAN, 2019; SHAKOR *et al.*, 2020).

Nesse sentido, fica claro a necessidade de um estudo que correlacione os aspectos de impressão, incluindo as características individuais do equipamento utilizado, e as relações constitutivas das misturas, com a finalidade de desenvolver compósitos para impressão capazes de oferecer de forma satisfatória um bom desempenho mecânico, estético e com durabilidade. No entanto, como mencionado, ainda existe uma falta de consenso e uma não validação dos parâmetros de ensaios e avaliação dos produtos e processos para impressão 3DCP o que pode levar ao desestímulo e um desafio para os avanços da nova tecnologia.

Diante do que inicialmente foi discutido, é perceptível a necessidade do aperfeiçoamento dos processos construtivos, buscando fomentar a demanda que se instaura no mercado da construção civil, tentando melhorar as questões de produtividade da construção, além de outros fatores, como sustentabilidade, redução de desperdícios, ampliação das possibilidades arquitetônicas, aumento da segurança nas obras, entre outros, sendo a 3DCP uma possibilidade. No entanto, para aplicação de tal tecnologia, ainda é preciso o estudo e reconhecimento de relações básicas de mistura e sistema de impressão que auxiliem na elaboração de metodologias de dosagens.

Posto isso, o presente estudo visa colaborar com a redução destas lacunas no conhecimento, partindo da construção de um equipamento cartesiano automatizado capaz de proporcionar impressões de misturas cimentícias, e avaliação de relações constitutivas básicas de traços 3DCP, produzidos com materiais normalmente comercializados e utilizados na construção civil. Com isso, espera-se que essas relações sejam também valiosas para o desenvolvimento de metodologias mais simplificadas para dosagem de 3DCP.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar quais são as faixas de valores das relações constitutivas básicas de composições 3DCP que sejam imprimíveis, propondo um método de dosagem baseado nessas relações e nos aspectos de capacidade de impressão, manutenção de forma e acabamento do filamento.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver misturas extrudáveis por meio da variação dos materiais, de forma que atendam a aspectos de impressão satisfatórios aos constantes da literatura;

- Analisar as propriedades das misturas em seu estado fresco e endurecido frente à variação das composições cimentícias estudadas;
- Avaliar a influência do intervalo tempo, tanto no material em seu estado fresco, como também no estado endurecido;
- Verificar a possibilidade de impressão por meio da adequação de misturas não imprimíveis aos limites encontrados das relações constitutivas, com a utilização de metacaulim;
- Estabelecer e entender as propriedades e características necessárias das misturas para o bom funcionamento da impressora desenvolvida e como essas intervêm no produto extrudado;

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será abordada algumas concepções gerais acerca da 3DCP tratada na literatura, a fim de uma maior compreensão do processo.

2.1 Aspectos históricos gerais da manufatura aditiva

A Manufatura Aditiva (MA) pode ser definida como um processo automatizado, baseado na fabricação em camadas de um objeto tridimensional a partir de um modelo geométrico desenvolvido com o emprego de um sistema CAD (*Computer Aided Design*) (ALBAR *et al.*, 2020; ALHUMAYANI *et al.*, 2020). Outras terminologias como Prototipagem Rápida, Manufatura Digital Direta, Fabricação de Forma Livre Sólida e Impressão 3D (atualmente a mais difundida), descrevem a mesma família da tecnologia de MA, produzindo suas estruturas por meio da adição de materiais, em contrapartida aos métodos tradicionais subtrativos e formativos, fundamentados na remoção e moldagem de seus componentes (ABDULHAMEED *et al.*, 2019; AL RASHID *et al.*, 2020; BUSWELL *et al.*, 2007).

Embora seja considerada uma tecnologia recente, a MA tem sua origem datada desde o século XIX, como destacado por Bourella *et al.* (2009), vinculada as práticas da fotoescultura proposta em 1860 pelo francês François Willème, e da topografia com a construção de mapas de relevos em camadas patenteada por Blanther em 1890. No entanto, foi somente nos anos iniciais de 1980 que o processo ganhou notoriedade com sua associação as ferramentas CAD e automatizadas, o que ampliou sua utilização, observando-se o depósito de patentes em diversos lugares como Japão, França e EUA, que descreviam a partir de abordagens distintas a fabricação de modelos tridimensionais por meio da construção de camadas (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2009).

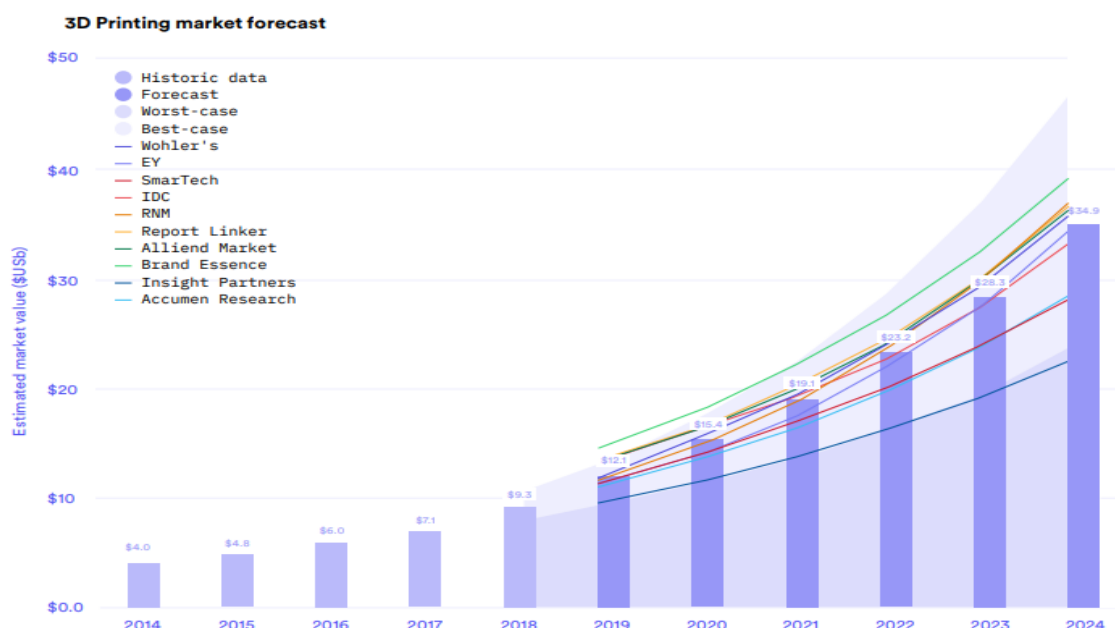
Entre os principais processos desenvolvidos na década de 1980 pode-se destacar a patente depositada em 1987 por Charles Hull, um dos mais influentes nomes quando se trata da impressão 3D, cofundador da empresa americana 3D Systems, a primeira empresa a comercializar a tecnologia MA e, até então, uma das maiores organizações no setor. A técnica consiste na solidificação de finas camadas de um polímero líquido sensível à luz ultravioleta (UV), sendo essa denominada de estereolitografia (SLA), que passou a ser vendida em 1988 (BOURELL *et al.*, 2009; ABDULHAMEED *et al.*, 2019; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2009).

Ainda na mesma década, outros processos foram patenteados e auxiliaram no impulsionamento da indústria da MA, como é o caso da tecnologia de sinterização seletiva a laser (SLS), depositada em 1988 por Carl Deckard da Universidade do Texas, que se baseia na utilização de laser para sinterizar ou derreter um material particulado formando camadas. Além desse, tem-se também a modelagem por deposição fundida (FDM) desenvolvida por Scott Crump e registrada em 1989, que corresponde a extrusão de material termoplástico aquecido construindo o objeto impresso em camadas (ABDULHAMEED *et al.*, 2019; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2009).

Foi a partir da década de 1990 que ocorreu o crescimento significativo da comercialização da tecnologia aditiva, como também a implantação de empresas especializadas, entre elas: modelagem por deposição fundida (FDM) vinculada a Stratasys; a cura sólida na base (SGC) da Cubital, que utiliza radiação UV e resina fotossensível solidificando totalmente camada impressa; a manufatura de objetos em lâminas (LOM) da Helisys, baseado na construção a partir materiais em forma de folhas (metal, papel ou polímeros específicos) unidos convenientemente a depender da matéria-prima empregada, podendo ocorrer por consolidação ultrassônica, adesivos, calor, pressão, entre outros processos; e a fundição por produção direta (DSPC) vendida pela Soligen, sendo essa desenvolvida pelo MIT, um mecanismo que utiliza jatos no depósito de líquidos aglutinantes em pós cerâmicos para sua solidificação (BOURELL *et al.*, 2009).

Nos últimos anos, os métodos e técnicas da MA vêm crescendo e se desenvolvendo em um ritmo acelerado, ganhando abrangência com aplicação em diversas segmentos, como automotivo, aeroespacial, médico, alimentar e da construção civil, além de ampliar a sua participação no mercado com uma projeção de ascensão ao longo dos próximos anos, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Tendências do mercado da Manufatura Aditiva.



Fonte: 3DHUBDS (2020).

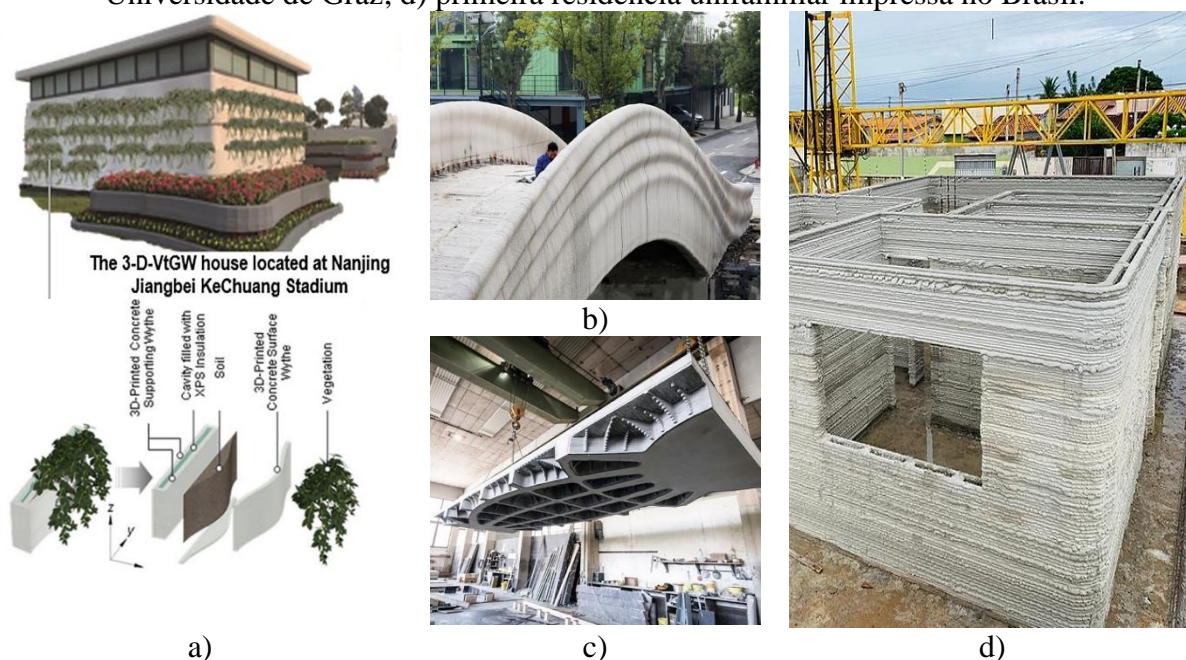
Essa tendência é decorrência de diversos fatores que, inclui o aumento da precisão e qualidade dos objetos impressos, a disponibilidade de materiais, diminuição de custos atrelados aos equipamentos, entre outros contribuiu para que o mercado global de impressão 3D atingisse, no ano de 2019, um valor estimado em US \$ 12,1 bilhões, correspondendo a um crescimento médio de 25% ao ano desde 2014, sendo esperado para os próximos anos, como observado na Figura 1, que o mercado cresça em média 24% ao ano, dobrando seu tamanho a cada três anos e alcançando um valor de US \$ 35,0 bilhões em 2024.

Apesar das diferentes tecnologias e avanços nos processos de MA, essas não eram recorrentes no mercado da engenharia civil. Foi apenas no final da década de 1990 que os métodos desenvolvidos nos estudos pioneiros de Pegna, com a união seletiva em camada por vapor de uma mistura de areia/cimento, e de Koshnevis, com um processo de extrusão de material cerâmico chamado de *Contour Crafting* patenteada em 2010. Esses, além de revelar o potencial da MA no setor da construção, instigaram novas pesquisas, como é o caso da impressão por leito de pó, em que as camadas são formadas com a deposição de pó e unidas com aglutinante líquido e, a mais popular atualmente, a impressão baseada em extrusão, fundamentado na montagem em camadas do objeto a partir de um filamento contínuo com auxílio de um bico (KHAN; SANCHEZ; ZHOU, 2020; MOHAN *et al.*, 2021; RASHID *et al.*, 2020).

Desde então, vários estudos sobre a MA de materiais cimentícios vem sendo desenvolvidos, abordando aspectos da elaboração de misturas, como também a avaliação do desempenho e comportamento mecânico dos objetos impressos, o que possibilitou uma maior

exploração das possibilidades do uso na construção de edificações e estruturas. Como no caso dos pesquisadores da Southeast University (Nanjing, China), do Nanjing Institute for Green Intelligent Additive Manufacturing Co. Ltd. (Nangjing, China) e da Universidade do Tennessee (Knoxville, Tennessee, EUA) projetaram em conjunto um edifício de concreto impresso 3D com integração de um sistema de parede verde para economizar energia em edifícios, protótipo localizado no Estádio Jiangbei Kechuang, Nanjing, China, observado na imagem a da Figura 2 (KHAN; SANCHEZ; ZHOU, 2020).

Figura 2 - Construções em impressão 3D de concreto: a) casa verde da Southeast University; b) ponte para pedestres da Universidade de Tsinghua; c) laje de concreto leve da Universidade de Graz; d) primeira residência unifamiliar impressa no Brasil.



Fonte: KHAN; SANCHEZ; ZHOU, 2020; ANTON *et al.*, 2021; INOVAHOUSE3D, 2020.

Vários projetos de ponte também ampliam a gama de aplicações da impressão 3D de concreto, como o caso da ponte para pedestres, Figura 2 b, da Universidade de Tsinghua que foi produzida inteiramente por meio de processos de MA. Outra estrutura a se destacar diz respeito aos protótipos de lajes impressas, como o teto de concreto leve projetado na Universidade de Graz, Austrália, Figura 2 c, que incorpora a metodologia de automação para a fabricação de lajes nervuradas para aplicação na construção civil (ANTON *et al.*, 2021).

No Brasil, entre os anos de 2016 e 2017 foi iniciado o projeto de uma máquina de impressão de peças de concreto junto a Universidade Potiguar, no Rio Grande do Norte. O equipamento se baseia em um sistema automatizado cartesiano e tem dimensões de 7,6 m x 12,0 m x 3,0 m (LxPxA). Em 2019, a equipe responsável desenvolveu a construção da sua primeira

edificação, uma casa de 66,81m², Figura 2d, no município de Macaíba, Rio Grande do Norte, sendo essa executada em 48 h e montada sobre fundações convencionais (INOVAHOUSE3D, 2020).

2.2 Características relevantes dos processos a impressão

A construção em uma abordagem automatizada e vinculada a um modelo tridimensional se apresenta por meio de um dos processos: o leito de partícula (*Particle-bed*), baseado na impressão a jato do aglutinante em uma base com pó; ou a impressão de concreto (*Concrete Printing*), estruturada na extrusão de uma mistura cimentícia (YU; DU; SANJAYAN, 2020; LAO *et al.*, 2020).

O processo de leito de partícula, salvo as especificidades de suas variantes, consiste na deposição em camadas de um material em pó, no qual se solidificará no formato desejado. Essa transformação pode ocorrer por meio de métodos como fusão, sinterização, ou aplicação de uma fase fluida aglutinante, como nas situações com materiais cimentícios, em que por meio de um bico de impressão a mistura envolve de maneira seletiva as partículas que compõe o leito. Posteriormente, a peça modelada é retirada da base e o pó excedente ao objeto é removido podendo ser reutilizado (LOWKE *et al.*, 2018; TAY *et al.*, 2018; INGAGLIO *et al.*, 2019; SHAKOR *et al.*, 2020).

Uma das características do procedimento em leito de partículas é a possibilidade de impressão de estruturas complexas, em comparação aos demais métodos, com geometrias elaboradas e direções diversas. Essa concepção é facilitada pelas condições de produção, que propicia um suporte a peça sem a necessidade de escoras ou apoios. No entanto, esse mesmo fator se torna limitante para uma construção *in situ*, como também para produzir peças contínuas de grandes dimensões (TAY *et al.*, 2018; SHAKOR *et al.*, 2019).

Ainda sobre a abordagem de impressão em leito de partículas é importante destacar que, assim como os métodos convencionais na produção de estruturas de concreto e demais materiais cimentícios, os procedimentos da execução e do pós-processamento influenciam nas propriedades e desempenho final do objeto impresso. Esse fator é base de estudos levantados que abordam aspectos como o intervalo de tempo entre os planos de impressão, orientação da construção e temperatura de cura.

Shakor, Nejadi e Paul (2020) apresentam em seu estudo os efeitos que diferentes intervalos de tempo no processo de impressão podem gerar nas propriedades mecânicas da estrutura construída. As amostras estudadas, produzidas a partir de uma mistura composta por

cimento aluminato de cálcio, cimento Portland comum e areia fina (75 μm a 150 μm), foram submetidas a intervalos distintos (100, 200, 300 ms), sendo analisado o comportamento mecânico à compressão em 3 dias e 7 dias. Foi observado que o aumento do intervalo levou um ganho de resistência, sendo o tempo de 200 ms o que apresentou melhor desempenho, seguido de 300 ms. Os autores afirmam que esse comportamento é o resultado de um melhor espalhamento e uniformidade do aglutinante depositado, uma vez que possibilita maior penetração nas direções laterais e verticais na superfície do pó. Por outro lado, ao se estender esse tempo o ligante pode se infiltrar em camadas inferiores do leito e comprometer a junção entre os filamentos, e conseqüentemente a resistência alcançada.

A orientação dos planos de impressão também possui forte impacto sobre o desempenho mecânico da estrutura impressa, como mostrado no estudo realizado por Shakor *et al.* (2019a) que avaliaram, entre outros parâmetros, a influência de diferentes ângulos (0°, 30°, 37,5°, 45°, 90°), com relação ao plano de impressão do leito, nas resistências mecânicas a flexão e compressão. Os resultados apresentaram que a orientação de 90° alcançou o maior desempenho à compressão entre as demais amostras, seguida de 0° e tendo 30° como ponto crítico com menor resultado. No que diz respeito a flexão, a orientação de 0° mostrou-se com resistência superior, seguido do ângulo de 30° e como ponto mais baixo a orientação de 37,5°.

A influência da temperatura de cura das estruturas impressas, com base no processo de leito em pó, também foi um estudo conduzido por um dos trabalhos encontrados. Shakor *et al.* (2019b) avaliaram os efeitos nas propriedades mecânicas de peças de argamassa, composta por cimento aluminato de cálcio, cimento Portland comum e areia fina (75-150 μm), curadas em um forno com faixas de temperaturas distintas (40, 60, 80, 90 e 100° C). Foi observado que o aumento da temperatura até a faixa de 80°C elevou a resistência tanto a compressão como a flexão. Para os autores, assim como observado na literatura, isso pode ser decorrência da aceleração nas reações do cimento, aumentando a dissolução de alumina e sílica das partículas que não reagiram, levando a uma maior disponibilidade no sistema. Essa alta proporção de alumina também é favorecida pela composição do material rico em cimento aluminato de cálcio. De forma contrária a tendência observada, para temperaturas superiores a 80°C ocorre uma diminuição no desempenho mecânico das amostras. Esse comportamento, de acordo com os autores, ocorre uma vez que em sua temperatura limite, as quantidades extras dos componentes dissolvidos reagem e formam rapidamente uma camada sobre a superfície das partículas, o que inibe novas dissoluções e provoca a diminuição da resistência das amostras.

Já no processo de impressão de concreto (*Concrete Printing*) baseado em extrusão, método utilizado nessa pesquisa, consiste em uma deposição do material cimentício em camadas

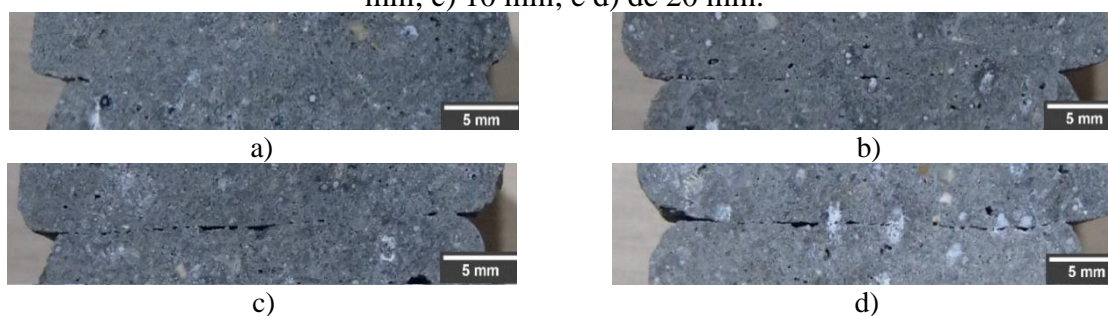
sobrepostas de um filamento contínuo (aproximadamente de 6 mm a 50 mm) seguindo um caminho definido pela modelagem computacional. Esse sistema é composto por duas partes principais: as ferramentas de alimentação, transporte e extrusão (incluindo o eixo transportador/impulsor e o bico de saída); e o conjunto portante automatizado e posicional (BUSWELL *et al.*, 2018; PANDA *et al.*, 2019).

Diferente do método em leito de partículas, a impressão por extrusão possibilita a construção de estruturas *in situ* e com dimensões menos limitadas de forma contínua. Isso se dá devido as características dos equipamentos empregados, geralmente grandes pórticos ou robôs com braços mecânicos que promovem uma construção ascendente das camadas, inclusive em locais permanentes. Entretanto, um desafio desse processo diz respeito a estabilidade do objeto impresso, uma vez que os filamentos extrudados são continuamente carregados, devendo esses se autossustentarem para evitar significativas deformações ou até mesmo o colapso. Esse comportamento leva a limitação de concepções de projeto com geometrias complexas, sendo necessário em algumas situações apoios temporários (BUSWELL *et al.*, 2018; NERELLA *et al.*, 2019).

A garantia da qualidade das estruturas impressas, assim como no método anterior, não é unicamente uma função das características dos materiais ou das propriedades da mistura empregada, essa depende também do controle dos padrões de impressão. Entre os estudos levantados que tratam da tecnologia baseado em extrusão, a interferência de alguns desses processos foram avaliados como, o intervalo de tempo entre a deposição de camadas, os efeitos do formato do bico de saída sobre a geometria do material extrudado e sua estabilidade, a taxa de fluxo do material e a velocidade de impressão.

Tay *et al.* (2018) investigaram os efeitos de diferentes intervalos entre a impressão do filamento inicial e os subsequentes a partir de observações macroscópica e mecânicas. A mistura tinha em sua composição cimento Portland comum, sílica ativa, cinza volante e areia natural de rio, impressa nos intervalos de 1 min, 5 min, 10 min e 20 min. No que diz respeito a força de ligação entre as camadas, essa foi medida por meio de tração direta, sendo observada uma redução logarítmica com uma queda acentuada entre os intervalos de 1 min e 5 min, e pouco significativa entre os demais valores. Esse comportamento pode ser causado por alterações na ligação interfacial das camadas, como é observado na Figura 3, o surgimento de uma separação física formada por vazios.

Figura 3 - Seção transversal das amostras impressas no intervalo de tempo de: a) 1 min; b) 5 min; c) 10 min; e d) de 20 min.

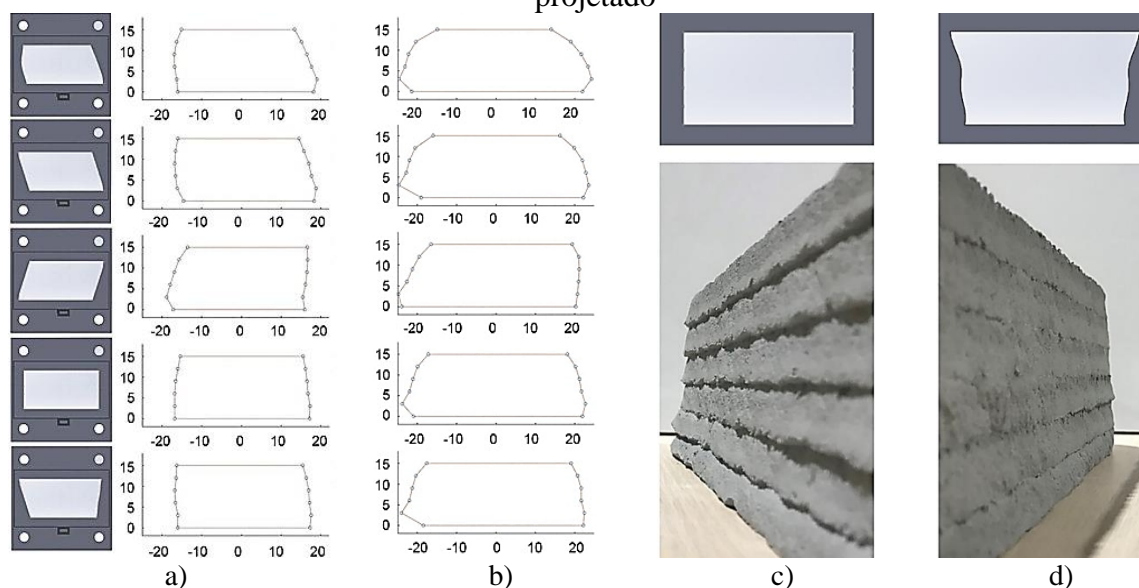


Fonte: Adaptado de Tay *et al.*, (2018).

Mesmo para intervalos de tempo curtos, entre a primeira e segunda amostra, a interface das camadas reagem de formas distintas. Para os autores à medida que a nova camada é sobreposta a superfície do filamento inferior, esse pode se reorganizar de modo a acomodar as tensões impostas e promover a ligação entre as faces. Com o avanço no tempo a rigidez do material aumenta e assim a interação é prejudicada, surgindo os vazios apresentados nas imagens da Figura 3, uma vez que a energia da deposição não é mais suficiente para promover a reorganização nas interfaces.

Outro aspecto que se busca controlar na impressão é a qualidade no acabamento de suas superfícies. Nessa perspectiva, Lao *et al.* (2020) exploram a possibilidade de controlar a geometria do extrudado por meio do formato do bico de impressão para o aprimoramento das faces, sendo utilizado uma abordagem experimental e um modelo de Rede Neural Artificial. Foram confeccionadas amostras de treze bicos diferentes, sendo as seções transversais dessas submetidas a análise de imagem com auxílio do MATLAB, e por meio de um modelo preditivo foi montado um banco de dados com possíveis bico/extrudado, com intuito de determinar um formato ideal para a situação desejada. Os autores verificaram que o bico influencia significativamente a formação final do filamento, como observado nas imagens da Figura 4, em que a mudança pode proporcionar superfícies com resultado estético mais aceitável.

Figura 4 - Geometria da seção extrudada a uma taxa de fluxo de: a) 1.1; e b) 1.4. Estrutura impressa com mesmas condições de processo e material com bico: c) reto padrão; e d) projetado



Fonte: Adaptado de Lao *et al.* (2020).

Constatou-se ainda que a influência do bico na forma do extrudado é afetado pela taxa do fluxo do material empregado, como mostrado na Figura 4 nas imagens a e b. O aumento da vazão provoca um alongamento horizontal nas amostras, principalmente na região inferior. Essas deformações passam a ser cada vez mais independentes do formato do bocal de extrusão à medida que as taxas são mais altas, sendo necessário dessa forma um controle duplo para alcançar a geometria final desejada (LAO *et al.* 2020).

Outro fator que combinado com o fluxo do material afetam as propriedades mecânicas e estéticas da estrutura impressa diz respeito a velocidade do bico de saída. Esse fenômeno foi observado nos estudos de Tay, Li e Tan (2019), em que 32 amostras foram produzidas com velocidades e vazões distintas de 60 mm/s, 80 mm/s, 100 mm/s, 120 mm/s, 140 mm/s, 160 mm/s e 200 mm/s e 37,9 ml/s, 45,0 ml/s, 48,0 ml/s e 51,3 ml/s, respectivamente. Observando as seções e a integridade do filamento extrudado, os autores verificaram que em baixas velocidades e fluxos mais elevados a área impressa são maiores que em situação opostas, isso devido ao volume maior de material depositado, trazendo uma melhora na ligação entre as camadas e consequentemente no comportamento mecânico, no entanto o excesso de material provoca deformações acentuadas, principalmente lateralmente, o que reflete diretamente no acabamento final da superfície da estrutura.

Em uma situação contrária, baixo fluxo e velocidades elevadas, foi verificado um número acentuado de fraturas ao longo do filamento, causadas pelo atrito entre o material e o substrato

que associado ao rápido deslocamento levam ao cisalhamento do extrudado (TAY, LI e TAN, 2019).

Essa característica da variação da velocidade sobre a seção do extrudado também foi constatada por Shakor *et al.* (2020c), que aplicando velocidades distintas (11,96; 23,78; 34,99; 46,56; 60,32; 70,97; 81,56 e 98,88mm/s) obteve comportamento semelhante ao mencionado, com fraturas para altas velocidades e alteração da geometria do filamento em comparação ao diâmetro do bico chegando até 6 mm de amplitude.

2.3 Materiais empregados nas misturas

A impressão 3D tendo aspecto de produção automatizada, não se isenta do desenvolvimento de um planejamento e seleção dos processos e materiais utilizados na composição do produto a ser impresso. As etapas devem ser cuidadosamente previstas, uma vez que podem comprometer o desempenho do produto.

Diversos fatores afetam a qualidade da estrutura impressa, não sendo diferente para os materiais que integram a mistura. Com base nos resultados observados da busca nas bases científicas, muitos trabalhos estão direcionados a compreender o efeito da composição de concretos, argamassas e compósitos cimentícios nas propriedades finais da estrutura impressa. A seguir são mostrados os principais materiais encontrados e alguns dos seus impactos na impressão 3D.

Agregado: Dentro dos estudos levantados uma variedade de agregados foram identificados, tais como: areia de rio (PANDA *et al.*, 2019; PANDA *et al.*, 2018; ZHU *et al.*, 2019); areias calcárias (BAZ *et al.*, 2020; KHALIL *et al.*, 2017); além de areia com alto teor de cal (Hosseini *et al.*, 2019); e agregados reciclados advindos da construção (DING *et al.*, 2020; DING, XIAO ; ZOU *et al.*, 2020). As faixas granulométricas são predominantemente de finas e médias, sendo registrada dimensões máximas de até 4,75mm (ZAREIYAN; KHOSHNEVIS, 2017a), no entanto foi identificada a utilização de agregado leve de argila expandida com diâmetro de até 10mm (RAHUL; SANTHANAM, 2020), como também agregados de diâmetro máximo de 12,5 mm (ZAREIYAN; KHOSHNEVIS, 2017b). Um limitante mencionado na seleção dos grãos diz respeito ao diâmetro do bico injetor e a espessura do filamento impresso (EL CHEIKH *et al.*, 2017; MOHAN *et al.*, 2020);

Ligante: Os principais cimentos encontrados na literatura são do tipo: Cimento Portland de alta resistência inicial, com maior representatividade para os classificados pela designação brasileira como CP V, sendo verificado também a utilização dos tipos CP II e CP IV (KRUGER,

ZERANKA; ZIJL, 2019; DING *et al.*, 2020; DING, XIAO; ZOU *et al.*, 2020); Além de cimento sulfoaluminoso (CSA) (CHEN *et al.*, 2020; ZHU *et al.*, 2019; KHALIL *et al.*, 2017); e o cimento de aluminato de cálcio (CAC) (SHAKOR *et al.*, 2020; SOLTAN ; LI, 2018; KRUGER, ZERANKA ; ZIJL, 2020). De acordo com Long *et al.* (2019) o cimento Portland apresenta-se como material adequado a impressão 3D devido as suas propriedades inerentes a tixotropia, no entanto entre outras motivações o alto consumo e o aprimoramento das propriedades da mistura levam a formulações com uso de adições e aditivos;

Adições/Aditivos: Entre as adições e aditivos empregadas nos estudos selecionados, verificou-se o uso de: Cinza volante (XU; ŠAVIJA, 2019; KRUGER, ZERANKA; ZIJL, 2019; MA *et al.*, 2020); sílica ativa, também apresentada como sílica fume e microsílica (DING, XIAO; ZOU *et al.*, 2020; PANDA *et al.*, 2018; CHOUGAN *et al.*, 2020); outros modificadores reológicos como celulose de metila e microcristalina (CHEN; FIGUEIREDO *et al.*, 2020; LONG *et al.*, 2019; DING *et al.*, 2020); materiais argilosos como nano argilas e argila calcinada (ZHANG *et al.*, 2019; DING *et al.*, 2020; MOEINI, HOSSEINPOOR; YAHIA, 2020); fíler calcário (FURET, POUILLAIN; GARNIER, 2019; BAZ *et al.*, 2020; CHEN; RODRIGUEZ *et al.*, 2020); escória de alto-forno (CHOUGAN *et al.*, 2020; LU *et al.*, 2020; LI, WANG; MA *et al.*, 2020); e metacaulim (CHEN *et al.*, 2020; CHEN; FIGUEIREDO *et al.*, 2020; DEDENIS *et al.*, 2020); Além de fibras de aço, polipropileno e vidro (FALLIANO *et al.*, 2019; HAMEED *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2020; FIORETTI *et al.*, 2020).

Um estudo que se apresenta nesse contexto é o realizado por Zareiyan e Khoshnevis (2017b), em misturas produzidas com cimento de sulfoaluminato de cálcio, cimento Portland comum tipo I e com agregado de tamanhos máximos distintos (2,3; 4,7; 6,25; e 12,5 mm), com uma proporção agregado/cimento de 1,15, além de aditivos superplastificantes e modificador de viscosidade. Em que foi observado os efeitos do teor dos grãos no desempenho mecânico do objeto impresso por extrusão. Ensaio de compressão aos 14 e 28 dias mostraram que a amostra com agregados de menor dimensão apresentou maior resistência, sendo registrado um aumento de 104% para a faixa de 2,3 mm em comparação com mistura com 12,5 mm.

Outro estudo que retrata a influência do agregado no processo de impressão foi desenvolvido por El Cheikh *et al.* (2017), investigando a partir de uma abordagem numérica e experimental o bloqueio na extrusão de argamassas provocados pelo agregado. Para tanto, foram avaliados os efeitos da dimensão inferior de abertura do bico, das propriedades reológicas da pasta de cimento e do volume da pasta no bloqueio, sendo numericamente realizada uma simulação do escoamento do material usando método de elementos discretos (DEM) e para a verificação e etapa experimental foram usadas duas argamassas: uma preparada misturando

contas de vidro de 4,0 mm com cimento e água, ensaiados em um bico com abertura inferior de 9 mm, 13 mm e 17 mm; e outra com areia padrão CEN (2009), em conformidade EN 196-1 e da ISO 679, cimento e água, com bico de 6 mm e 9 mm.

Foi o verificado numericamente que para razões diâmetro da abertura inferior / diâmetro dos agregados maiores que 4 não ocorreu bloqueio, sendo sugerido que esse comportamento não é afetado pela tensão de escoamento nem pela proporção volumétrica da pasta. Esse comportamento foi similar para volume de pasta superior a 0,54 para ambas as misturas testadas. No entanto, com uma razão de aproximadamente 4,25, e uma proporção de volume de exatamente 0,54, um bloqueio foi detectado. De acordo com os autores, isso se deve ao fato de que no modelo a camada formada pela pasta de cimento flui junto aos agregados enquanto, experimentalmente, durante a obstrução a pasta pode se separar dos grãos e se torna semelhante ao meio composto de grânulos secos.

Já com relação aos efeitos dos outros componentes da mistura Chen *et al.*(2020), avaliam em seu trabalho o impacto da utilização de diferentes teores do modificador de viscosidade a base de hidroxipropil-metilcelulose (HPMC), um retentor de água derivado de éter de celulose, (nas proporções de 0,14%, 0,24% e 0,48% da massa do ligante) em uma argamassa de cimento Portland e argila calcinada, com uma areia de quartzo de diâmetro máximo de 2 mm, observando os efeitos de impressão e o desempenho mecânico. Entre as misturas testadas a composta com 0,24% do modificador apresentou as melhores características em comparação as demais. Com relação a primeira proporção a dosagem de 0,24% obteve uma melhor estabilidade de forma e capacidade de construção, já em relação a 0,48% exibiu uma pressão de extrusão mais adequada, maior tempo de abertura (que está relacionado ao seu tempo de pega, sendo o período que a mistura mantém uma trabalhabilidade extrudável) e capacidade de construção equivalente as demais. Outro ponto destacado pelos autores é o retardo da hidratação do cimento com o aumento do teor do aditivo, que pode ter sido causado por um possível controle da adsorção de C-S-H e a precipitação massiva de portlandita.

Tao *et al.* (2020) também avaliaram os efeitos de adições em misturas para impressão, no caso a substituição do cimento por pó de calcário, nas propriedades frescas e endurecidas da argamassa. Foram preparados seis traços distintos variando a relação areia (diâmetro máximo de 2 mm)/aglutinante (1,79 e 1,39 por volume) e promovendo substituições pela adição (0%, 25% e 50% por volume do cimento). No estado fresco foi observado, por meio do teste do *squeeze flow*, que o aumento da substituição levou a diminuição da estabilidade, se mostrando negativo por oferecer riscos de colapso. Se tratando do estado endurecido, o aumento da adição provocou um acréscimo de retração e uma redução nas resistências a compressão e a flexão, obtendo para

as misturas com 25% do pó de calcário uma resistência a compressão superior a 30 MPa, 28% e 13% da resistência das suas amostras de controle.

Soltan e Li (2018) também realizaram um estudo observando os efeitos que os componentes de sua mistura produzem na trabalhabilidade da argamassa para impressão. No total, cinco amostras foram montadas variando seus constituintes, sendo esses: o cimento aluminato de cálcio, hidroxipropil-metilcelulose, microsílica e sílica moída e nano argila de atapulgita, além de fibra sintética de álcool polivinílico (PVA) que não sofreu variação. A avaliação da trabalhabilidade se deu pelo ensaio da fluidez na mesa de abatimento, realizada em dois momentos: aos 28 min com metade do volume da mistura e em 43 min com o restante da argamassa que permaneceu na cuba com argamassadeira ligada, permitindo verificar a perda da consistência com a agitação contínua. Os autores observaram que o hidroxipropil-metilcelulose foi eficiente no controle da fluidez inicial, no entanto provocou alterações no endurecimento, diferentemente do cimento de aluminato de cálcio que se mostrou eficaz em ambas as situações. A nano argila reduziu o tempo de endurecimento e a consistência da mistura, já com relação a microsílica e sílica moída que foram substituídas por uma fração de areia de sílica provocaram um aumento da taxa de endurecimento, mantendo a consistência inicial.

2.4 Parâmetros de controle

Como observado, inúmeros fatores interferem na qualidade e desempenho de uma estrutura impressa, desde características ligadas a execução do processo até as que possuem relação com os materiais e misturas empregadas. Assim, como nas demais abordagens construtivas, fazer o controle e mensurar as propriedades, bem como definir parâmetros técnicos relevantes é essencial para o desenvolvimento de qualquer construção, como também base para o aprimoramento dos métodos que envolve a tecnologia em questão.

Entre os parâmetros apresentados e levantados na literatura, as atribuições que de maneira mais representativa são apresentados nos estudos, estão os vinculados: a extrudabilidade, que está ligada a propriedade da mistura ser bombeada e transportada pelos dispositivos associados ao equipamento de impressão até a saída; a capacidade de construção, relacionada as deformações do filamento impresso, mais especificamente a de manter sua forma com a sobreposição das camadas e do seu próprio peso; e o desempenho mecânico, incluindo a adesão entre as faces dos extrudados e resistência a compressão e flexão (PANDA *et al.*, 2019; SOLTAN; Li, 2018).

A extrudabilidade e capacidade de impressão são parâmetros relacionados a reologia da mistura, sendo influenciados de forma oposta. Enquanto o primeiro requer uma trabalhabilidade alta para possibilitar a movimentação do material até a deposição do extrudado, a segunda necessitada de maior estabilidade para mitigar as deformações e possibilitar o empilhamento dos filamentos impressos. As propriedades mecânicas não estão isentas dessa influência, a depender da consistência do material podem surgir falhas na junção das camadas ou no próprio filamento. Sendo assim deve se buscar um equilíbrio dessas características, mensurando e controlando as mistura e processo para se obter o melhor desempenho estrutural (CHEN *et al.* 2020; SOLTAN; LI, 2018; LAO *et al.*, 2020).

Nesse sentido serão apresentados os principais métodos de medição abordados pelos estudos levantados, observando os parâmetros de extrudabilidade, capacidade construtiva e o desempenho mecânico nas resistências a compressão, flexão e aderência entre as camadas.

2.4.1 Extrudabilidade e Capacidade de construção

Entre os trabalhos que tratam das características fresca do material relacionadas a extrudabilidade, esses buscam avaliar a partir do comportamento da fluidez da mistura um estado que atendam o transporte do material, desde o armazenamento até o bico de saída do sistema. Já para a capacidade de construção se baseiam no empilhamento dos filamentos observando as deformações geradas.

Chen *et al.* (2020) avaliaram os efeitos da hidroxipropil-metilcelulose em uma argamassa para impressão 3D, determinou a fluidez realizando o ensaio da mesa de abatimento baseado na ASTM C1437 (2015), com os diâmetros de espalhamento medidos no intervalo de 10 a 120 min de descanso, a cada 10 min, observando o instante da redução desse. Associados a esse teste e para obter maiores características da extrudabilidade, os autores determinaram as taxas de fluxo de material e as pressões de extrusão, sendo essas registradas em diferentes vazões da mistura, modificada e mensurada pelo controlador da bomba. Com relação a capacidade de construção, essa foi verificada por meio da estabilidade de forma, a partir da relação entre a altura final de uma estrutura impressa em cinco camadas, com velocidade constante e após 30 min de descanso, e a altura de um objeto projetado para possuir 67,5 mm.

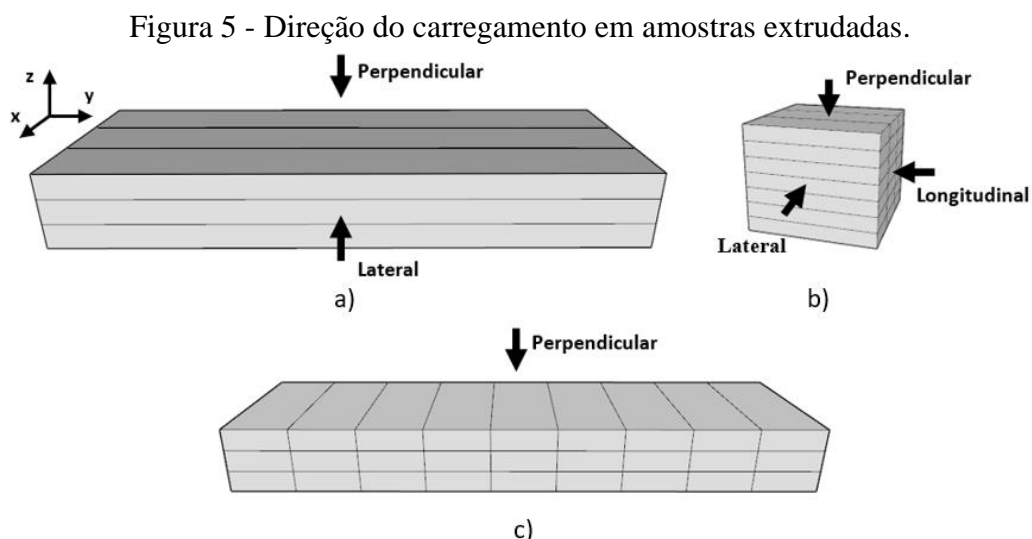
Baz, Aouad e Remond (2020) analisaram em sua pesquisa a ligação entre armadura de aço e argamassa impressa em função das suas propriedades frescas, observando entre outros parâmetros os comportamentos de extrudabilidade e capacidade de construção. Para o primeiro parâmetro foi medida a fluidez do material com base no teste ASTM C1437 (2015). Já para a

capacidade de construção verificou-se visualmente a deformação do material impresso em camadas, comparando os valores das misturas estudadas, sendo esse construído manualmente no formato de parede por meio de uma pistola com bico de 1 cm de diâmetro.

Long *et al.* (2019) buscou em seu estudo o desenvolvimento de uma mistura cimentícia sustentável contendo celulose microcristalina, avaliando as características no estado fresco do material. No que diz respeito a fluidez, essa foi determinada com base no ensaio da mesa de abatimento de acordo com a GB T2419 (2005), sendo o diâmetro de espalhamento medido aos 0, 20, 40 e 60 min. Com relação a capacidade de construção, a mesma foi verificada por meio da deformação da estrutura impressa fazendo comparação com um objeto projetado em cinco camadas com altura total de 100 mm.

2.4.2 Resistência mecânica e ligação entre camadas

A maioria dos trabalhos selecionados nas bases de dados avaliam as propriedades mecânicas observando as solicitações de compressão, flexão e tração, sendo essa última para verificar o estado de adesão entre as camadas. Os ensaios de resistência à compressão são realizados em amostras moldadas e obtidas diretamente de estruturas impressas. Outro ponto importante diz respeito às características anisotrópicas proporcionadas pela composição em filamentos, que levam a necessidade da aplicação de cargas em múltiplas direções, como apresentado na Figura 5.



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2019).

Zhang *et al.* (2019) estudaram uma mistura cimentícia de alta tixotropia, em que entre outras propriedades as características mecânicas fazem parte de sua abordagem metodológica. Para avaliar esse comportamento um bloco impresso de 500 x 500 x 110 mm foi serrado em

amostras de 100 x 100 x 100 mm, direcionados para o ensaio de compressão uniaxial com taxa de carregamento de 2 kN/s nas direções da imagem b da Figura 5, além de corpos de prova de 100x100x400 mm para flexão com taxa 10 N/s nas direções das imagens a e c da Figura 5, todos ensaiados aos 28 dias em cura úmida.

Le *et al.* (2012) também avaliaram as propriedades endurecidas de um concreto 3D, com agregado fino reforçado com fibra de alto desempenho, analisando amostras moldadas e impressas testadas com 1, 7 e 28 dias em cura úmida. As amostras para compressão são formadas por cubos com 100 mm de aresta, formadas por corpos de prova moldados convencionalmente e retirados por serragem de placas extrudadas com 350 x 350 x 120 mm e 500 x 350 x 120 mm, sendo ensaiadas conforme a BS EN 12390-3 (2009), nas direções da imagem b da Figura 5, a uma taxa de carregamento de 0,4 N/mm². Para flexão foram moldadas vigas de 100 x 100 x 500 mm, como também foram extraídas de uma placa impressa com 500 x 350 x 120 mm três amostras de 100 x 100 x 400 mm, essas foram testadas por flexão de quatro pontos com base na BS EN 12390-5 (2009), nas direções das imagens a e c da Figura 5, obedecendo o sentido dos filamentos. A aderência entre as camadas foi mensurada em conformidade com a BS EN 14488-4 (2008), por meio de tração direta em cilindros tubulares de 58 mm de diâmetro e 120 mm de altura retirado de uma placa de 100 x 100 x 500 mm.

Arunothayan *et al.* (2020) avaliaram o comportamento mecânico de uma mistura para impressão reforçada com fibra de ultra alto desempenho. Para resistência à compressão foram moldados e extraídos de uma amostra impressa cubos de 25 mm de aresta, ensaiados a 90 dias com uma taxa de carregamento de 20 MPa/min nas direções da imagem b da Figura 5. De forma semelhante corpos de provas moldados e impressos foram submetidos a determinação da resistência à flexão realizada pelo teste de três pontos, sendo o formato avaliado como dimensões de 25 x 25 x 280 mm para ambas as situações, com carregamento nas direções da imagem b da Figura 5, a uma taxa de 1 mm/min. Para avaliar a aderência entre as camadas, amostras de 50 x 25 x 25 mm, composto por duas camadas com entalhes de profundidade de 5 mm nas extremidades das interfaces, tiveram sua superfície superior e inferior fixadas em um suporte em forma de T e levadas a tração direta uniaxial com deslocamento de 1mm/min.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado o programa experimental da pesquisa, sendo esse um estudo experimental de natureza aplicada e com uma abordagem quantitativa, no qual foi estabelecido de forma sistematizada uma série de procedimentos para auxiliar no desenvolvimento de informações acerca do fenômeno estudado, além de sintetizar e analisar esses dados para desenvolver uma explicação mais abrangente. Do ponto de vista dos procedimentos práticos, a investigação dividir-se-á em sete etapas:

- 1ª Etapa: levantamento teórico e conceitual;
- 2ª Etapa: desenvolvimento e aprimoramento da impressora 3D;
- 3ª Etapa: caracterização dos agregados e aglomerante;
- 4ª Etapa: estudo da dosagem das misturas;
- 5ª Etapa: produção das mostras;
- 6ª Etapa: experimentação destrutiva e não destrutiva dos compostos cimentícios;
- 7ª Etapa: fim a coleta, análise e inferência dos resultados.

O estudo foi majoritariamente realizado nas instalações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) – Câmpus João Pessoa, sendo os procedimentos experimentais desenvolvidos nos Laboratórios de Materiais de Construção e Desempenho Mecânico. Sendo realizados também ensaios nas instalações da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e Universidade Federal do Rio Grande do Norte, nos departamentos de Engenharia Civil e Mecânica.

3.1 Materiais

Para os materiais utilizados para composição das misturas, utilizou agregados da região, além de cimento utilizado e comercializado localmente e aditivo disponível em nível regional, esses foram processados e caracterizados quanto aos principais aspectos físicos, sendo realizados os ensaios apresentados na Tabela 2, para cada tipo de material e as respectivas normas adotadas.

Tabela 2 - Parâmetros dos materiais a serem estudados e suas normas correlatas.

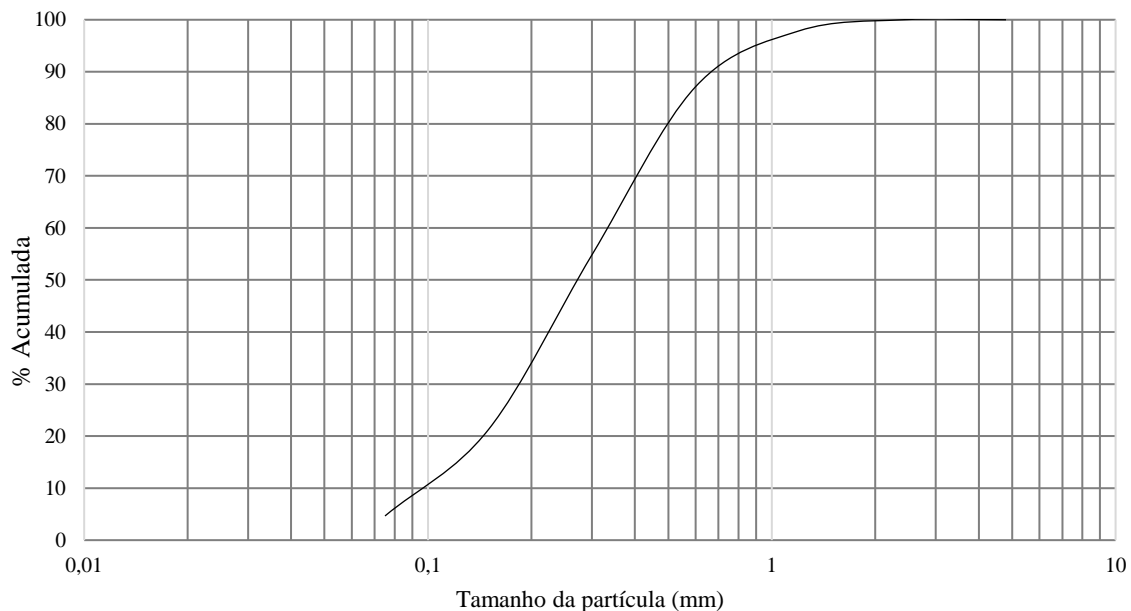
Material	Propriedade	Norma técnica
Agregado miúdo	Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
	Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
	Porcentagem de finos	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Cimento e metacaulim	Massa específica	NBR NM 23 (ABNT, 2000)
	Granulometria à laser	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.1.1 Agregado

Para a análise granulométrica, duas amostras de 500 g passaram por um processo de secagem em estufa a 105°C por um período de 24 h, sendo posteriormente esfriadas à temperatura ambiente e vertidas no conjunto de peneiras da série normal, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Por fim, o material retido em cada peneira foi pesado e assim determinado o módulo de finura, a dimensão máxima característica e a curva granulométrica, como apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Caracterização granulométrica do agregado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Também foi determinada sua massa específica em conformidade com a NBR NM 52 (ABNT, 2009), utilizou-se de molde de tronco de cone confeccionado em impressora 3D, para

encontrar o momento que o agregado se apresentasse na condição de saturada superfície seca e desmoronasse após retirada do molde, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - a) e b) Equipamentos e execução do ensaio.



a)

b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 3 encontram-se os valores de massa específica encontrados para cada fração de areia, verifica-se que há uma proporcionalidade entre a dimensão da partícula e o resultado encontrado, visto que à medida que esta diminui a massa específica também apresentou uma redução. Além disso, são apresentados os valores das demais propriedades físicas encontradas por meio dos ensaios anteriormente mencionados, massas unitárias, módulos de finura, diâmetros máximos dos materiais e teor de material pulverulento.

Tabela 3 - Propriedades físicas do agregado.

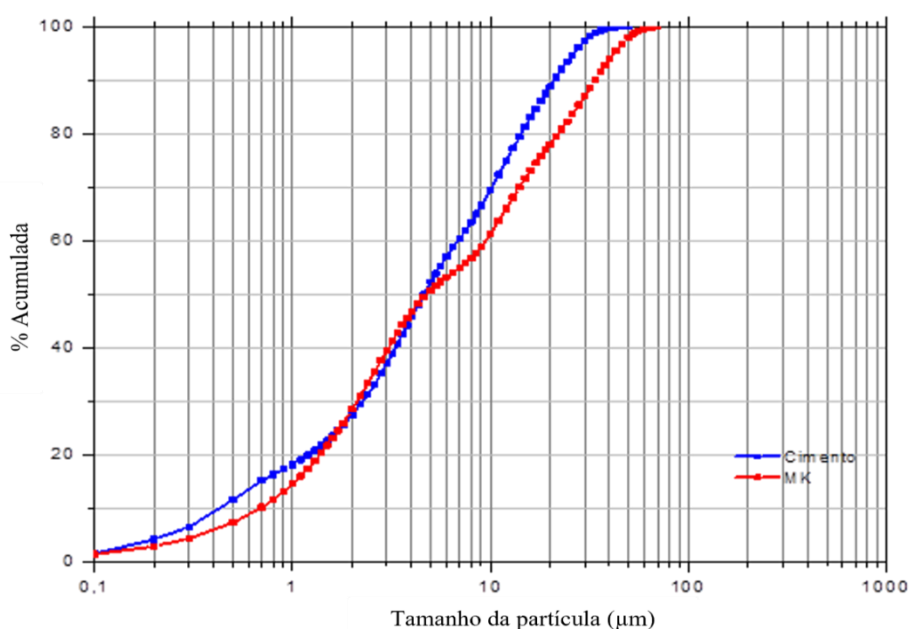
Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária compactada (g/cm ³)	Massa unitária solta (g/cm ³)	Módulo de finura (%)	Diâmetro máximo (mm)	Teor de material pulverulento (%)
2,56	2,58	2,61	1,71	1,58	1,42	2,20	4,15

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.1.2 Aglomerante e adições

Foram utilizados o cimento Portland CP V ARI (equivalente ao OPC tipo III ASTM C 150 e CEM I – EM 197-1), cimento de pega rápida e sem adições minerais, com massa específica igual a $3,05 \text{ g/cm}^3$ e metacaulim, com massa específica igual a $2,49 \text{ g/cm}^3$, sendo os diâmetros médios das partículas de $8,04 \mu\text{m}$ e $11,69 \mu\text{m}$, respectivamente. Aditivo superplastificante (SP) à base de policarboxilatos, aditivo modificador de viscosidade à base de éter metil celulose (HPMC) e água potável foram utilizados. As curvas granulométricas da areia e do cimento podem ser vistas na Figura 8.

Figura 8 - Caracterização granulométrica do cimento e metacaulim.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.2 Método de dosagem

O método de dosagem baseou-se na determinação das relações constitutivas das composições que permitissem a impressão para as diferentes misturas testadas com a variação da relação cimento:agregado. Para determinar relação água/materiais secos da argamassa que possibilite a impressão, fez-se uma primeira mistura com a proporção de 1:2, em massa. A escolha desta proporção deu-se com base nos valores encontrados na literatura, como mostrado na Tabela 1, em que existe uma predominância de relações 1:1. Buscando uma redução no consumo de cimento optou-se, aqui, por dobrar a quantidade de agregado chegando ao traço selecionado.

Levando em consideração a velocidade de impressão e a capacidade de extrusão da impressora 3DCP/IFPB-UFRN, uma variação de água e aditivos foi realizada para esta composição, pelo método de tentativa e erro, até se encontrar uma mistura imprimível, ou seja, que possibilitasse a extrusão sem entupimento do sistema, que possuísse um filamento íntegro sem interrupções ao longo de sua extensão e com deformação limite que possibilitasse o empilhamento de uma nova camada, atendendo essas exigências determinou-se a relação água/materiais secos (W/Md) ideal e assim ser utilizada nas demais misturas. Essa composição com proporção de 1:2 foi imprimível utilizando-se uma relação A/Ms igual 0,108, ou seja, 10,8%, 0,89% SP e 0,15% HPMC. Um aspecto geral da impressão deste traço pode ser visto na Figura 9, adotado como referência para as demais variações.

Figura 9 - a) e b) Definição da relação água/materiais secos ideal para as condições de impressão, traço de referência (1:2).



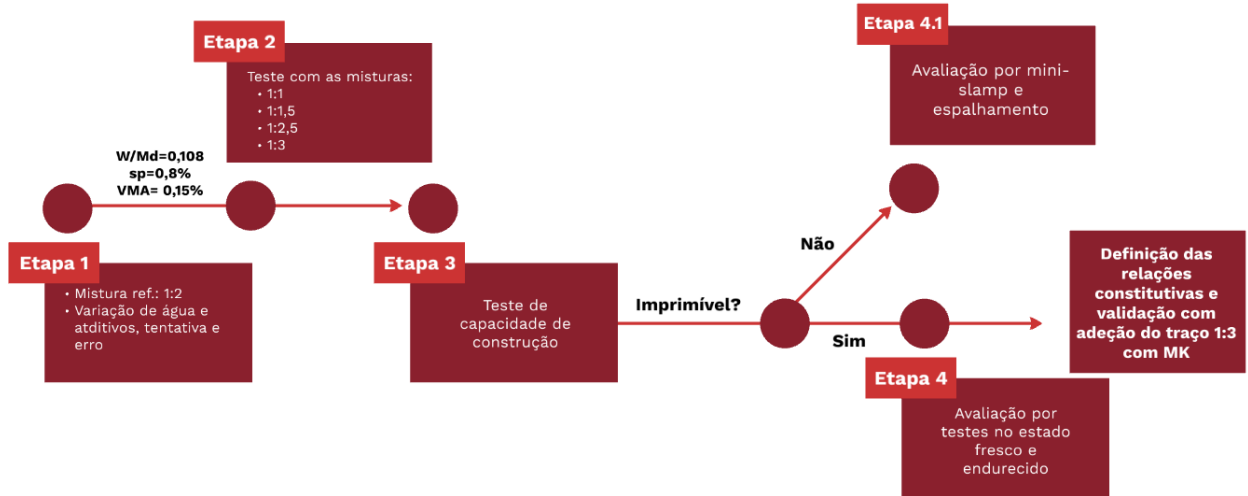
a)

b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Em seguida, essas proporções de aditivos e a relação A/Ms foram mantidas constantes para as demais proporções em análise neste trabalho, e foram variadas as proporções cimento: agregado (1:1,0, 1:1,5, 1:2,5 e 1:3,0) mantendo-se a relação água/materiais secos e aditivos constantes e iguais a mistura de referência, sendo calculadas as relações constitutivas do traço, gerando o fluxo de dosagem apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma experimental.



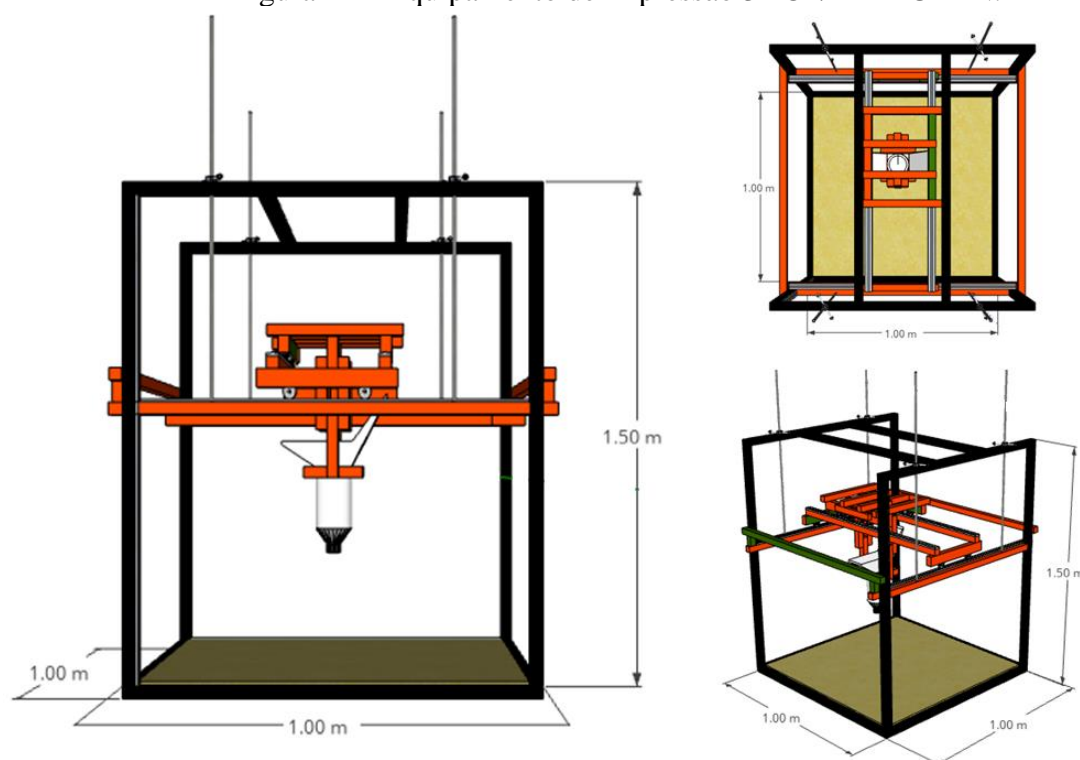
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Por fim, avaliaram-se as condições de consistência das misturas imprimíveis e não imprimíveis, na busca por reconhecer suas características no seu estado fresco, além da retenção de forma e propriedades mecânicas das misturas imprimíveis.

3.3 Sistema de impressão, mistura e cura

O sistema de impressão projetado e construído pelos autores é uma impressora do tipo pórtico, apresentada na Figura 11 com capacidade de impressão de peças com 1,0 m³, que consiste em um equipamento de base cartesiana com movimentação mecanizada em seus eixos, possuindo um bico extrusor de deposição do material cimentício. A velocidade de impressão com relação aos eixos foi mantida constante em 2500 mm/min e a taxa de extrusão variou de 25% a 100% da capacidade do motor (35 N.m com 82 rpm), sendo o bico de impressão circular com diâmetro de 50 mm, resultando em espessura e largura média de camada depositada de 25 mm e 65 mm, respectivamente, capaz de representar situações reais no que diz respeito às dimensões dos filamentos, limitando-se apenas ao tamanho das estruturas impressas.

Figura 11 – Equipamento de impressão 3DCP/IFPB-UFRN.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A mistura dos materiais para impressão foi realizada em misturador de eixo inclinado (betoneira) utilizando a seguinte sequência de mistura: no primeiro momento fez-se a homogeneização dos materiais secos submetendo-os a cerca de 2 min de rotação; em seguida adiciona-se 70% da massa de água mantendo a mistura em movimento por mais 2 min; sendo logo após adicionado o superplastificante, continuando a mistura mecanizada por 2 min; e posteriormente acrescentou-se o restante da água, deixando o equipamento acionado até que a argamassa adquirisse aspecto homogêneo e ligeiramente fluido; por fim, foi incorporado o aditivo viscosificador na mistura, sendo submetida à betonagem por mais 2 min.

Esse processo foi realizado em todas as composições com relações e quantidades de materiais apresentadas na Tabela 4. Uma sexta mistura foi analisada para testar a validade das relações constitutivas das argamassas que foram consideradas como faixas ideais para as condições da impressora e para uma dada relação água/materiais secos da mistura. Esta mistura foi definida a partir da adição de 25% de metacaulim na mistura 1:3,0, sendo analisada apenas no estado fresco.

Tabela 4 – Composições adotadas.

Mistura	Cimento (kg/m ³)	Mk	Areia (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	SP (%)	HPMC (%)	A/Ms(%))	A/C (kg/kg)
---------	---------------------------------	----	-------------------------------	------------------------------	-----------	-------------	--------------	----------------

1:1,0	1085,5	-	1085,5	234,5	0,89	0,15	10,8	0,22
1:1,5	859,2	-	1288,8	232,0	0,89	0,15	10,8	0,27
1:2,0	710,4	-	1420,9	230,9	0,89	0,15	10,8	0,33
1:2,5	606,3	-	1515,8	229,2	0,89	0,15	10,8	0,38
1:3,0	528,6	-	1585,7	228,3	0,89	0,15	10,8	0,43

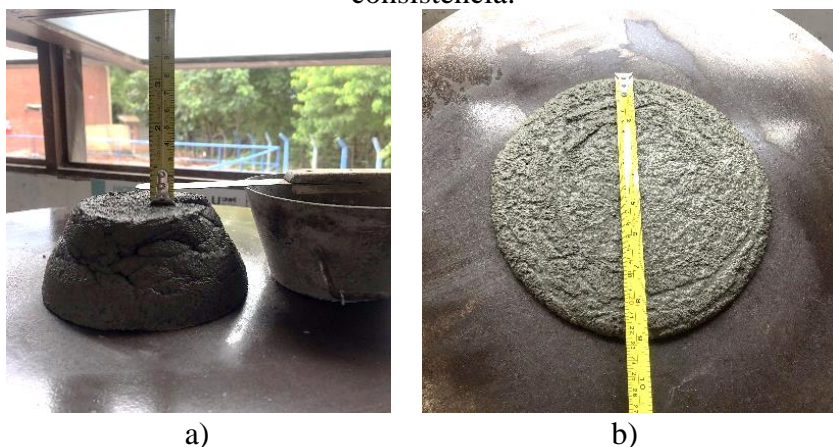
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Após a mistura, as composições foram impressas produzindo peças com dimensões de aproximadamente 50 cm de comprimento por 30 cm de altura sem interrupção da construção, que ficaram em duas condições de cura para cada idade analisada: para os ensaios de 1 dia, as peças foram deixadas expostas as condições de laboratório e para os ensaios de 28 dias ficaram em ambiente de laboratório por 1 dia e 27 dias em cura úmida por imersão. Após esses tempos, foram extraídos corpos de prova, com dimensões especificadas na norma do ensaio, para dos testes mecânicos com o auxílio de uma serra circular diamantada.

3.4 Fluidez e perda de trabalhabilidade

O teste de fluidez das misturas foi determinado a partir dos ensaios de abatimento do mini-tronco de cone e do espalhamento na mesa de consistência de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2019), medidos após as misturas serem recém preparadas. O ensaio de abatimento consistiu em moldar um cone de dimensões de 100 mm de base e 50 mm no topo, com uma altura de 150 mm, preenchido em três camadas com compactação de cada camada com 15, 10 e 5 golpes, sucessivamente. Em seguida o cone foi removido e medido o abatimento da argamassa (Figura 12a). Depois, a mesa de consistência foi acionada com 30 golpes no tempo de $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$, permitindo que a mistura pudesse espalhar livremente na mesa. Após isso, o diâmetro médio da argamassa espalhada foi determinado em duas direções perpendiculares (Figura 12b) medido um índice de fluidez, sendo realizadas duas repetições para cada teste.

Figura 12 - Ensaio no estado fresco: (a) mini-slump, (b) espalhamento na mesa de consistência.



a)

b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para a avaliação da perda de trabalhabilidade com o tempo, foram repetidos os ensaios de abatimento do mini-tronco de cone em intervalos de 0 min, 20 min, 10 min e 5 min, ou até o material não atingir abatimento, sendo esse instante caracterizado como a perda de trabalhabilidade, ou como muitos trabalhos apresentam, o tempo em aberto, que consiste no instante em que o material não apresenta condições de extrudabilidade (LE *et al.*, 2012; Soltan; LI, 2018).

3.5 Retenção de forma

A retenção de forma foi verificada primeiramente levando em consideração a velocidade de impressão de 2500 mm/min (constante), aliada à variação da taxa de extrusão (variação para capacidade de rotação do motor) para as diferentes composições analisadas. Nesse ensaio, observou-se a continuidade, deformação e aspecto visual (textura) de uma camada de impressão (Figura 13a) variando a taxa de extrusão de 25% a 100% da capacidade do motor (35 N.m com 82 rpm) e, com isso, foi possível determinar, para cada mistura, as condições ideais de impressão.

Figura 13 - (a) Determinação da velocidade e taxa de impressão (b) Camadas impressas, mistura 1:1.5.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

A condição de retenção de forma foi a deformação das camadas (Figura 13b), considerando um empilhamento de 5 camadas e determinando a relação H_c , conforme Equação 1. Essa relação seria ideal quanto mais próximo a 1, o que implicaria que não houve deformação das camadas com o avanço da impressão.

$$H_c = \frac{H_R}{H_T} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que: H_R = altura real, medida após empilhamento de 5 camadas; H_T = altura teórica prevista para as 5 camadas, ou seja, $H_T = 5H$; e, H é a altura da primeira camada sem filamentos superiores.

3.6 Squeeze flow

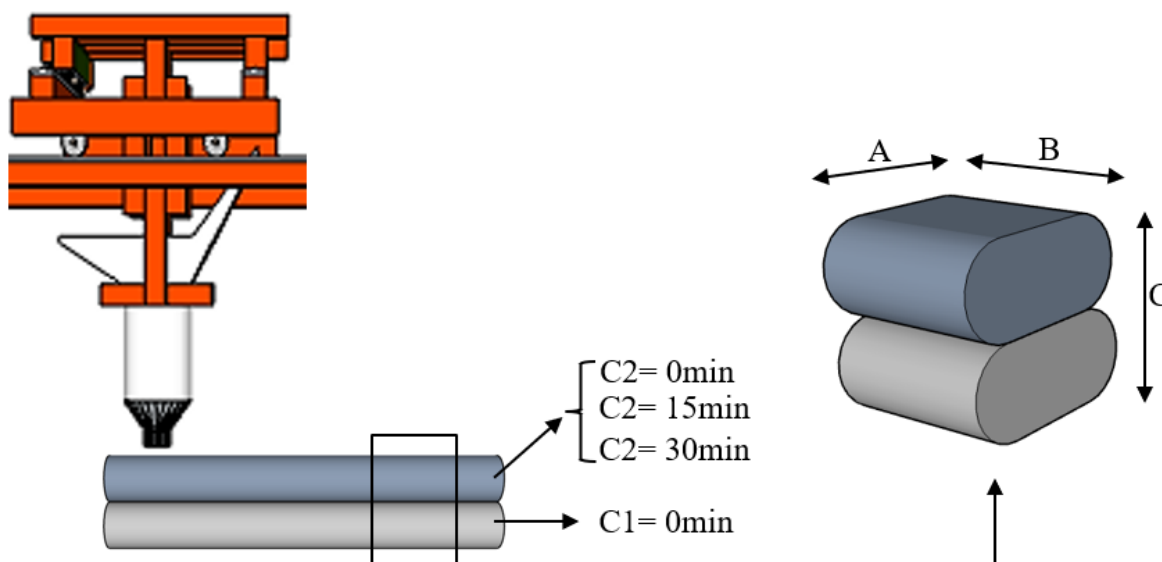
O teste de *squeeze flow* foi realizado de acordo com a norma NBR 15839 (ABNT, 2010), que consiste moldar uma amostra cilíndrica de argamassa fresca com diâmetro de 101 mm e altura de 10 mm sobre a placa de fundo limpa e seca usando um molde de anel de plástico, com posterior submissão da mistura no estado fresco a uma punção conferida por uma máquina de ensaio universal com velocidade de deslocamento de 0,1 mm/s até um deslocamento máximo de 9 mm ou carga máxima de 1 kN (o que for atingido primeiro).

3.7 Aderência entre as camadas em função do tempo de impressão

Para investigação da aderência entre as camadas sob os efeitos de diferentes intervalos de tempo de impressão entre os filamentos, foi, inicialmente, impressa uma peça de 50 cm de extensão possuindo duas camadas (Figura 14), em que C1 diz respeito a primeira camada que serve de substrato para C2 o segundo filamento. Dessa estrutura foram extraídas amostras para execução dos ensaios.

Ambas as camadas impressas dos diferentes espécimes foram preparadas a partir do mesmo lote de mistura, sendo essas impressas com atraso de deposição entre C1 e C2 de 0, 15 e 30min, intervalos determinados com base nos resultados do ensaio de perda de trabalhabilidade, em que foi adotado o instante inicial de impressão e o valor em minutos do limite máximo e médio da mistura que possui menos tempo em aberto. Com relação as dimensões das amostras ensaiadas, seu comprimento correspondeu a 5cm (dimensão B da Figura 14), sendo altura e largura, lados A e B da Figura 14, respectivamente, função das deformações e espalhamento naturais de cada mistura.

Figura 14 - Produção e obtenção das amostras para o ensaio de deslocamento vertical e aderência entre as camadas.

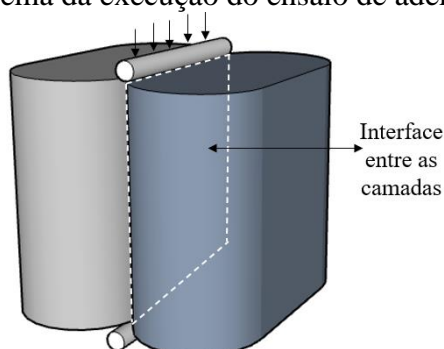


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A aderência entre as camadas foi determinada com base no ensaio de resistência a tração por compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011), com a configuração mostrada na Figura

15b, que é comumente adotada na literatura (RASHID *et al.*, 2015; WENG *et al.*, 2021; GENG *et al.*, 2020). A execução do ensaio se deu em no mínimo três ou quatro amostras cortadas do filamento inicial por disco diamantado após sete dias de cura submersa. Conforme Figura 15b, dois filamentos de madeira mole foram colocados na região da junção interfacial para garantir a correta posição do carregamento, sendo essa exercido a uma velocidade de 2,5mm/min.

Figura 15 – Esquema da execução do ensaio de aderência entre as camadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O cálculo da resistência de aderência entre as camadas em função do tempo foi realizado através da Equação 2:

$$R_{ad} = \frac{2F}{\pi A} \quad (\text{Eq. 2})$$

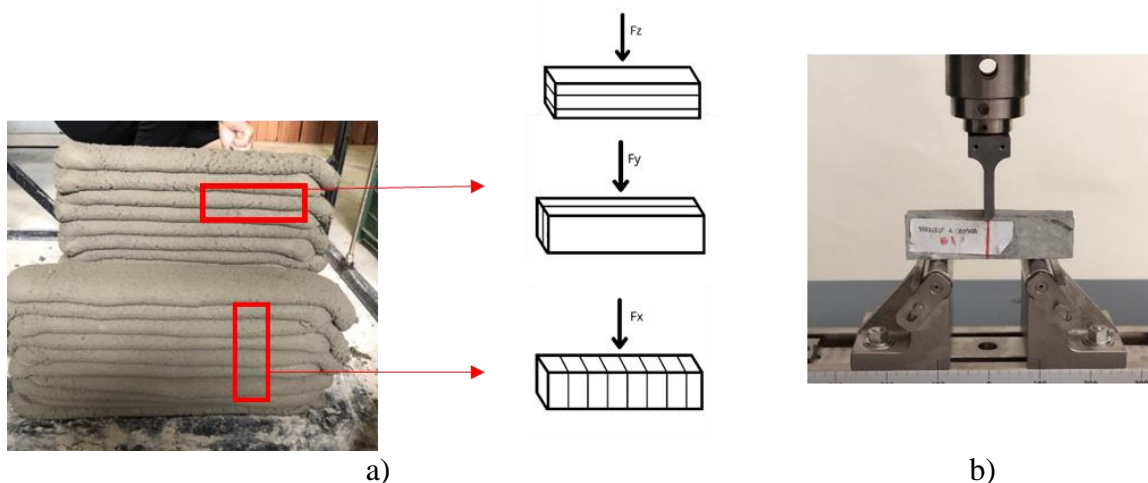
Em que: R_{ad} (MPa) é a resistência de aderência entre as camadas; F (N) a carga última aplicada e A (mm²) a área de interface aderida.

3.8 Resistência à tração na flexão

As misturas após serem impressas (em peças de aproximadamente 50x30cm) foram cortadas com auxílio de disco de corte diamantado e água como fluido de corte, após 1 dia e 28 dias, em dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm para realização de ensaios de flexão em três pontos (Figura 16). Os cortes das amostras seguiram duas direções diferentes, proporcionando o ensaio em três direções distintas de testes, o que permitiu a avaliação da anisotropia do material de acordo com o sentido de carregamento em relação ao sentido da impressão. Para cada mistura foram ensaiados 4 corpos-de-prova com uma velocidade de carga de 50 N/s de acordo com a

NBR 13279 (ABNT, 2005), sendo realizado o ensaio nas três direções após 28 dias de cura e na direção do eixo Z após 1 dia cura.

Figura 16 - a) direção de extração e aplicação de carga; b) exemplo de configurações de ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.9 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com as metades resultantes do ensaio de resistência à flexão após o rompimento, tendo como base a NBR 13279 (ABNT, 2005), resultando em 8 corpos-de-prova por mistura. Em ambas as idades (1 dia e 28 dias), essas amostras foram avaliadas apenas na direção F_z . O ensaio se deu com o posicionamento do dispositivo de apoio no corpo-de-prova, com dimensões de 40 mm x 40 mm, de modo que a carga incidisse nesta área de contato a uma velocidade de 500 N/s.

3.10. Densidade e porosidade aberta

A densidade e porosidade das misturas impressas no estado endurecido foram avaliadas conforme previsto na NBR 9778 (ABNT, 2009). Para cada mistura, foram considerados corpos-de-prova prismáticos extraídos com auxílio de máquina com disco de corte diamantado nas dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm, ensaiados aos 28 dias de idade.

CAPÍTULO 4

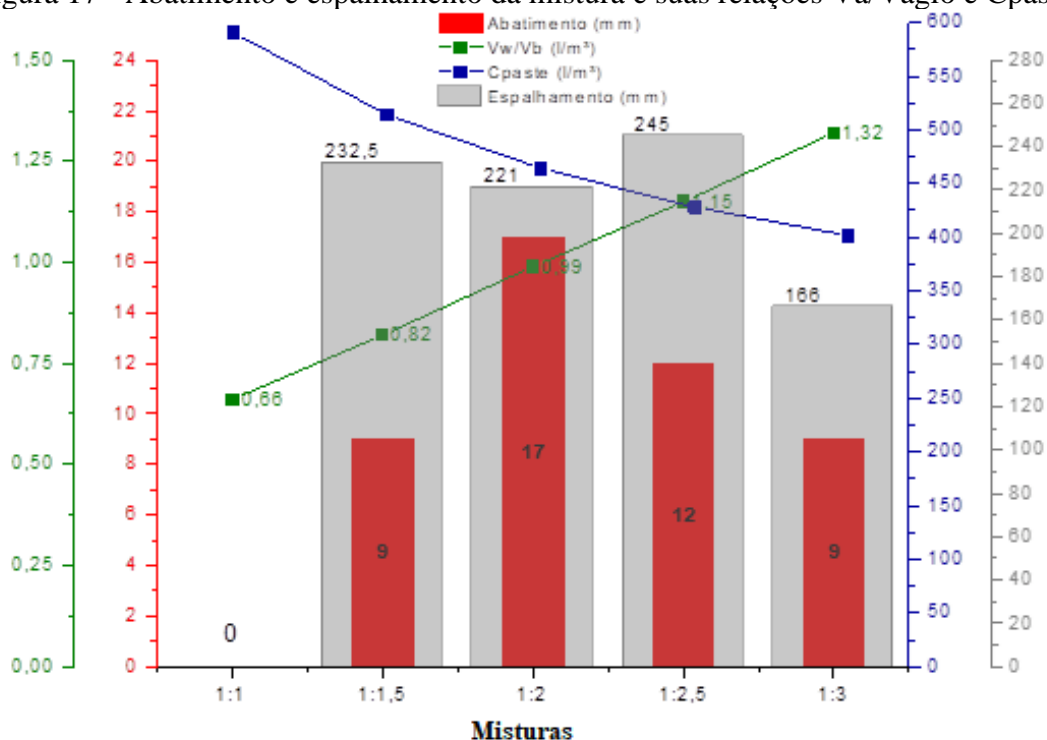
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa unidade serão apresentados os principais resultados encontrados, bem como as suas correlações e discussão com dados previamente reportados na literatura.

4.1 Fluidez e retenção de forma

Os resultados de espalhamento e abatimentos das misturas e a correlação com parâmetros constitutivos como volume de pasta (V_p) e relação água/aglomerante (V_a/V_{aglo}), em volume, das composições em análise podem ser vistos na Figura 17. Os espalhamentos e abatimentos das misturas analisadas são diferentes, pois apesar das relações água/materiais secos serem iguais, a viscosidade da mistura é comandada pelo volume de pasta e relação agregado/aglomerante. Ensaio semelhantes foram conduzidos por Kaszyńska *et al.* (2020), Ma *et al.* (2018), Shakor *et al.* (2019), Tay *et al.* (2019). Eles sugerem espalhamentos da ordem de 160 mm a 210 mm para misturas imprimíveis, e *slump* entre 4 mm e 8 mm (TAY *et al.*, 2019). Entretanto, esses valores de espalhamento sugeridos não podem ser adotados para todas as condições de impressão, pois a impressão 3DCP é condicionada pelo sistema de impressão (velocidade de impressão, taxa de extrusão, tipo e tamanho do bico de impressão), viscosidade da mistura e teor e granulometria dos agregados.

Figura 17 - Abatimento e espalhamento da mistura e suas relações V_a/V_{ag} e C_{pasta} .



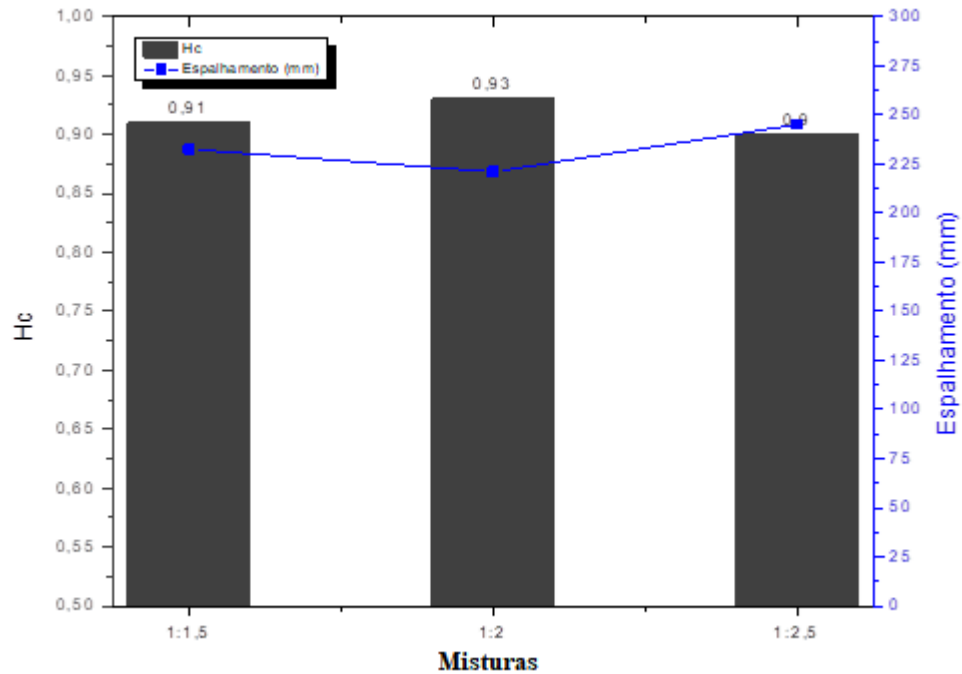
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As misturas 1:1 e 1:3 não foram capazes de serem impressas quando se mantém as relações de água/ materiais secos e teores de aditivos constante, mesmo com espalhamentos nas faixas 160 e 210, pois apresentaram baixa mobilidade sob a ação da força externa (extrusão), o que refletiu na incapacidade de serem construídas peças impressas com o uso da impressora 3DCP-IFPB/UFRN. Houve quantidade de água insuficiente para molhagem das partículas na mistura 1:1,0, devido ao elevado teor de pasta e baixa relação água/cimento, já a mistura 1:3,0 apresentou pouca pasta para promover a mobilidade das partículas por extrusão, considerando essa situação específica para o sistema de impressão utilizado. As misturas imprimíveis no sistema de impressão 3DCP/IFPB/UFRN foram apenas a misturas 1:1,5, 1:2,0 e 1:2,5.

As Figuras 18 e 19 mostram os valores de retenção de forma (H_c) e o aspecto de cada uma das composições 1:1,5, 1:2,0 e 1:2,5, respectivamente. Verifica-se que todas as misturas impressas apresentam H_c semelhantes e próximo a 0,9, que pode estar relacionado com os espalhamentos semelhantes e da ordem de 230 ± 15 mm. A mistura 1:1,5 apresentou uma melhor acabamento sem vazios e rachaduras de construção, com maior recobrimento dos agregados, devido a maior relação volume de pasta por volume de agregado (V_p/V_{ag}), igual 1,05, enquanto os valores de V_p/V_{ag} das misturas 1:2,0 e 1:2,5, são de 0,87 e 0,75, respectivamente. A mistura 1:2,5, apesar de conseguir ser extrudada, não foi considerada como de boa qualidade para

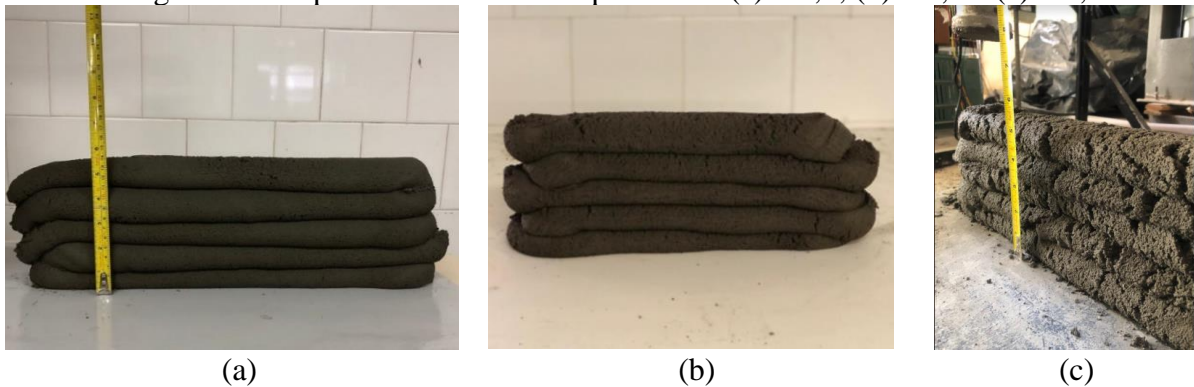
impressão devido às falhas de continuidade que podem estar relacionadas a sua falta de coesão e trabalhabilidade.

Figura 18 - Retenção de forma e espalhamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 19 - Aspecto das misturas imprimíveis: (a) 1:1,5; (b) 1:2,0 e (c) 1:2,5.



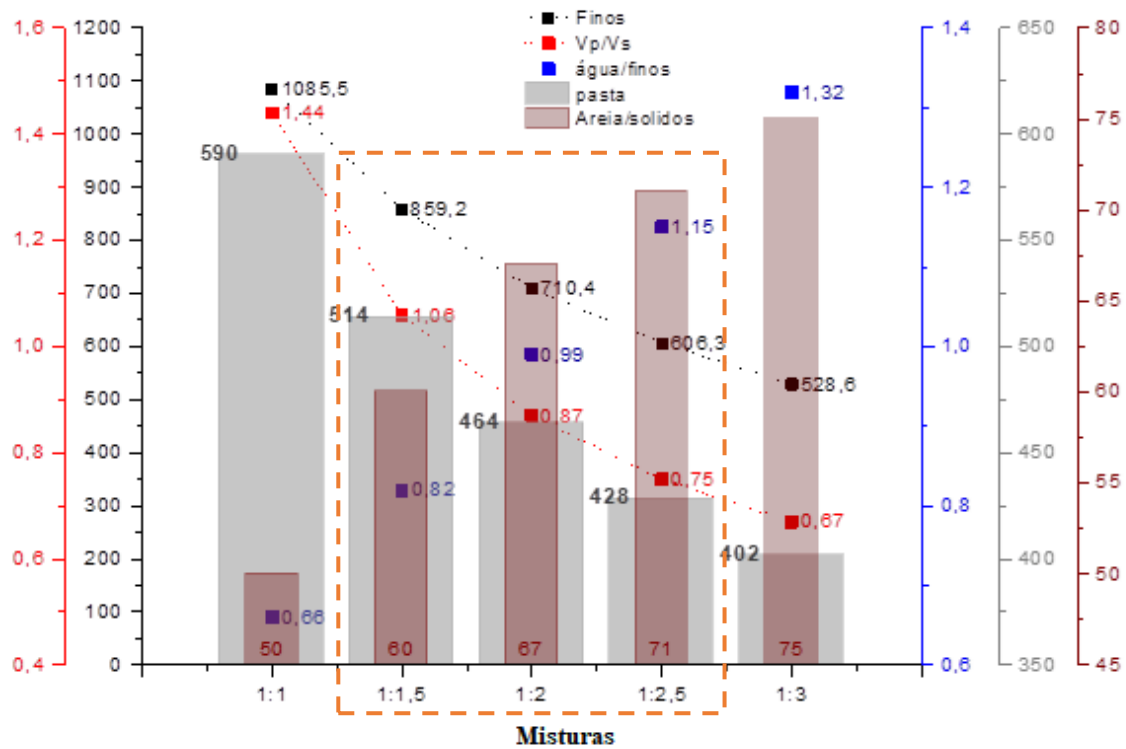
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.2 Relações constitutivas para dosagem

As relações constitutivas das misturas apresentadas na Figura 20 mostram um indicativo de quais devem ser os parâmetros de dosagem das misturas (região em destaque), para que as mesmas possam ser impressas nas condições de velocidade de impressão e extrusão da impressora, levando em consideração a relação água/materiais secos constante para uma mistura

de referência e as demais variações das relações agregados/aglomerante, sendo as decisões pautadas a partir das proporções imprimíveis.

Figura 20 - Parâmetros constitutivos das composições.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As faixas ideais de dosagem são apresentadas na Tabela 5, com as relações constitutivas mais importantes para o desenho ideal para impressão, que estão relacionados com a relação volume de pasta/volume de agregado (V_p/V_{ag} , dm^3/dm^3), consumo de finos (finos, kg/m^3), volume de pasta (V_p , l/m^3), relação água/aglomerantes em volume (V_a/V_{aglo} , l/m^3) e relação agregado/sólido totais da mistura (areia/sólidos, %).

Tabela 5 - Parâmetros de dosagem para traços imprimíveis.

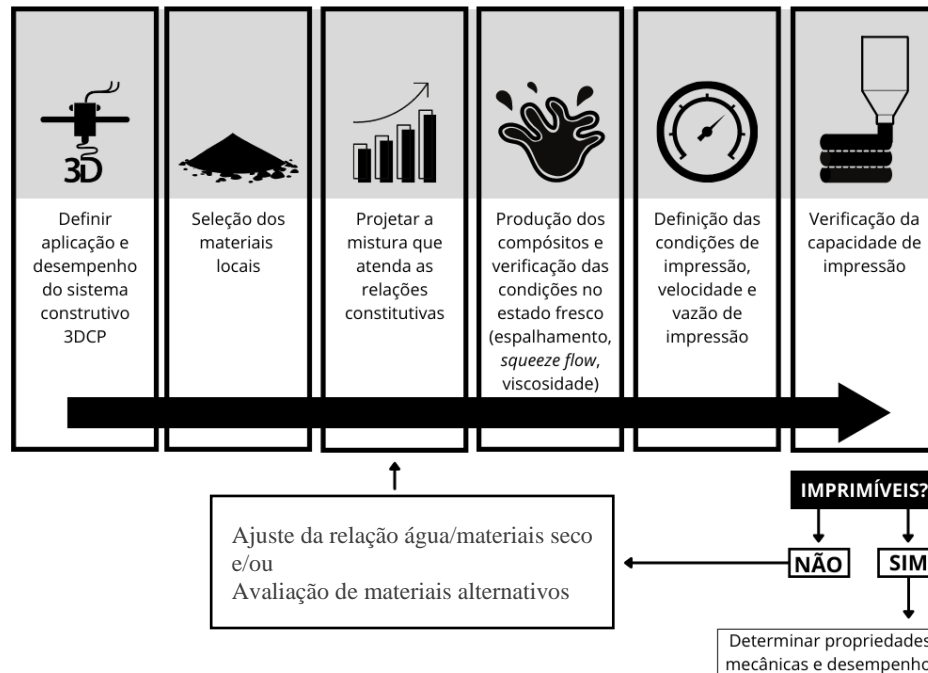
Volume de pasta/volume de agregado (V_p/V_{ag}) (dm^3/dm^3)	Consumo de finos (Cf) (kg/m^3)	Relação água/finos (V_a/V_f) (l/m^3)	Volume de pasta (V_p) (l/m^3)	Areia/sólidos (%)
0,75 a 1,06	606 a 859	0,82 a 1,15	428 a 514	60 a 71

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

No entanto, esses valores não podem ser tomados como absolutos para diferentes tipos de impressoras, apesar de ser um indicativo para uma primeira mistura adequada para impressão.

Portanto, a partir destas relações constitutivas e do fluxograma de dosagem, seriam necessários apenas pequenos ajustes para melhorar a qualidade de impressão, seguindo um fluxo de dosagem, como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Fluxograma para dosagem de uma mistura 3DCP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para verificar a adequação do procedimento de dosagem, uma composição 1:0,25:3,0 foi testada com o intuito de fazer com que a mistura original 1:3,0, não imprimível, se enquadrasse nos parâmetros de dosagem da Tabela 3. Para tanto adicionou-se metacaulim com o intuito de aumentar a relação V_p/V_{ag} , fazendo com que as relações constitutivas apresentassem os seguintes valores: $V_p/V_{ag} = 0,80$, $C_f = 615 \text{ kg/m}^3$, $V_a/V_{aglo} = 0,90$, $V_p = 443 \text{ kg/m}^3$ e areia/sólidos totais = 71%, todos dentro dos limites estabelecidos como fundamentais para impressão, de acordo com a Tabela 5.

Desta forma, a mistura 1:0,25:3,0 foi impressa, com qualidade de impressão satisfatória (Figura 22), mantendo-se as condições de impressão, relação água/materiais secos da mistura e aditivos das demais misturas imprimíveis, o que confirma que a capacidade de impressão pode ser definida por relações constitutivas básicas, com grande influência da relação V_p/V_{ag} , demonstrado que é possível aumentar a quantidade de agregados e particulados inertes na mistura e assim diminuir o consumo de cimento, desde que certos parâmetros da composição sejam atendidos, com intuito de promover mobilidade ao compósito 3DCP através de um teor otimizado

de pasta e um esqueleto granular para manter a estabilidade de construção, sempre correlacionados com parâmetros de velocidade e volume de extrusão.

Figura 22 - Aspecto da mistura 1:0,25:3,0 imprimível.

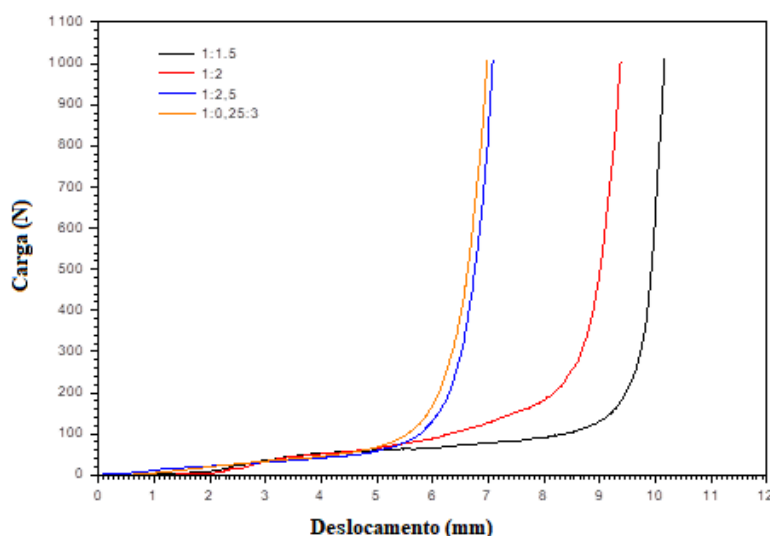


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.3 Squeeze flow

As curvas cargas-deslocamento obtidas após os ensaios de *squeeze flow* podem ser vistas na Figura 23. Verificam-se duas regiões bem definidas, a primeira onde ocorre grande deformação com pequeno incremento de carga (estágio II) e a segunda região onde se verifica pequena deformação com grande aumento de carga (estágio III), não sendo possível se verificar claramente o estágio I que está relacionado com o comportamento elástico-linear (CARDOSO *et al.*, 2014; NICOLINI *et al.*, 2021). As misturas com 1:1,5 e 1:2,0 apresentaram longos escoamentos viscosos com deformações de aproximadamente 8,16 mm e 6,05 mm, medidos no ponto de transição do estágio II para o III, a partir de uma reta tangente traçada sobreposta a esta fase viscosa e medido o ponto de transição. Já as misturas 1:2,5 e 1:0,25:3,0 apresentam deformações de 4,82 mm e 4,7 mm, o que evidencia a menor mobilidade sob carga, com os maiores teores de areia utilizados nessas misturas.

Figura 23 - *Squeeze flow* das amostras imprimíveis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

É possível observar que a extensão do estágio II diminui à medida que a proporção de agregados aumenta. Esse comportamento de aparente acréscimo de rigidez possui relação com surgimento de forças de atrito devido à restrição geométrica das partículas ou pelo acúmulo de sólidos na região central entre as placas (CARDOSO *et al.*, 2014). Além disso, pode-se notar uma transição entre os estágios II e III com um valor de carregamento que diminui com o incremento de agregados, mostrando mais uma vez a influência da presença dessas partículas, levando uma mistura a ter um comportamento rígido (1:2,5 e 1:0,25:3,0), quando comparado aos demais traços (1:1,5 e 1:2,0).

Em termos práticos, as misturas que possuem estágios II de maior extensão (1:1,5 e 1:2,0), tenderam a produzir filamentos com maior deformação e extrusão facilitada pelo fluxo das partículas no sistema, além de conseguir manter a coesão da mistura sem segregação do extrudado, como apresentado na Figura 19a. Já para as misturas de estágio II reduzidos (1:2,5 e 1:0,25:3,0), essas apresentaram maior rigidez e estabilidade de forma, mas, em contrapartida, apresentaram resistência ao fluxo no tubo extrusor, quando comparada as demais proporções, podendo formar filamentos com regiões de descontinuidade, como no caso da Figura 19c.

Essas características podem auxiliar possíveis indicações de utilização conforme as propriedades demandadas das estruturas, principalmente no que diz respeito ao melhor acabamento e bombeabilidade oferecidos pelas misturas 1:1,5 e 1:2,0, como na maior estabilidade proporcionado com as misturas 1:2,5 e 1:0,25:3,0.

Destaca-se a importância da relação V_p/V_{ag} para viscosidade da mistura para impressão 3DCP, uma vez que a composição 1:3,0 não foi imprimível, devido à baixa relação V_p/V_{ag} igual

a 0,67. Esta mistura tornou-se imprimível com a adição de metacaulim (composição 1:0,25:3,0), que elevou a relação V_p/V_{ag} para $0,8 \text{ l/m}^3$ dentro da faixa considerada como ideal para impressão para os parâmetros V_p/V_{ag} entre 0,75 e 1,06, mantendo-se os teores de aditivos e relação A/Ms constantes.

A Figura 23 demonstra a influência da relação V_p/V_{ag} no comportamento de fluxo viscoso, em que se comprova que maiores relações V_p/V_{ag} provocam maiores deformações devido à lubrificação das partículas de agregado ocasionando maior mobilidade da mistura, independente da relação V_{ag}/V_{aglo} . Isso confirma que a pasta é responsável por garantir a coesão, enquanto mantém as partículas de agregados parcialmente separados, lubrificando sua superfície e reduzindo as forças de atrito, o que contribui para um fluxo relativamente fácil do sistema, em contrapartida que o aumento do teor de partículas que proporciona maior atrito interno ocasionando menores deformações (CARDOSO *et al.*, 2014; CARDOSO; JHON; PILEGGI, 2009). As misturas 1:2,5 e 1:0,25:3,0 apresentaram comportamento semelhante, por exibirem relações V_p/V_{ag} e V_{ag}/V_{aglo} , semelhantes, e iguais a 0,75 e 2,5 e 0,8 e 2,4, respectivamente. Vale destacar que o desvio à direita da deformação, verificada para a mistura 1:0,25:3,0, mesmo com o menor V_p/V_{ag} , pode ser resultado da natureza da adição, característico por seu incremento de viscosidade nas misturas cimentícias.

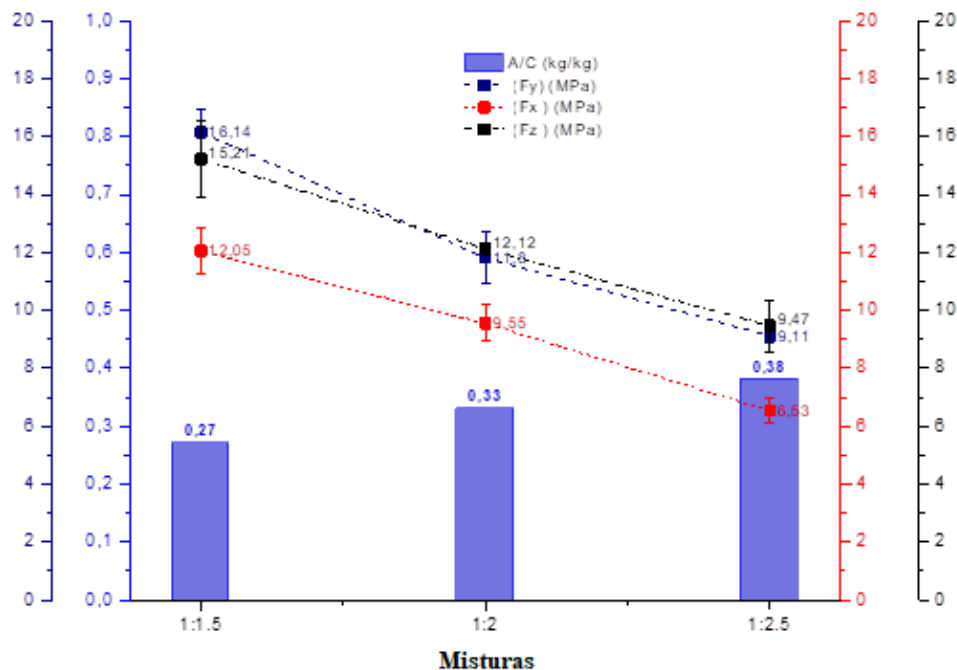
Para o sistema de impressão há uma necessidade de fluxo facilitado, que é controlado pela pasta. Desta forma, pode-se limitar a inclusão de maiores quantidades de areia. A maioria dos trabalhos recentes utilizam relações aglomerante/areia de 0,8 a 1,5 (ZHANG *et al.*, 2019; DING *et al.*, 2020; XIAO *et al.*, 2020; DING *et al.*, 2020; YE *et al.*, 2021), com uso de elevados teores de MCS. No presente trabalho foi possível utilizar relações cimento/areia de 1,0 a 2,5, e relação aglomerante/areia igual a 2,4, na mistura 1:0,25:3,0, em ambos os casos são relações maiores que a referenciadas citadas e com uso de baixos teores de MCS regionais.

A capacidade de fluir sob carga da mistura 1:0,25:3,0 foi ligeiramente inferior a mistura 1:2,5, porém com uma melhor qualidade de impressão, mantendo-se os teores de aditivos iguais, que pode ser um reflexo do acréscimo de finos proporcionado pela adição. Desta forma destaca-se a importância de mais estudos sobre a qualidade e capacidade de impressão com misturas com menores consumos de cimento, além da influência de parâmetros como rugosidade, vazios permeáveis, absorção e superfície específica de agregados e adições, correlacionando com os teores e tipos de aditivos necessários para impressão.

3.4 Resistência à flexão e à compressão

A Figura 24 indica um comportamento ortotrópico nas misturas, pois as resistências à flexão nas direções Z e Y são iguais para uma mesma mistura e diferentes da resistência na direção X, como comprova a análise estatística (Tabela 6) para todos os grupos com $p < 0,05$, mas com teste Tukey apresentando diferença não significativa entre os valores da direção Z e Y, conforme apresentado na Tabela 6. Nota-se esse comportamento, pois os corpos de prova foram extraídos adjacentes ao sentido de impressão, havendo apenas juntas ao longo da altura de impressão, por este motivo o comportamento não é anisotrópico como o verificado em outros trabalhos (ZANG *et al.*, 2019).

Figura 24 - Resistência à flexão de misturas impressas aos 28 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 6 - Análise estatística para o comportamento mecânico à flexão.

Grupo	Variância	Fonte da variação	Anova					Teste Tukey				
			SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Grupo			
										<i>Direção Fz</i>		
1:1,15	2,23567411	Entre grupos	49,76723	2	24,88361	24,36501	0,001318	5,143253	1:1,15	1:2,0	1:2,5	
1:2,0	0,02963383	Dentro dos grupos	6,127709	6	1,021285				4,05600		0,01536*	
1:2,5	0,798546738								9,82300	5,76700		
										<i>Direção Fy</i>		
1:1,15	0,645668403	Entre grupos	80,42367	2	40,21184	28,47706	0,000866	5,143253	1:1,15	1:2,0	1:2,5	
1:2,0	3,535049452	Dentro dos grupos	8,472469	6	1,412078				7,71400		0,25100	
1:2,5	0,055516474								10,24000	2,53100		
										<i>Direção Fz</i>		
1:1,15	0,61806753	Entre grupos	45,8367	2	22,91835	50,16214	0,00018	5,143253	1:1,15	1:2,0	1:2,5	
1:2,0	0,563747881	Dentro dos grupos	2,741312	6	0,456885				6,40700		0,003752*	
1:2,5	0,188840761								14,14000	7,73700		

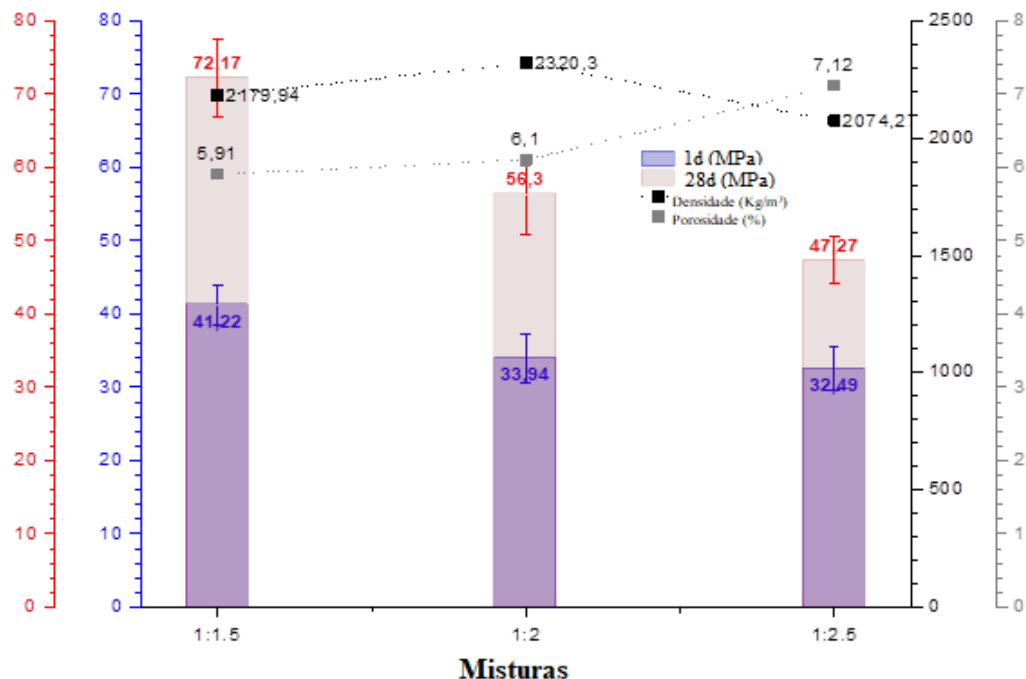
* p-valor < 0,05

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Verifica-se que houve uma redução nas médias de resistência à flexão nas três direções quando se compara as misturas, esse comportamento era esperado uma vez que o aumento do teor de agregado e quantidade de água provocam uma redução do consumo de cimento e uma maior porosidade das misturas. Os níveis de resistências são semelhantes aos verificados por Zang *et al.* (2019), que obtiveram tensões de flexão na ordem de 8,5 MPa a 11,0 MPa, a depender da direção analisada.

O comportamento à compressão foi determinado apenas na direção Z, verificando que após 1 dia de cura as misturas 1:2,0 e 1:2,5 não apresentam diferenças entre si, como mostra a Figura 25, e a mistura 1:1,5 demonstra uma resistência maior que as demais, cerca de 17,7% e 21,2%, respectivamente. A análise estatística (Tabela 7) corrobora com essa afirmação, em que todos os grupos possuem $p < 0,05$, mas com teste Tukey apresentando diferença não significativa entre os valores dos traços 1:2,0 e 1:2,5 em ambas as idades. Aos 28 dias ocorre a mesma tendência do comportamento à flexão, com aumento da resistência à medida que se elevam os consumos de cimento com menores relações água/cimento, fatos comprovados pela maior porosidade aberta das misturas com maiores teores de água e menores teores de pasta.

Figura 25 - Resistência à compressão (F_z) das misturas imprimíveis após 1 e 28 dias, e densidade aparente e porosidade aos 28 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 7 - Análise estatística para o comportamento à compressão.

Grupo	Variância	Fonte da variação	Anova					Teste Tukey			
			SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Grupo		
<i>Direção Fz</i>											
1:1,15	27,69371	Entre grupos	1271,7	2	635,85	28,14011	0,000134	4,256495	1:1,15	1:2,0	1:2,5
1:2,0	29,88468	Dentro dos grupos	203,3627	9	22,59586				6,693		0,06004
1:2,5	10,20919								10,48	3,782	
<i>Direção Fy</i>											
1:1,15	8,23706	Entre grupos	178,0213	2	89,01063	8,950319	0,009102	4,45897	1:1,15	1:2,0	1:2,5
1:2,0	11,33652	Dentro dos grupos	79,55974	8	9,944968				4,473		0,8436
1:2,5	11,96923								5,361	0,7942	

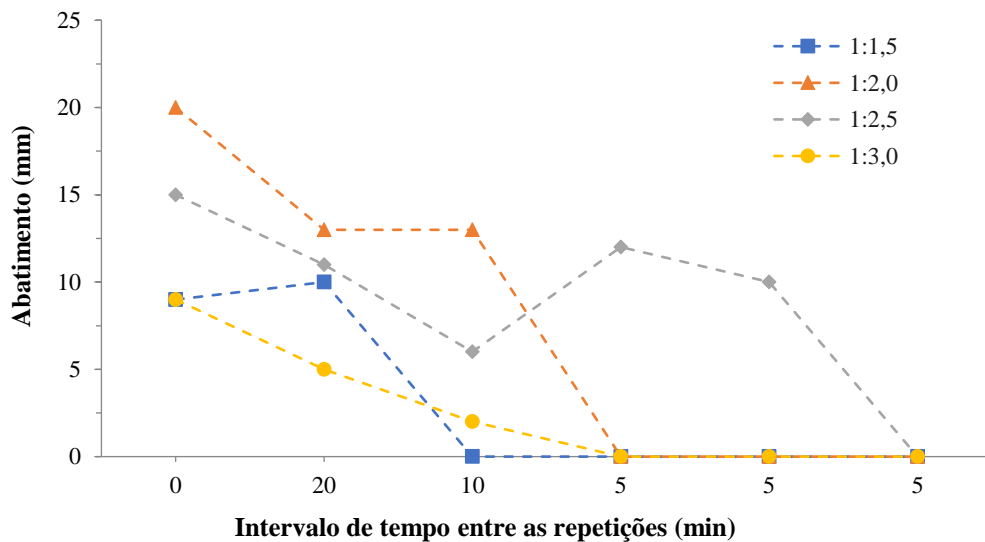
* p-valor < 0,05

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.5 Aderência entre as camadas em função do tempo de impressão

Os resultados apresentados na Figura 26 possibilitou a definição dos intervalos de tempo a serem utilizados para análise da sua influência na resistência a aderência entre as camadas.

Figura 26 – Perda de trabalhabilidade das misturas (tempo em aberto).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com esse resultado foram utilizados os intervalos entre a deposição das camadas de 0 min (T0), correspondendo a impressões sucessivas e imediatas, 15 min (T15) o valor intermediário entre os extremos e 30 min (T30) relacionado ao valor máximo atingido pelo traço

T0									1:1,5	1:2	1:2,5
1:1,5	0,032719	Entre grupos	15,09998	2	7,549988	55,31025	0,000136	5,143253		0,03883	0,000121
1:2	0,025696	Dentro dos grupos	0,819015	6	0,136503				4,632		0,001019
1:2,5	0,351093								14,56	9,925	

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 9 - Análise estatística das misturas nos intante T0, T15 e T30.

Grupo	Variância	Fonte da variação	Anova						Teste Tukey		
			SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Grupo		
			<i>Traço 1:1,5</i>						T0	T15	T30
T0	0,02094	Entre grupos	13,79339	2	6,896696	6,113745	0,035668	5,143253		0,03113	0,1561
T15	0,785404	Dentro dos grupos	6,768384	6	1,128064				4,893		0,4488
T30	1,359539								3,065	1,828	
			<i>Traço 1:2</i>						T0	T15	T30
T0	0,016445	Entre grupos	5,80339	2	2,901695	1,560021	0,28475	5,143253		0,3623	0,3266
T15	2,051158	Dentro dos grupos	11,16021	6	1,860035				2,098		0,9957
T30	1,503665								2,223	0,1249	
			<i>Traço 1:2,5</i>						T0	T15	T30
T0	0,224699	Entre grupos	0,437254	2	0,218627	0,926077	0,446157	5,143253	-	0,5486	0,4728
T15	0,1841	Dentro dos grupos	1,416471	6	0,236079				1,555		0,9885
T30	0,044472								1,76	0,205	

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Ambos os comportamentos, seja entre as misturas ou com o avanço do tempo, eram esperados conforme o que é apresentado da literatura (PANDA *et al.*, 2018; WOLFS; BOS; SALET, 2019; LE *et al.*, 2012; MARCHMENT; SANJAYAN; XIA, 2019). O ganho de resistência entre as proporções pode ser facilitado pelo aumento do volume de pasta que, conforme os resultados do *squeeze flow* (Figura 23), possibilita a impressão de peças com menor rigidez e, conseqüentemente, maior área de contato contínuo entre as camadas, ampliando a área efetiva de ligação, facilmente visualizada na Figura 19. Além disso, tem-se, aliado a esse aumento do volume de pasta, o quantitativo de produtos de hidratação nas interfaces dos filamentos, que tende a ser maior, proporcionando um ganho de resistência de aderência (MARCHMENT; SANJAYAN; XIA, 2019; CHEN *et al.*, 2020).

Essa redução da resistência com o aumento dos intervalos de tempo entre a deposição das camadas torna-se um parâmetro muito importante para análise, uma vez que deve ser reconhecido o intervalo que transita entre a possibilidade de uma ligação de camada adequada e um ganho de resistência e rigidez do filamento que evite grandes deformações. Esse comportamento de decréscimo da adesão também foi mencionado nos estudos de Le *et al.* (2012) e Panda *et al.* (2018), com o instante T0 alcançando o maior desempenho, já a estabilidade dos resultados com instantes maiores foi tratado por Wolfs, Bos e Salet (2019) que realizaram ensaios com intervalos mais avançados (1 h, 4 h, 7 h e 24 h) e encontram resultados estatisticamente aproximados.

Uma possível explicação para esse fenômeno é a troca de umidade superficial dos filamentos, uma vez que, com o passar do tempo a camada inferior fica mais seca tendendo a absorver mais água da camada subjacente e, como também, um pouco de ar presente dentro da camada inferior é liberado e fica aprisionado na interface das camadas podendo reduzir a área efetiva de aderência (PANDA *et al.*, 2018).

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES

Uma impressora automatizada em seus eixos de impressão foi projetada e construída para proporcionar impressões de misturas cimentícias, e avaliar os parâmetros constitutivos de traços 3DCP com materiais comumente utilizados na construção civil, e assim propor uma abordagem de dosagem com base na relação água/materiais secos constante das composições e variação nas demais proporções dos materiais constituintes, avaliando as propriedades no estado fresco e endurecido mais usuais para impressão 3D em concreto. As seguintes conclusões específicas são:

- Critérios de dosagem baseados em uma mistura imprimível e na variação da composição mantendo-se a relação água/materiais secos e demais relações constitutivas das misturas fundamentadas nas V_p/V_{ag} e V_a/V_{aglo} parecem ser adequados para a dosagem de misturas imprimíveis com diferentes resistências e consumos de cimento;
- A definição de critérios de impressão baseados em abatimento e espalhamento em mesa de consistência não foram adequados para uma definição da dosagem das misturas, sendo bons indicadores o *squeeze flow* e principalmente os parâmetros do sistema de impressão;
- A impressora 3D desenvolvida e baseada na extrusão do material de impressão atende a requisitos básicos da construção 3DCP, permitindo avaliar a construção a partir da deposição de camadas de forma contínua;
- A dosagem ideal de misturas 3DCP parece estar relacionado com a relação volume de pasta/volume de agregado (V_p/V_{ag}) entre 0,75 e 1,06, consumo de finos (kg/m^3) entre 606 e 859, relação água/aglomerantes em volume (V_a/V_{aglo}) entre 0,82 e 1,15 l/m^3 e relação agregado/sólido totais da mistura entre 60% e 71%;
- Relações V_p/V_{ag} acima de 0,87, associados a relações ag/aglo inferiores a 2 proporcionam maiores fluxo viscoso das misturas em ensaios de *squeeze flow*. Entretanto, misturas com menores patamares de fluxo viscoso podem ser imprimíveis desde que tenham relações V_p/V_{ag} adequadas, como alcançado na alteração dos parâmetros da mistura 1:3 com uso do metacaulim;
- O comportamento à flexão e os testes estatísticos confirmam a influência da direção de impressão na variabilidade da resistência medida;
- A aderência entre as camadas foi influenciada tanto pelo consumo de pasta das misturas quanto pelo avanço do tempo entre as deposições, sendo observada baixa alteração em

intervalos mais avançados, o que se torna um comportamento positivo quando se volta para termos práticos, podendo possibilitar uma maior liberdade no controle do tempo de deposição entre as camadas; e

- As resistências à compressão das misturas 3DCP são relativamente elevadas quando comparadas a concretos geralmente utilizados na construção civil, e estão associadas aos elevados consumos de cimento, contudo não há diferença estatística entre as misturas 1:2,0 e 1:2,5.

O presente estudo apresenta um indicativo de que as relações constitutivas das misturas são fundamentais para definição das composições, e que as relações V_p/V_{ag} , V_a/V_{aglo} e relação areia/sólidos totais, parecem comandar o comportamento da impressão. Entretanto, mais investigações são necessárias, sobretudo relacionadas à influência do tipo e percentual de MCS, levando em consideração a disponibilidade local, a granulometria da areia e a substituição desta por material particulado de baixo custo, além da avaliação da impressão em maiores tamanhos. Investigações nesse sentido estão sendo realizadas pelos autores, a partir da construção de uma impressora de maior capacidade de impressão, que será capaz de avaliar protótipos em escala real.

5.1 Sugestões para estudos futuros

De modo a aprofundar os conhecimentos sobre o processo de dosagem e avaliação dos parâmetros norteadores para elaboração de novas metodologias, sugere-se para trabalhos futuros:

- Avaliar como as propriedades reológicas nas misturas, principalmente no que diz respeito a viscosidade e tensão de escoamento, se correlacionam com os parâmetros do sistema de impressão;
- Avaliar como o aumento do diâmetro dos agregados pode influenciar o comportamento das misturas imprimíveis e quais seus limites quando se relaciona o sistema de impressão; e
- Avaliar o efeito da produção em larga escala dessas misturas e resultados encontrados, bem como o desempenho de protótipos de edificações executadas com essas misturas.

6 REFERÊNCIAS

ABDULHAMEED, O.; AL-AHMARI ,A.; AMEEN, W.; MIAN, S.H. Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. **Advances in Mechanical Engineering**, 2019.

ABOU YASSIN, A. A.; HAMZEH, F.; AL SAKKA, F. Agent based modeling to optimize workflow of robotic steel and concrete 3D printers. **Automation in Construction**, v. 110, n. September 2018, 2020.

AL RASHID, A.; KHAN, S. A.; AL-GHAMDI, S. G.; KOÇ, M. Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. **Automation in Construction**, v. 118, 2020.

ALBAR, A.; CHOUGAN, M.; AL-KHEETAN, M. J.; SWASH, M. R.; GHAFAR, S. H. Effective extrusion-based 3D printing system design for cementitious-based materials. **Results in Engineering**, v. 6, 2020.

ALHUMAYANI, H.; GOMAA, M.; SOEBARTO, V.; JABI, W. Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, 2020.

ANTON, A.; REITER, L.; WANGLER, T.; FRANGEZ, V.; FLATT, R. J.; DILLENBURGER, B. A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns. **Automation in Construction**, v. 122, 2021.

ARUNOTHAYAN, A. R., NEMATOLLAHI, B., RANADE, R., BONG, S. H., SANJAYAN, J. Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. **Construction and Building Materials**, v. 257, out., 2020.

ASPRONE, D.; AURICCHIO, F.; MENNA, C.; MERCURI, V. 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. **Construction and Building Materials**, v. 165, pp. 218-231, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15839:** Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:** Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó-Determinação de massa específica. Rio de Janeiro. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.

BAZ, B.; AOUAD, G.; LEBLOND, P.; AL-MANSOURI, O.; D'HONDT, M.; REMOND, S. Mechanical assessment of concrete - Steel bonding in 3D printed elements. **Construction and Building Materials**, v. 256, 2020.

BAZ, B.; AOUAD, G.; REMOND, S. Effect of the printing method and mortar's workability on pull-out strength of 3D printed elements. **Construction and Building Materials**, v. 230, 2020.

BOURELL, D.L.; BEAMAN, J.B; LEU, M.C. et al. A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. **In**: RapidTech: US-Turkey workshop on rapid technologies. Istanbul Technical University; Tennessee Technological University, Erfurt, Germany, 2011.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 12390-3**: Testing Hardened Concrete - Compressive Strength of Test Specimens, Milton Keynes, UK, p. 15, 2009.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 12390-5**: Testing Hardened Concrete — Flexural Strength of Test Specimens, Milton Keynes, UK, p. 11, 2009.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 14488-4**: Testing Sprayed Concrete — Bond Strength of Cores by Direct Tension, Milton Keynes, UK, p.7, 2008.

BUSWELL, R.A.; SILVA, W.R. L.; JONES, S.Z.; Dirrenberger, J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, v.112, pp. 37-49, 2018.

BUSWELL, R.A.; SOAR, R.C.; GIBB, A.G.F.; THORPE, A. Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. **Automation in Construction**, v. 16, pp. 224-231, 2007.

CARDOSO, F. A. et al. Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry. **Cement and Concrete Research**, v. 57, p. 79–87, mar. 2014.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 9, p. 748–753, set. 2009.

CHEN, M.; YANG, L.; ZHENG, Y.; HUANG, Y.; LI, L.; ZHAO, P.; WANG, S.; LU, L.;

CHENG, X. Yield stress and thixotropy control of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up. **Construction and Building Materials**, v. 252, 2020.

CHEN, Q.; SOTO, B. G.; ADEY, B. T., Construction automation: Research areas, industry concerns and suggestions for advancement. **Automation in Construction**, v. 94, pp. 22-38, 2018.

CHEN, Y.; FIGUEIREDO, S. C.; LI, Z.; CHANG, Z.; JANSEN, K.; ÇOPUROĞLU, O.; SCHLANGEN, E. Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture. **Cement and Concrete Research**, v. 132, 2020.

CHEN, Y.; RODRIGUEZ, C. R.; LI, Z.; CHEN, B.; ÇOPUROĞLU, O.; SCHLANGEN, E. Effect of different grade levels of calcined clays on fresh and hardened properties of ternary-blended cementitious materials for 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, 2020.

CHINA STANDARDS PUBLICATION. Test Method for Fluidity of Cement Mortar; **GB/T 2419-2005**; China Standards Press: Beijing, China, 2005.

CHOUGAN, M.; HAMIDREZA, S. G.; JAHANZAT, M.; ALBAR, A.; MUJADDEDI, N.; SWASH, R. The influence of nano-additives in strengthening mechanical performance of 3D printed multi-binder geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 250, 2020.

DE SCHUTTER, G. et al. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. **Cement and Concrete Research**, v. 112, n. June, p. 25–36, 2018.

DEDENIS, M.; SONEBI, M.; AMZIANE, S.; PERROT, A.; AMATO, G. Effect of Metakaolin, Fly Ash and Polypropylene Fibres on Fresh and Rheological Properties of 3D Printing Based Cement Materials. **RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication**, pp. 206-215, 2020.

DIGGS-MCGEE, B. N.; KREIGER, E. L.; KREIGER, M. A.; CASE, M. P. Print time Vag. elapsed time: A temporal analysis of a continuous printing operation for additive constructed concrete. **Additive Manufacturing**, v. 28, pp. 205-214, 2019.

DING, T.; XIAO, J.; QIN, F.; DUAN, Z. Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages. **Construction and Building Materials**, v. 248, 2020.

DING, T.; XIAO, J.; ZOU, S.; WANG, Y. Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand. **Cement and Concrete Composites**, v. 113, 2020.

EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. **The European Guidelines for Self Compacting Concrete**, n. May, p. 63, 2005.

EL CHEIKH, K.; RÉMOND, S.; KHALIL, N.; AOUAD, G. Numerical and experimental studies of aggregate blocking in mortar extrusion. **Construction and Building Materials**, v. 145, pp. 452-463, 2017.

FALLIANO, D.; SCIARRONE, A.; DE DOMENICO, D.; MAUGERI, N.; LONGO, P.; GUGLIANDOLO, E.; RICCIARDI, G. Fiber-reinforced lightweight foamed concrete panels suitable for 3D printing applications. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 2019.

FIORETTI, M.; KOMPELLA, K. S.; MONTE, F. L.; ESPOSITO, L.; MENNA, C.; MORO, S.; ASPRONE, D.; FERRARA, L. Experimental Investigation on the Early Age Tensile Strength of Fiber Reinforced Mortar Used in 3D Concrete Printing. **Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication**, pp. 255-261, 2020.

FURET, B.; POULLAIN, P.; GARNIER, S. 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete. **Additive Manufacturing**, v. 28, pp.58-64, 2019.

GIBSON, I.; ROSEN, D.W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing**. Berlin: Springer, 2009.

GRIGORYAN, E.A.; SEMENOVA, M.D., Automation of the construction process by using a hinged robot with interchangeable nozzles. **Materials Today: Proceedings**, v. 30, Part 3, pp. 380-387, 2020.

HAMEED, R.; PAPON, A.; PERROT, A.; RANGEARD, D. Effect of Metallic Fibers on the Print Quality and Strength of 3D Printed Concrete. **Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication**, pp. 439-448, 2020.

HASSE, J. A. et al. Increasing structuration rate of 3D printable concretes: the effect of viscosity enhancing admixtures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 4, 2020.

HE, Y. et al. Energy-saving potential of 3D printed concrete building with integrated living wall. **Energy and Buildings**, v. 222, 2020.

HOSSEINI, E.; ZAKERTABRIZI, M.; KORAYEM, A. H.; XU, G. A novel method to enhance the interlayer bonding of 3D printing concrete: An experimental and computational investigation. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, pp. 112-119, 2019.

INGAGLIO, J.; FOX, J.; NAITO, C. J.; BOCCHINI, P. Material characteristics of binder jet 3D printed hydrated CSA cement with the addition of fine aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 206, pp. 494-503, 2019.

JUSTO, J.; TÁVARA, L.; GARCÍA-GUZMÁN, L.; PARÍS, F. Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites. **Composite Structures**, v. 185, pp. 537-548, 2018.

KASZYŃSKA, M.; SKIBICKI, S.; HOFFMANN, M. 3D Concrete Printing for Sustainable Construction. **Energies**, v. 13, n. 23, 2020.

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

KHALIL, N.; AOUAD, G.; CHEIKH, K. E.; RÉMOND, S. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. **Construction and Building Materials**, v. 157, 382-391, 2017.

KHAN, M. A. Mix suitable for concrete 3D printing: A review. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

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

KRUGER, J.; ZERANKA, S.; ZIJL, G. V. A rheology-based quasi-static shape retention model for digitally fabricated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 254, 2020.

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

LAO, W.; LI, M.; WONG, T. N.; TAN, M. J.; TIAHJOWIDODO, T. Improving surface finish quality in extrusion-based 3D concrete printing using machine learning-based extrudate geometry control. **Virtual and Physical Prototyping**, v.15, 2020.

LE, T.T., AUSTIN, S.A., LIM, S., BUSWELL, R. A., LAW, R., GIBB, A.G.F., THORPE, T..Hardened properties of high-performance printing concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, pp. 558-566, mar., 2012.

LI, Z.; WANG, L.; MA, G. Mechanical improvement of continuous steel microcable reinforced geopolymer composites for 3D printing subjected to different loading conditions. **Composites Part B: Engineering**, v. 187, 2020.

LONG, W.; TAO, J., L.; LIN, C.; GU, Y.; MEI, L.; DUAN, H.; XING, F. Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, 2019.

LOWKE, D.; DINI, E.; PERROT, A.; WEGER, D.; GEHLEN, C.; DILLENBURGER, B. Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. **Cement and Concrete Research**, v. 112, pp. 50-65, 2018.

LU, B.; ZHU, W.; WENG, Y.; LIU, Z.; YANG, E. H.; LEONG, K. F.; TAN, M. J.; WONG, T. N.; QIAN, S. Study of MgO-activated slag as a cementless material for sustainable spray-based 3D printing. **Journal of Cleaner Production**, v.258, 2020.

MA, G. et al. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 770–783, mar. 2019.

MA, G.; LI, Y.; WANG, L.; ZHANG, J.; LI, Z. Real-time quantification of fresh and hardened mechanical property for 3D printing material by intellectualization with piezoelectric transducers. **Construction and Building Materials**, v. 241, 2020.

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

MANIKANDAN, K.; WI, K.; ZHANG, X.; WANG, K.; QIN, H. Characterizing cement mixtures for concrete 3D printing. **Manufacturing Letters**, v. 24, pp. 33-37, 2020.

MARCHMENT, T.; SANJAYAN, J. Bond properties of reinforcing bar penetrations in 3D concrete printing. **Automation in Construction**, v. 120, p. 103394, dez. 2020.

MECHTCHERINE, V.; BOS, F.P.; PERROT, A.; DA SILVA, W.R. L.; NERELLA, V.N.; FATAEI, S.; WOLFS, R.J.M.; SONEBI, M.; ROUSSEL, N. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 132, 2020.

MECHTCHERINE, V.; BOS, F.P.; PERROT, A.; SILVA, W.R.; NERELLA, V.N.; FATAEI, S.; WOLFS, R.J.M.; SONEBI, M.; ROUSSEL, N. Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. **Automation in Construction**, v. 107, 2019.

MELO, K. M. *et al.*. Study of the reuse potential of the sisal fibers powder as a particulate material in polymer composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, pp. 4019-4025, 2019.

MOEINI, M. A.; HOSSEINPOOR, M.; YAHIA, A. Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing. **Construction and Building Materials**, v.257, 2020.

MOELICH, G. M.; KRUGER, J.; COMBRINCK, R. Modelling the interlayer bond strength of 3D printed concrete with surface moisture. **Cement and Concrete Research**, v. 150, p. 106559, dez. 2021.

MOHAN, M. K.; RAHUL, A.V.; SCHUTTER, G. D., TITTELBOOM. K. V. Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review. **Cement and Concrete Composites**, v. 115, 2021.

MOHAN, M.; RAHUL, A. V.; TITTELBOOM, K.; DE SCHUTTER, G. Evaluating the Influence of Aggregate Content on Pumpability of 3D Printable Concrete. **Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication**, pp. 333-341, 2020.

NEPOMUCENO, M. C. S.; PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; LOPES, S. M. R. Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 82–94, ago. 2014.

NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L.; LOPES, S. M. R. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 317–326, jan. 2012.

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

NICOLINI, A. et al. Rheological behavior of fresh latex polymeric mortar by squeeze-flow technique. **Construction and Building Materials**, v. 267, p. 121175, jan. 2021.

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**, v. 113, pp. 108-116, 2018.

PANDA, B.; SINGH, G. B.; UNLUER, C.; TAN, M. J. Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion based 3D concrete printing. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, pp. 610-619, 2019.

PHAM, L.; TRAN, P.; SANJAYAN, J. Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118785, jul. 2020.

RAHUL, A.V.; SANTHANAM, M. Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 109, 2020.

SALET, T. A. M. et al. Design of a 3D printed concrete bridge by testing*. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 13, n. 3, p. 222–236, 2018.

SCHUTTER, G.; LESAGE, K.; MECHTCHERINE, V.; NERELLA, V.; AGUSTÍ-JUAN, G., I. Vision of 3D printing with concrete — technical, economic and environmental potentials. **Cement and Concrete Research**, v. 112, pp. 25-36, 2018.

SHAKOR, P., NEJADI, S., PAUL, G.. An investigation into the effects of deposition orientation of material on the mechanical behaviours of the cementitious powder and gypsum powder in Inkjet 3D printing. **In: Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC**, pp. 42 - 49, 2019.

SHAKOR, P., NEJADI, S., SUTJIPTO, S., PAUL, G., GOWRIPALAN, N.. Effects of deposition velocity in the presence/absence of E6-glass fibre on extrusion-based 3D printed mortar. **Additive Manufacturing**, v. 32, mar., 2020.

SHAKOR, P.; NEJADI, S.; PAUL, G. A study into the effect of different nozzles shapes and fibre-reinforcement in 3D printed mortar. **Materials**, v. 12, n. 10, 2019a.

SHAKOR, P.; NEJADI, S.; PAUL, G. A Study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-Reinforcement in 3D Printed Mortar. **Materials**, v. 12, n. 10, p. 1708, 26 maio 2019b.

SHAKOR, P.; NEJADI, S.; PAUL, G. Investigation into the effect of delays between printed layers on the mechanical strength of inkjet 3DP mortar. **Manufacturing Letters**, v.23, pp.19-22, 2020.

SHAKOR, P.; NEJADI, S.; PAUL, G.; SANJAYAN, J. Dimensional accuracy, flowability, wettability, and porosity in inkjet 3DP for gypsum and cement mortar materials. **Automation in Construction**, v. 110, 2020.

SHAKOR, P.; NEJADI, S.; PAUL, G.; SANJAYAN, J.; ASLANI, F. Heat curing as a means of postprocessing influence on 3D printed mortar specimens in powderbased 3D printing. **Concrete Journal**, v.93, n.9, pp.65-74, 2019.

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

SVEIKAUSKAS, L; ROWE, S.; MILDENBERGER, J.; PRICE, J. Productivity Growth in Construction. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 142, 2016.

TAO, Y., LESAGE, K., TITTELBOOM, K. V., YUAN, Y., SCHUTTER, G. Effect of Limestone Powder Substitution on Fresh and Hardened Properties of 3D Printable Mortar. **In: Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication**, pp. 135-143, jul., 2020.

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

TAY, Y. W. D.; TING, G. H. A.; QIAN, Y.; BIRANCHI, P.; HE, L.; TAN, M. J. Time gap effect on bond strength of 3D-printed concrete. **Virtual and Physical Prototyping**, v.14, 2018.

TAY, Y.W. D., LI, M. Y., TAN, M. J.. Effect of printing parameters in 3D concrete printing: Printing region and support structures. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 271, pp. 261-270, set., 2019.

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*, v. 119, 2019.

WU, P.; WANG, J.; WANG, X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. **Automation in Construction**, v. 68, pp. 21-31, 2016.

XIAO, J. et al. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101779, nov. 2020.

XIAO, J. et al. Mechanical and microstructural evolution of 3D printed concrete with polyethylene fiber and recycled sand at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 293, p. 123524, jul. 2021.

XU, J.; BUSWELL, R. A.; KINNELL, P.; BIRO, I.; HODGSON, J.; KONSTANTINIDIS, N.; DING, L. Inspecting manufacturing precision of 3D printed concrete parts based on geometric dimensioning and tolerancing. **Automation in Construction**, v. 117, 2020.

XU, Y.; ŠAVIJA, B. Development of strain hardening cementitious composite (SHCC) reinforced with 3D printed polymeric reinforcement: Mechanical properties. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, 2019.

YE, J. et al. Effect of polyethylene fiber content on workability and mechanical-anisotropic properties of 3D printed ultra-high ductile concrete. **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122586, abr. 2021.

YE, J. et al. Fresh and anisotropic-mechanical properties of 3D printable ultra-high ductile concrete with crumb rubber. **Composites Part B: Engineering**, v. 211, p. 108639, abr. 2021.

YU, S., DU, H.; SANJAYAN, J. Aggregate-bed 3D concrete printing with cement paste binder.

Cement and Concrete Research, v.136, 2020.

ZAREIYAN, B.; KHOSHNEVIS, B. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete. **Automation in Construction**, v. 83, pp.212-221, 2017a.

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

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

ZHANG, J. et al. A review of the current progress and application of 3D printed concrete. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 125, n. April, 2019.

ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; SHE, W.; YANG, L.; LIU, G.; YANG, Y. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 201, pp.278-285, 2019.

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