



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

VINÍCIUS CAPISTRANO DE PAIVA VERAS

DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DE MISTURA DE COMPÓSITO
CIMENTÍCIO PARA APLICAÇÕES DE IMPRESSÃO 3D

FORTALEZA – CE

2024

VINÍCIUS CAPISTRANO DE PAIVA VERAS

DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DE MISTURA DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO
PARA APLICAÇÕES DE IMPRESSÃO 3D

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini

Co-Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral

FORTALEZA – CE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- V584d Veras, Vinícius Capistrano de Paiva.
Desenvolvimento de projeto de mistura de compósito cimentício para aplicações de impressão 3D / Vinícius Capistrano de Paiva Veras. – 2024.
112 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini.
Coorientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.
1. impressão 3D. 2. manufatura aditiva. 3. argamassa. 4. concreto. 5. industrialização. I. Título.
CDD 624.1
-

VINÍCIUS CAPISTRANO DE PAIVA VERAS

DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DE MISTURA DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO
PARA APLICAÇÕES DE IMPRESSÃO 3D

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini

Co-Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral

Aprovada em: 28/08/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral (Co-Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa (examinador interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)/Campus Crateús

Prof. Dr. Rafael Giuliano Pileggi (examinador externo)
Escola Politécnica - Universidade de São Paulo (Poli-USP)

Dedico este trabalho a Deus, que está sempre presente em minha vida, e aos meus familiares e amigos, pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me permitido ter chegado até aqui com saúde.

À Família Paiva, em especial a minha querida mãe, pela excelente criação dos seus três filhos e por estar sempre preocupada comigo, me apoiando em todas as decisões e me guiando para o melhor caminho.

Às irmãs Natália e Nicole, por me darem importantes conselhos para a vida e vibrarem comigo em todas as conquistas. Amo vocês.

À Família Veras, em especial aos meus avós, Luís e Celeste, por todo o investimento feito na minha pessoa e por acreditarem sempre em mim. Sou muito grato por tudo.

Ao meu pai, pelos conselhos profissionais e por querer o melhor para mim.

À minha namorada, Raquel, por estar comigo desde o início do curso, ter me acompanhado de perto e me dar bons conselhos nos momentos difíceis de decisão, além de sempre acreditar em mim.

Aos meus melhores amigos, Solon Leite, Gustavo Araújo, Victor Pezzino e Caio Pezzino, que me acompanham desde a infância, por me ajudarem em todos os momentos de dificuldades e me apoiarem. Obrigado por todos os momentos vividos.

A todos os meus amigos de turma do mestrado por todos os conhecimentos compartilhados ao longo do curso e todos os momentos de alegria vividos. Muito obrigado.

Aos professores da UFC que tive o prazer de aprender, em especial ao meu orientador, Alexandre Bertini, e co-orientador, Eduardo Cabral, pelos ensinamentos repassados e o apoio concebido nesse momento. A todos que contribuíram de alguma forma para essa conquista.

Ao grande parceiro nesta jornada, Lucas Burgos, pelo acompanhamento e grande suporte durante todo o desenvolvimento do trabalho.

A toda equipe do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFC (LMCC/UFC) e do HUB de Inovação da Construção da ABCP/USP (HubIC) pelo suporte no desenvolvimento do trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“O concreto é considerado adequado para a impressão 3D se for extrudado continuamente, puder ser construído até a altura do projeto e tiver uma resistência à compressão e à flexão que atenda a sua finalidade.” (MECHTCHERINE *et al.*, 2019, p. 9).

RESUMO

No século XVIII, houve um significativo crescimento populacional, favorecendo o crescimento descontrolado das cidades e o surgimento de problemas urbanos, como a falta de moradia adequada. O avanço da industrialização na construção civil tem a oportunidade de sanar o grande déficit existente no setor. Problemas existentes, como a falta de mão de obra qualificada, grande geração de resíduos e emissões de CO₂ na atmosfera levam ao estudo de sistemas construtivos alternativos. A impressão 3D surge como uma tecnologia inovadora que pode converter um modelo de *design* digital em um objeto físico. Com seu potencial para automação, eliminação de fôrmas, redução de resíduos de construção e melhoria da precisão geométrica, seu uso mostra-se muito promissor na construção civil. O objetivo deste trabalho consistiu em desenvolver um compósito cimentício com materiais naturais da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) para uso como massa de impressão 3D. Para isso, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os parâmetros reológicos e no estado endurecido de massas de impressão 3D. Em seguida, uma argamassa de projeção comercial foi caracterizada para uso como referência, assim como os materiais locais definidos. Foram dosadas e testadas as misturas de impressão 3D quanto às propriedades reológicas e mecânicas e, por fim, um protótipo de parede em “L” com dimensões 1,5m x 1,0m x 0,20m, além de blocos de 0,15m x 0,30m x 0,20m foram impressos. Como resultado, obteve-se uma mistura definitiva que foi capaz de ser impressa pela máquina, atendendo ao comportamento tixotrópico e aos limites estabelecidos pela literatura e pela argamassa de referência para os parâmetros reológicos e resistências mecânicas. Os blocos impressos foram testados à compressão, no qual foi verificado o atendimento à norma. Concluiu-se que os resultados desta pesquisa e os valores encontrados na literatura internacional para os compósitos 3DCP estão em conformidade com os padrões normalmente utilizados nesta nova técnica construtiva.

Palavras-chave: impressão 3D; manufatura aditiva; argamassa; concreto; industrialização.

ABSTRACT

In the 18th century, there was significant population growth, which led to the uncontrolled growth of cities and the emergence of urban problems, such as the lack of adequate housing. The advance of industrialization in the construction industry has the opportunity to remedy the large deficit in the sector. Existing problems, such as the lack of skilled labor, the large generation of waste and CO₂ emissions into the atmosphere, have led to the study of alternative construction systems. 3D printing has emerged as an innovative technology that can convert a digital design model into a physical object. With its potential for automation, elimination of formwork, reduction of construction waste and improved geometric precision, its use is very promising in the construction industry. The aim of this work was to develop a cementitious composite with natural materials from the Metropolitan Region of Fortaleza (RMF) for use as a 3D printing mass. To do this, a bibliographic survey was carried out on the rheological and hardening parameters of 3D printing putties. Next, a commercial projection mortar was characterized for use as a reference, as well as the local materials defined. The 3D printing mixtures were dosed and tested for rheological and mechanical properties and, finally, a prototype “L” wall with dimensions of 1.5m x 1.0m x 0.20m, as well as 0.15m x 0.30m x 0.20m blocks were printed. As a result, a definitive mixture was obtained that was capable of being printed by the machine, meeting the thixotropic behavior and the limits established in the literature and by the reference mortar for the rheological parameters and mechanical strengths. The printed blocks were tested in compression, which verified that they complied with the standard. It was concluded that the results of this research and the values found in international literature for 3DCP composites are in line with the standards normally used in this new construction technique.

Keywords: 3D printing; additive manufacturing; mortar; concrete; industrialization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Prioridades para uma construção sustentável	15
Figura 2 - Robô Gantry.....	19
Figura 3 - Esquema de impressão 3D à jato de aglutinante.....	21
Figura 4 - Impressão 3D à jato de aglutinante.....	22
Figura 5 - Exemplo de logotipo fabricado por impressão 3D baseada em spray	24
Figura 6 - Objeto impresso em 3D por extrusão do material	24
Figura 7 - Concreto impresso em 3D por extrusão.....	25
Figura 8 - Impressora 3D à base de extrusão na construção de casa.....	26
Figura 9 - Classificação dos fluidos de acordo com a reologia.....	33
Figura 10 - A região imprimível do concreto celular de impressão 3D com base em parâmetros reológicos.....	35
Figura 11 - Sistema de impressão COBOD.....	37
Figura 12 - Etapas de processamento e tipos de sistemas de impressão 3D de extrusão de concreto	38
Figura 13 - Projeto Wolf Ranch: o maior bairro do mundo construído por impressão 3D	39
Figura 14 - Maior edifício impresso em 3D da Europa.....	40
Figura 15 - Casa impressa em 3D pela empresa brasileira Cosmos 3D.....	41
Figura 16 - Laboratório HubIC da ABCP/USP	42
Figura 17 - Etapa metodológica do estudo	43
Figura 18 - Visita realizada ao Laboratório HubIC da ABCP/USP.....	44
Figura 19 - Reômetro <i>Pheso</i> do LMCC/UFC.....	46
Figura 20 - Geometrias utilizadas no Reômetro <i>Pheso</i> do LMCC/UFC.....	47
Figura 21 - Sequência do processo de mistura da argamassa de projeção comercial.....	48
Figura 22 - Perfil do ciclo de cisalhamento após a mistura no Reômetro <i>Pheso</i> do LMCC/UFC	49
Figura 23 - Área de histerese do gráfico Tensão de cisalhamento vs. Taxa de cisalhamento ..	52
Figura 24 - Tanque de cura e corpos de prova cilíndricos.....	53
Figura 25 - Moldagem de corpos de prova prismáticos	53
Figura 26 - Ensaio de resistência à compressão de corpo de prova cilíndrico	54
Figura 27 - Ensaio de resistência à tração na flexão de argamassa de projeção comercial	54
Figura 28 - Ensaio de massa específica do cimento CP V-ARI.....	56
Figura 29 - Amostras e peneiras utilizadas.....	57
Figura 30 - Curva granulométrica da areia utilizada	57
Figura 31 - Amostras submersas e molde utilizado	58
Figura 32 - Amostra no frasco submetida ao banho	58
Figura 33 - Recipiente utilizado no ensaio de massa unitária e volume de vazios.....	59
Figura 34 - Amostras separadas e peneira de 75 μ m utilizada	59
Figura 35 - Comparação da limpidez entre as lavagens	60
Figura 36 - Sequência do processo de mistura das argamassas dosadas com materiais da RMF	64
Figura 37 - <i>Flow Table Test</i>	65
Figura 38 - Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado	66
Figura 39 - Pistola de extrusão de argamassa utilizada no teste.....	67
Figura 40 - Ensaio de resistência à tração na flexão nas argamassas dosadas	68
Figura 41 - Ensaio de resistência à compressão	69
Figura 42 - Impressora 3D do tipo pórtico	70

Figura 43 - Impressora 3D do tipo braço robótico	71
Figura 44 - Conjunto misturador-bomba	71
Figura 45 - Blocos de concreto impressos em 3D	73
Figura 46 - Perfis do teste de fluxo das argamassas dosadas	76
Figura 47 - Resultados do teste de fluidez das misturas M1 a M5 (DIAS, 2022)	79
Figura 48 - Resultados do teste de fluidez das misturas T1 a T10 e TDBR	81
Figura 49 - Resultados do teste manual com a pistola de extrusão	84
Figura 50 - Peças impressas na impressora do tipo pórtico.....	90
Figura 51 - Parede impressa na impressora do tipo braço robótico.....	92
Figura 52 - Blocos de concreto impressos em 3D	93

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Perfil do teste de fluxo da argamassa de projeção comercial	74
Gráfico 2 - Perfil do teste de fluxo da argamassa TDBR	78
Gráfico 3 - Resultados do teste de fluidez da argamassa comercial e das misturas M1 a M5 (DIAS, 2022)	79
Gráfico 4 - Resultados do teste de fluidez das misturas T1 a T10 e TDBR	80
Gráfico 5 - Resultados do teste de densidade de massa e teor de ar incorporado	83
Gráfico 6 - Resultados do teste de resistência à tração na flexão da argamassa comercial e argamassas M1 a M5	85
Gráfico 7 - Resultados do teste de resistência à tração na flexão das argamassas T1 a T10 e TDBR	86
Gráfico 8 - Resultados do teste de resistência à compressão da argamassa comercial e argamassas M1 a M5	87
Gráfico 9 - Resultados do teste de resistência à compressão das argamassas T1 a T10 e TDBR	88
Gráfico 10 - Resultados do teste de resistência à compressão dos blocos de concreto	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Déficit habitacional no Brasil entre 2016 e 2019	11
Tabela 2 - Déficit habitacional no Ceará entre 2016 e 2019	12
Tabela 3 - Equivalência dos tipos de cimento Portland internacionais aos brasileiros	27
Tabela 4 - Projetos de mistura para concreto de impressão 3D proposto por LE <i>et al.</i> , (2012)	27
Tabela 5 - Projetos de mistura para concreto de impressão 3D proposto por KAZEMIAN <i>et al.</i> , (2017)	28
Tabela 6 - Projetos de mistura para concreto de impressão 3D proposto por ZHANG; XIAO, (2021)	29
Tabela 7 - Projetos de mistura para concreto de impressão 3D proposto por TARHAN; ŞAHİN, (2021)	30
Tabela 8 - Projetos de mistura para concreto de impressão 3D proposto por SKIBICKI et al., (2022)	31
Tabela 9 - Parâmetros reológicos conforme os trabalhos estudados	36
Tabela 10 - Ensaio de caracterização dos materiais utilizados	55
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de caracterização do Cimento Portland CP V-ARI	56
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de caracterização da areia	60
Tabela 13 - Composições adotadas de acordo com DIAS (2022)	61
Tabela 14 - Projetos de mistura obtidos a partir do método de dosagem ACI	62
Tabela 15 - Projetos de mistura obtidos após os testes de impressão no HubIC	63
Tabela 16 - Parâmetros reológicos da argamassa de projeção comercial	75
Tabela 17 - Parâmetros reológicos das argamassas dosadas	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3DCP	Impressão 3D Em Concreto
3DP	Impressão 3D
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	Manufatura Aditiva
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CBRT	Comissão de Política de Relações Trabalhistas
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
HubIC	Hub de Inovação da Construção
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LME	Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
Poli-USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UFC	Universidade Federal do Ceará
USC	Universidade do Sul da Califórnia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contextualização	11
1.2	Justificativa e Problemática da Pesquisa	16
1.3	Objetivos.....	17
1.3.1	<i>Objetivo geral.....</i>	17
1.3.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	A Impressão 3D na construção civil.....	18
2.2	Técnicas de Impressão 3D com potencial para aplicação na construção civil....	20
2.2.1	<i>Impressão 3D por jato de aglutinante (Binder Jetting)</i>	21
2.2.2	<i>Impressão 3D por spray.....</i>	23
2.2.3	<i>Impressão 3D por extrusão</i>	24
2.3	Projetos de mistura de argamassas para Impressão 3D	26
2.4	Reologia de argamassas para impressão 3D	32
2.5	Etapas de processamento e tipos de sistemas de impressão 3D de concreto	36
2.6	Panorama mundial atual da aplicação da Impressão 3D na construção civil	39
3	METODOLOGIA	43
3.1	Etapa 1 – Levantamento bibliográfico acerca das características das massas de impressão 3D.....	44
3.2	Etapa 2 – Caracterização de materiais para a produção de massas de impressão 3D.....	45
3.2.1	<i>Caracterização da argamassa de projeção comercial</i>	45
3.2.1.1	<i>Caracterização reológica da argamassa de projeção comercial.....</i>	45
3.2.1.2	<i>Caracterização mecânica da argamassa de projeção comercial.....</i>	52
3.2.2	<i>Caracterização dos materiais locais</i>	55
3.2.2.1	<i>Cimento.....</i>	55
3.2.2.2	<i>Agregado miúdo.....</i>	56
3.3	Etapa 3 – Dosagem e testes de projetos de misturas para impressão 3D	60
3.3.1	<i>Dosagem do projeto de mistura</i>	60
3.3.1.1	<i>Sistema de mistura das argamassas dosadas</i>	63
3.3.2	<i>Testes das argamassas dosadas</i>	64

3.3.2.1	<i>Comportamento reológico das argamassas dosadas</i>	64
3.3.2.2	<i>Teste de fluidez</i>	65
3.3.2.3	<i>Densidade de massa e teor de ar incorporado</i>	66
3.3.2.4	<i>Teste manual com pistola de extrusão de argamassa</i>	67
3.3.2.5	<i>Caracterização mecânica das argamassas dosadas</i>	68
3.4	Etapa 4 – Desenvolvimento de protótipos	69
3.4.1	<i>Sistema de impressão</i>	69
3.4.2	<i>Caracterização mecânica</i>	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1.	Comportamento reológico das argamassas	74
4.2.	Teste de fluidez	78
4.3.	Densidade de massa e teor de ar incorporado	82
4.4.	Teste manual com pistola de extrusão de argamassa	83
4.5.	Caracterização mecânica das argamassas	84
4.6.	Desenvolvimento de protótipos	89
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros	96
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A necessidade de mão de obra para a indústria, devido a revolução industrial ocorrida no final do século XVIII, gerou um enorme êxodo rural. O crescimento populacional nos centros urbanos ocorreu de forma exponencial, favorecendo o desenvolvimento descontrolado das cidades, gerando o modelo de urbanização que se conhece atualmente.

O déficit habitacional é um dos dados mais importantes da questão social em países em desenvolvimento. Observando o panorama atual das moradias no Brasil, é possível verificar uma grande desigualdade e irregularidade nas habitações, principalmente no que diz respeito a qualidade. Consequentemente, torna-se perceptível o aumento da preocupação da sociedade em relação a esse aspecto.

A construção de moradias e a melhoria das condições habitacionais e de saneamento básico é um direito garantido pela Constituição Federal, como pressuposto para a dignidade da pessoa humana. Além disso, o tema é muito ressaltado pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), principalmente pelo objetivo de número 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis. Portanto, a garantia desse direito aos cidadãos tornou-se uma responsabilidade associada ao Governo.

O levantamento realizado pela Fundação João Pinheiro entre os anos de 2016 e 2019, que resultou na publicação da cartilha “Déficit habitacional e inadequação de moradias no Brasil – Principais resultados para o período de 2016 a 2019”, divulgada em 2021, demonstrou que o déficit habitacional absoluto no Brasil passou de 5,657 milhões em 2016 para 5,877 milhões em 2019, conforme mostra a Tabela 1, configurando um déficit habitacional relativo de 8% em 2019 (FJP, 2021).

Tabela 1 - Déficit habitacional no Brasil entre 2016 e 2019

Déficit habitacional no Brasil: 2016-2019							
Ano	Total absoluto	Ano	Total absoluto	Ano	Total absoluto	Ano	Total absoluto
2016	5.657.249	2017	5.970.663	2018	5.870.041	2019	5.876.699
Aumento absoluto entre 2019 e 2016							219.450

Fonte: Elaborada pelo autor (2023) a partir do relatório da FJP sobre déficit habitacional no Brasil

Com relação ao Ceará, é possível perceber que o estado está entre os que possuem o maior déficit habitacional relativo da região Nordeste, estando atrás apenas dos seguintes estados: Bahia, Maranhão e Pernambuco. Os dados absolutos do estado, compreendidos entre os anos de 2016 a 2019, encontram-se na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Déficit habitacional no Ceará entre 2016 e 2019

Déficit habitacional no Ceará: 2016-2019							
Ano	Total absoluto	Ano	Total absoluto	Ano	Total absoluto	Ano	Total absoluto
2016	238.411	2017	228.784	2018	229.627	2019	239.187
Aumento absoluto entre 2019 e 2016							776

Fonte: Elaborada pelo autor (2023) a partir do relatório da FJP sobre déficit habitacional no Brasil

Através da análise da tabela, é possível perceber que houve um aumento absoluto no déficit de 776 habitações no período considerado, compostas por: habitações precárias, coabitações e ônus excessivo com aluguéis. Esses dados apontam para uma necessidade do aumento do número de ações governamentais que visam a construção de moradias e a melhoria das condições habitacionais.

Em 31 de maio de 1976, foi realizada a conferência das Nações Unidas, em Vancouver no Canadá, que deu origem ao Programa Habitat, cuja missão inicial era promover o desenvolvimento sustentável dos povoados humanos e o acesso de todos a uma moradia adequada. A Habitat I foi a primeira conferência das nações unidas que se discutiu a moradia adequada como um direito humano básico (ONU, 1976).

É fato que a efetividade do direito à moradia requer uma habitação adequada, devendo possuir características essenciais à saúde, segurança, conforto e nutrição, possibilitando o acesso sustentável a recursos naturais e comuns, água potável, energia elétrica, conforto térmico, instalações sanitárias, meios de armazenagem de comida, depósito de resíduos e lixo aos seus moradores. Além disso, deve possuir espaço compatível com as necessidades de seus habitantes, que possibilitem protegê-los das intempéries da natureza e ataques de animais, sendo a precariedade das condições de habitação e de vida, frequentemente, associadas às mais altas taxas de mortalidade e morbidade no mundo (ONU, 1976).

Sabe-se que a indústria da construção civil é um dos principais impulsionadores dos negócios, sendo fundamental para a economia de um país. No entanto, nos últimos anos, devido à falta de mão de obra qualificada, automação e questões de segurança, tem sido difícil atender à demanda almejada (menor tempo de construção, poluição e desperdícios). O levantamento realizado pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) revelou um aumento na

dificuldade de contratação de mão de obra qualificada na construção civil, principalmente para as pequenas empresas. De acordo com o estudo divulgado pela Comissão de Política de Relações Trabalhistas (CPRT) da entidade, cerca de 90% das empresas pesquisadas em fevereiro de 2022 veem gargalos no recrutamento, contra 77% em outubro de 2021.

No Brasil, ainda é possível observar a predominância de métodos construtivos artesanais, resultando em baixa produtividade e qualidade das edificações. Além disso, observa-se uma grande defasagem entre os custos e prazos, previstos e reais, e um alto índice de geração de resíduos nas obras. Mesmo com a criação de materiais cada vez mais industrializados e a expansão da produção habitacional nas grandes cidades, a construção das edificações continua baseada em um processo produtivo de origem manufatureira, com uso limitado de pré-fabricação e de máquinas (FARAH, 1992). O advento da tecnologia atrelada à construção civil tornou possível a obtenção mais rápida do produto final, com uma qualidade melhor.

Nesta vertente de eficiência e ampliação da produtividade no trabalho, o *International Council for Research and Innovation in Building and Construction – CIB* (2010) define:

A industrialização na construção é uma racionalização dos processos de trabalho na indústria para atingir a eficiência de custos, maior produtividade e qualidade. CIB (2010 p. viii)

A industrialização na construção civil tem como principal objetivo garantir baixo índice de desperdício, maior velocidade de execução do projeto, nível de produção de alta qualidade, reduzir o número de trabalhadores nas obras, melhorar a qualidade das edificações, diminuir a ocorrência de problemas patológicos, melhorar a organização e apontar a melhoria do nível de engenharia e da redução de desperdícios, ou seja, buscar construções cada vez mais enxutas, sendo consideradas o futuro do desenvolvimento construtivo (MOURA; SÁ, 2014).

Além de buscar a racionalização do trabalho nos moldes *tayloristas*¹, o paradigma da produção em massa inclui a máquina como elemento central à cadência da produção. Com isso, a máquina não só aumenta a capacidade de trabalho humano, como também passa a determinar seu ritmo (FLEURY; VARGAS, 1983). Em contrapartida, apesar da crítica à alienação do trabalho industrial, que degrada o trabalhador quase a um acessório da máquina,

¹ O *taylorismo* é um sistema de produção que tem como objetivos a busca da cooperação entre os trabalhadores, a seleção do perfil correto de cada indivíduo para cada função específica e a divisão de trabalho e responsabilidade entre a alta administração e os demais trabalhadores (TAYLOR, 1999).

deve-se reconhecer que tal organização da produção propiciou altos lucros de produção (FLEURY; VARGAS, 1983).

A industrialização das construções, de inspiração *taylorista-fordista*², propunha aumentar o domínio do capital sobre o processo construtivo e deslocar parte do trabalho do canteiro para o galpão industrial, onde poderiam ser utilizadas máquinas e métodos de organização e subdivisão do trabalho, permitindo a produção em massa de edifícios (FABRICIO, 1996). Basicamente, a industrialização das construções buscava o aumento da produtividade do trabalho e reduzir os desperdícios, de forma a transferir a lógica da indústria seriada de massa para a construção civil.

Em relação ao cenário ambiental, pode-se destacar a grande escassez de recursos do meio ambiente, o que acarreta no aumento do debate acerca da sustentabilidade na construção civil. Conseqüentemente, tem-se o surgimento de normas brasileiras, como as seis partes da NBR 15575, que garantem um desempenho satisfatório ao consumidor durante a vida útil da edificação, tornando iminente a necessidade de mudanças nas práticas produtivas adotadas pela construção brasileira.

O setor da construção civil passa por intensa reflexão e mudança de paradigmas, com a finalidade de buscar o uso mais racional, eficiente e de maior desempenho de materiais e sistemas construtivos, para reduzir os impactos negativos e, dessa forma, potencializar os impactos positivos no meio ambiente e na sociedade, de forma equilibrada com a expectativa de resultados econômicos deste setor (HONDA, 2016).

Para considerar uma construção sustentável, é necessário levar em consideração alguns princípios a serem adotados nas construções civis. Para isso, consideram-se aqueles mencionados por KIBERT (1994): minimizar o consumo de recursos; maximizar a reutilização dos recursos; utilizar recursos renováveis e recicláveis; proteger o ambiente natural; criar um ambiente saudável e não tóxico; buscar a qualidade no tratamento do ambiente de trabalho. A Figura 1 mostra as prioridades necessárias para uma construção sustentável de acordo com o proposto por SILVA MATEUS (2009).

² O *taylorismo-fordismo* se consolidou a partir de vários conceitos estruturantes: divisão do trabalho, racionalização do trabalho, cisão entre planejamento e execução do trabalho, sequências lineares de trabalho, operações fragmentadas, linha de montagem, equipamentos especializados, porém, pouco flexíveis, trabalho prescrito pela gerência, ausência de autonomia do trabalhador, dentre outras (TRINDADE, 2004).

Figura 1 - Prioridades para uma construção sustentável



Fonte: SILVA MATEUS (2009)

Os impactos ambientais são extremamente importantes na Construção Civil, pois seus efeitos podem ameaçar o desenvolvimento sustentável. Além de conhecer a área onde será realizada a construção, é necessário selecionar criteriosamente os materiais que serão utilizados, pois podem causar efeitos catastróficos ao meio ambiente. Para se perceber a importância dos materiais de construção no contexto da construção sustentável, importa saber desde logo quais os impactos ambientais provocados pela extração das matérias-primas necessárias à sua produção (TORRALBA; JALALI, 2010).

Quando não é possível recusar um produto ou material, há a possibilidade de reduzir o consumo do mesmo. Reduzindo sua quantidade, reduz também o lixo gerado por ele, seja pelas embalagens ou pelo descarte em si (SOLANO, 2008). Na construção civil, por exemplo, pode-se citar a utilização de materiais pozolânicos em substituição parcial ao cimento, visando a redução do seu consumo. Para incorporar soluções sustentáveis na construção civil, é necessário levar em consideração aspectos ambientais, funcionais e econômicos. A utilização de sistemas construtivos alternativos, cujos objetivos estão alinhados para respeitar estes aspectos, está sendo cada vez mais estudada. Alguns exemplos são: *Light Steel Frame*, *Wood Frame*, blocos de concreto, estruturas pré-moldadas, containers e a impressão 3D.

Por outro lado, a aplicação da impressão 3D em concreto (3DCP) na automação da construção é uma tecnologia em rápido desenvolvimento e que está sendo cada vez mais testada em aplicações da vida real (VALENCIA, 2017; BUSWELL *et al.*, 2018; BUSWELL *et al.*,

2007; MECHTCHERINE *et al.*, 2020). O desenvolvimento de materiais cimentícios para aplicações 3DCP, bem como o rápido avanço da tecnologia para digitalizar e automatizar o processo de projeto e construção, tem sido evidenciado nos últimos anos (BUSWELL *et al.*, 2018).

1.2 Justificativa e Problemática da Pesquisa

Conhecida como manufatura aditiva (AM), a impressão 3D (3DP) é uma tecnologia inovadora que pode converter um modelo de *design* digital em um objeto físico (CHAN *et al.*, 2018). O procedimento é formado através da união de materiais em camadas que se baseiam em dados de modelos 3D para fabricar várias estruturas e formas geométricas complexas sem usar ferramentas, matrizes ou acessórios (KAZEMIAN *et al.*, 2017; NGO *et al.*, 2018; XIA *et al.*, 2019). Com seu potencial para automação, eliminação de fôrmas, redução de resíduos de construção e melhoria da precisão geométrica, o 3DP mostra-se muito promissor para aplicações no setor da indústria da construção. Essa tecnologia permite alcançar um uso otimizado dos recursos ambientais e financeiros, bem como a construção de projetos arquitetônicos complexos do ponto de vista estético e estrutural (TAHMASEBINIA *et al.*, 2018).

Apesar de a impressão 3D na construção já ter sido estudada em laboratório, ainda não existem documentos regulamentares nesta área de aplicação. Atualmente, as pesquisas conhecidas foram realizadas usando métodos de testes existentes para adaptar concreto para impressão 3D (IZADGOSHASB *et al.*, 2021). Por isso, diante da necessidade de uma demanda crescente por construções rápidas, mas sem comprometer a sua qualidade e o seu desempenho, a impressão 3D surge como uma tecnologia promissora que pode construir estruturas complexas sem a necessidade direta de intervenção humana (CHUA; LEONG, 2014).

O presente estudo apresenta uma proposta de desenvolvimento tecnológico do mercado cearense da construção civil por meio de pesquisa em manufatura aditiva para impressão 3D com o uso de materiais locais e de base cimentícia. O projeto é relativamente recente no mercado, necessitando de estudos aprofundados para a otimização de materiais e processos. Por fim, auxilia no aprimoramento de tecnologias e lançamento de inovações, uma vez que, atualmente, muito ainda há de ser conhecido e desenvolvido nesse campo de pesquisa, podendo-se tornar o Estado do Ceará referência no assunto.

É fato que essa tecnologia ainda carece de mais informações e estudos, além de incentivos governamentais, visando a otimização e padronização de insumos e processos, assim como a consequente contribuição na elaboração de normas específicas. As motivações para esse estudo foram: o alto índice de moradias inadequadas no Brasil; a ausência de mão-de-obra qualificada; a necessidade de construções mais rápidas; a necessidade de construções mais sustentáveis; e os poucos estudos sobre a impressão 3D aplicada à construção civil no Brasil.

Como resultado, o projeto contribuirá significativamente para o portfólio mundial de conhecimento em manufatura aditiva e para a oferta de serviços de construção com impressão 3D. Considerando os poucos estudos que existem sobre esse tema no Brasil, o Estado do Ceará poderá se apresentar como pioneiro através do investimento em uma tecnologia inovadora e com potencial de crescimento no mercado da construção civil, aliando as vantagens da construção industrializada às necessidades atuais do mercado. O uso dessa tecnologia e dos estudos investigativos desenvolvidos servirão de subsídio para auxiliar na solução de problemas de moradias inadequadas no Estado do Ceará e possibilitar a utilização dessa tecnologia na construção de Habitações de Interesse Social em larga escala.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho consiste em desenvolver um compósito cimentício, visando o estudo de materiais naturais da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) de forma a possibilitar o uso como massa de impressão 3D.

1.3.2 Objetivos específicos

Tem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar as propriedades reológicas e no estado endurecido de massa de projeção comercial e de dados da literatura;
- b) Estudar e caracterizar os materiais da RMF para utilização na massa de impressão 3D;
- c) Desenvolver uma massa de impressão 3D com materiais da RMF, com avaliação de propriedades reológicas e no estado endurecido;
- d) Executar protótipos de pequeno porte utilizando a tecnologia de impressão 3D com o traço estudado;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O concreto é o material de construção mais utilizado em todo o mundo. As matérias-primas para sua produção são baratas e prontamente disponíveis na maioria dos lugares do mundo. É resistente (em compressão), durável, resistente ao fogo e, devido ao seu estado fluido antes da pega, pode ser aplicado em praticamente qualquer forma (BOS *et al.*, 2016).

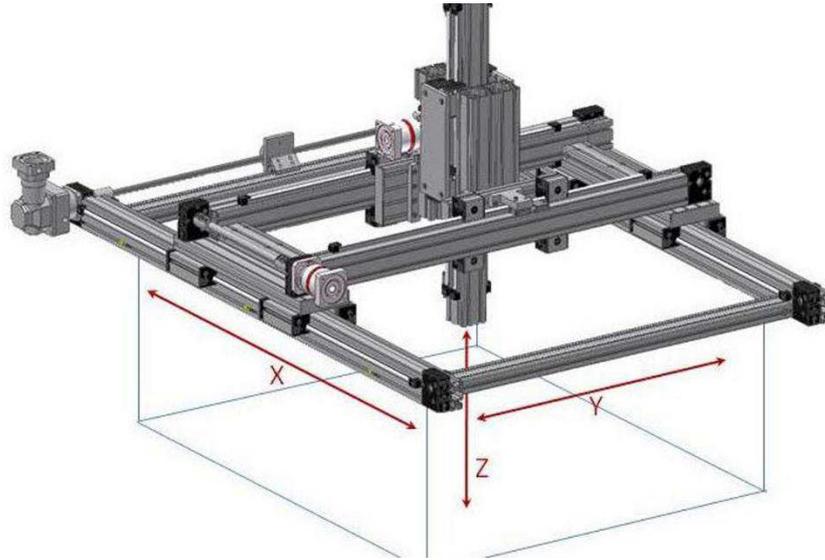
Apesar das vantagens do concreto como material estrutural, ele também enfrenta diversos desafios que vêm ganhando reconhecimento. Um deles está relacionado ao trabalho físico envolvido, principalmente para concreto moldado *in loco*. Tanto a montagem das fôrmas quanto a colocação das armaduras ainda exigem trabalho fisicamente exigente, principalmente quando são necessárias geometrias sob medida, resultando em problemas de saúde aos trabalhadores. Dessa forma, novos métodos de Manufatura Aditiva (AM), como a impressão tridimensional (3D), que não necessita de fôrmas e armaduras, têm sido explorados para a construção de concreto desde meados da década de 1990 (BOS *et al.*, 2016).

2.1 A Impressão 3D na construção civil

Como um tipo de método de fabricação digital, a impressão 3D em concreto (3DCP) pode depositar linearmente misturas cimentícias, camada sobre camada, para formar estruturas sem fôrmas e, posteriormente, possuindo o potencial de reduzir os requisitos de mão de obra (SCHUTTER *et al.*, 2018; BUSWELL *et al.*, 2018). A tecnologia 3DCP foi inicialmente proposta por Joseph Pegna (PEGNA, 1997) e depois desenvolvida por Khoshnevis (KHOSHNEVIS, 2004) para construir objetos 3D de grande escala, com geometria complexa por robôs *Gantry*³, como mostra a Figura 2. Depois disso, um crescente interesse pelo 3DCP foi observado, tanto na academia quanto na indústria, devido às suas vantagens em reduzir custos, proteger o meio ambiente, com a diminuição do desperdício, e economizar recursos (WENG *et al.*, 2020; HAN *et al.*, 2021).

³ O robô *Gantry* é um robô industrial com um braço robótico montado em um sistema ou estrutura de trilhos suspensos, compreendendo uma série de vigas ou escoras que proporcionam ao robô estabilidade e precisão para se mover ao longo dos eixos X, Y e Z.

Figura 2 - Robô Gantry



Fonte: MACRON DYNAMICS INC (2023)

O desenvolvimento de tecnologias de manufatura aditiva na construção está associado com muitas vantagens para a indústria da construção civil. Primeiramente, há o progresso de digitalização e a automação geral do processo de produção, que também afeta a construção. Há uma redução na mão de obra de trabalho necessária devido à introdução da automação, e equipamentos de programação para realizar certos tipos de trabalho. Assim, para a construção de um pequeno prédio utilizando tecnologias de impressão 3D, um grupo de trabalhadores não é necessário; alguns poucos especialistas qualificados são suficientes para executar um projeto impresso, desenvolver o próprio projeto e selecionar os tipos de materiais que são cruciais. Em segundo lugar, há uma redução no tempo de construção. Há um exemplo bem conhecido da empresa Apis Cor que criou um pequeno prédio em apenas 24 h (ASPRONE *et al.*, 2018).

Os pesquisadores estão procurando os materiais ideais a serem usados no projeto de mistura para controlar a hidratação do cimento, a capacidade de bombeamento, a deposição de material e os processos de cura. O desenvolvimento de materiais à base de cimento para aplicações de impressão 3D é um processo complicado, com muitos objetivos conflitantes (MARCHON *et al.*, 2018). A alta fluidez antes da deposição, a extrudabilidade durante a deposição, a capacidade de construção e a rigidez imediatamente após a deposição são todas propriedades desejadas para os materiais impressos usados nessa tecnologia (ROUSSEL, 2018; MA *et al.*, 2017).

O método 3DP foi comparado com o método de construção tradicional, tendo-se obtido que o mesmo é 25% mais barato para a construção de um andar de uma casa isolada com uma impressora. A impressão de um pavimento com um espaço de aproximadamente 130 m² pode ser feita em cerca de um dia com uma impressora. A velocidade de impressão atual é de 150 mm/s com uma altura de camada de 50 mm. O processo de impressão requer apenas duas pessoas: uma pessoa especialmente treinada (operador de máquina) e um trabalhador profissional especializado (MECHTCHERINE *et al.*, 2019).

A característica mais atraente de se construir com uma impressora 3D é a capacidade de criar formas geométricas complexas. Em um estudo por GOSSELIN *et al.* (2016), os autores dão dois exemplos de utilização da impressão em 3D para criar estruturas em larga escala. Ambos os elementos impressos têm uma estrutura oca a ser preenchida com concreto de alto desempenho reforçado com fibra ou um material isolante, como a espuma. Em tais paredes impressas com vazios internos, as propriedades de isolamento térmico podem ser aumentadas em até 56%, em comparação com as paredes clássicas. Além disso, paredes impressas com diferentes configurações de vazios no interior podem proporcionar melhores propriedades de isolamento acústico do elemento por ondas acústicas amortecedoras que passam por ela, dependendo da geometria das células da parede e propriedades materiais. Isto também é benéfico para reduzir o efeito do fogo em estruturas geométricas (GOSSELIN *et al.*, 2016).

Portanto, o interesse no uso de tecnologias de fabricação de aditivos na construção em larga escala não está apenas na velocidade da construção ou na redução de custos, mas também na melhora das características de elementos de construção (por exemplo, isolamento térmico ou isolamento acústico), principalmente devido ao uso inteligente da geometria na impressão de elementos estruturais.

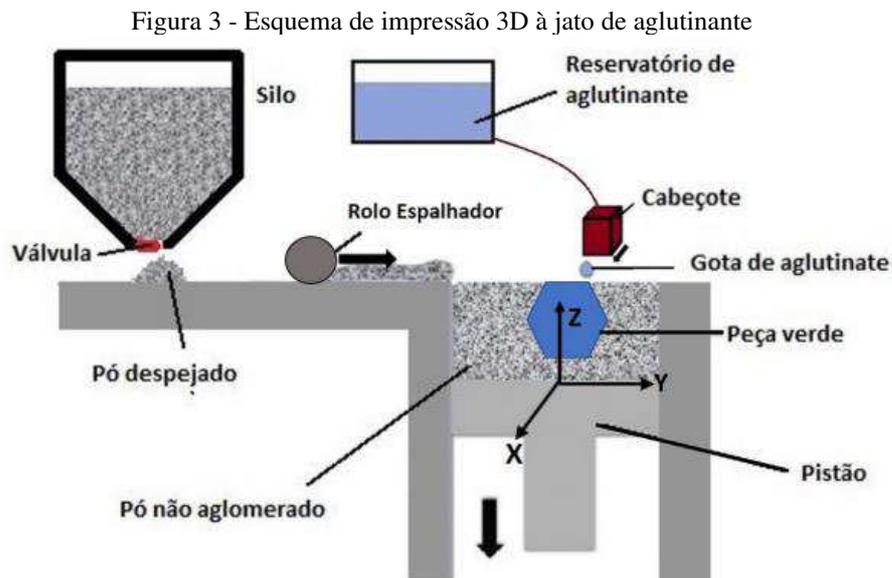
2.2 Técnicas de Impressão 3D com potencial para aplicação na construção civil

Nos últimos anos, as manufaturas aditiva e subtrativa tiveram um impacto notável em todo o mundo. Ambas se referem à processos industriais usados na fabricação de um protótipo ou peça. A manufatura subtrativa envolve a remoção de partes do objeto para criar um novo produto. Já a manufatura aditiva, que é o processo indicado para a construção civil, é caracterizada pelo depósito de materiais em camadas sobre o material-base, a partir de um modelo 3D gerado por um computador.

A manufatura aditiva, que também é comumente chamado por prototipagem rápida (DOLENC, 1994) ou impressão 3D, é o termo preferido na comunidade acadêmica, pois elimina a noção de que as peças de manufatura obtidas com essas técnicas se limitam à criação de protótipos (RADHARAMANAN, 2017). O grande benefício da impressão 3D é a possibilidade de fabricar produtos completamente personalizáveis. A seguir, são discutidas as principais técnicas de manufatura aditiva com potencial de utilização no setor da construção civil.

2.2.1 Impressão 3D por jato de aglutinante (*Binder Jetting*)

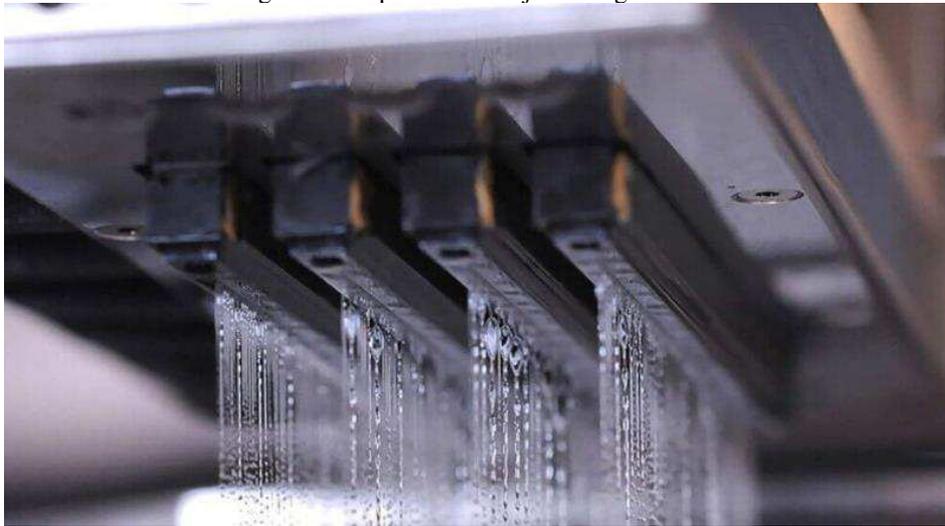
A impressão por jato de aglutinante, também conhecida como *Binder Jetting*, é um dos métodos de impressão comuns usados para imprimir peças em 3D em vários setores e tem grande potencial para a construção de grandes estruturas a partir de materiais cimentícios. Como mostram as Figuras 3 e 4, uma camada fina do material de impressão, geralmente em forma de pó, é espalhada sobre uma plataforma ou bandeja sólida, por exemplo, com um rolo. Em seguida, um aglutinante líquido é depositado sobre o leito de pó. O aglutinante cola o pó para formar uma peça sólida. Esse processo é repetido várias vezes e as camadas são impressas umas sobre as outras para formar um objeto 3D.



Fonte: COELHO (2018)

Como uma etapa adicional de pós-processamento, alguns materiais de impressão podem exigir a cura (WU *et al.*, 2016) ou a queima em forno (WITHELL *et al.*, 2011). No entanto, isso tornaria a impressão a jato de tinta uma técnica com alto consumo de energia para criar estruturas grandes. Uma das principais funções do pó é dar suporte à peça enquanto o aglutinante está sendo depositado sobre a camada superior que foi impressa na etapa anterior (TAY *et al.*, 2017). Embora geometrias complexas possam ser impressas com essa técnica, a peça acabada geralmente contém vazios que podem prejudicar sua qualidade. Por isso, alguns procedimentos adicionais após o processo de impressão são frequentemente aplicados à peça impressa.

Figura 4 - Impressão 3D à jato de aglutinante



Fonte: 3D FILA (2023)

De acordo com WU *et al.* (2016), essa técnica é mais adequada para imprimir peças e estruturas nas quais a alta velocidade de impressão é preferível à precisão de impressão. Os pesquisadores relataram o emprego de várias combinações de pó e aglutinante. Por exemplo, FENG *et al.* (2015) empregaram gesso e água como pó e aglutinante, respectivamente, enquanto GIBBONS *et al.* (2010) usaram cimento Portland de endurecimento rápido com aglutinante de álcool polivinílico para imprimir estruturas à base de cimento.

2.2.2 Impressão 3D por spray

Uma nova aplicação de misturas para impressão 3D foi estudada por LU *et al.* (2019) nos últimos anos, que relataram o uso de um material de impressão 3D baseado em spray. A pulverização de materiais cimentícios é uma tecnologia de construção convencional na engenharia civil. Com a injeção de ar comprimido de alta pressão, o material cimentício é pulverizado sobre substratos e se acumula gradualmente, compartilhando muitas semelhanças com a impressão 3D de materiais cimentícios.

A pulverização de materiais cimentícios pode é dividida em fases de entrega e deposição. Na fase de entrega, o material precisa ser bombeado para o bico de pulverização e submetido ao ar comprimido injetado para pulverizar. Na fase de deposição, o material recém-pulverizado se acumula aditivamente sobre o material pulverizado anteriormente para atingir a espessura designada.

De forma análoga, o processo de impressão 3D também consiste nas fases de entrega e deposição. Na primeira, o material cimentício é bombeado para o bocal de impressão por meio da mangueira. Na segunda, o material cimentício é depositado camada por camada com o movimento controlado do bico de impressão, indicando a viabilidade da impressão 3D baseada em spray. No entanto, a técnica apresenta baixa precisão, afetando muito a qualidade da impressão.

De acordo com LU *et al.* (2019), os materiais cimentícios pulverizados têm distribuição não uniforme, e a espessura do acúmulo varia muito em diferentes pontos das regiões pulverizadas, resultando em seções da estrutura irregulares, o que, conseqüentemente, necessita de uma etapa de pós-processamento para retificação, aumentando os custos de mão de obra e o tempo de construção. A Figura 5 mostra um exemplo de aplicação da técnica.

Figura 5 - Exemplo de logotipo fabricado por impressão 3D baseada em spray

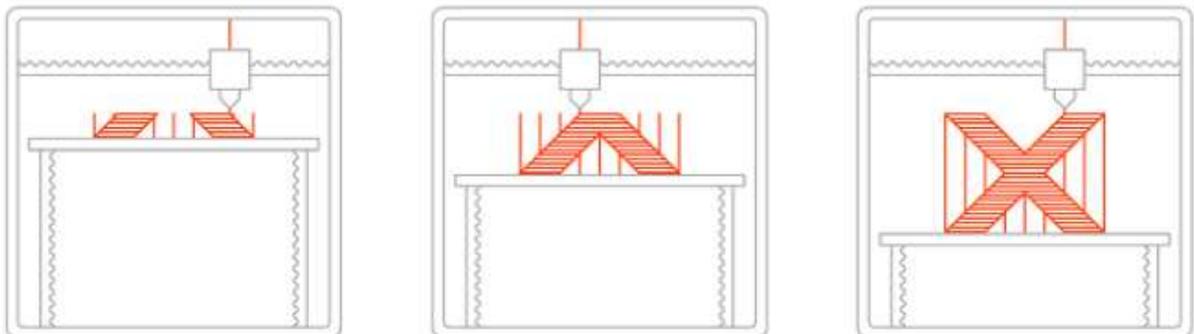


Fonte: LU *et al.* (2019)

2.2.3 Impressão 3D por extrusão

A técnica de impressão por extrusão é caracterizada por fabricar objetos 3D a partir de um modelo gerado por computador, como em um processo típico de protótipo rápido. Os modelos podem possuir vários detalhes e serem derivados de tomografias computadorizadas, imagens de ressonância magnética ou dados de modelos criados a partir de sistemas de digitalização de objetos 3D. Inicialmente, na técnica *Fused Deposition Modeling* (FDM), um material de filamento termoplástico é extrudado e depositado como um polímero semifundido em uma plataforma em um ciclo de camada por camada, como é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Objeto impresso em 3D por extrusão do material



Fonte: ALL3DP (2019)

A impressão em 3D do concreto por extrusão, conforme mostra a Figura 7, foi baseada no processo FDM. PEGNA (1997), no final da década de 1990, foi quem ofereceu a ideia inicial da impressão por extrusão para elementos de construção. Posteriormente, essa técnica foi utilizada na Universidade do Sul da Califórnia (USC) com alguns ajustes e modificações. O processo foi chamado de *Contour Crafting* por KHOSHNEVIS e DUTTON (1998) e HWANG e KHOSHNEVIS (2004).

Figura 7 - Concreto impresso em 3D por extrusão



Fonte: PRINT IT 3D (2020)

De acordo com DELGADO CAMACHO *et al.* (2018), o emprego de novas técnicas de 3DP no setor de construção, principalmente a extrusão, poderia reduzir os custos de mão de obra, diminuir o desperdício de material e criar geometrias complexas, que são difíceis de obter usando técnicas de construção convencionais. Além disso, LLORET *et al.* (2015) buscaram vincular todo o projeto digital, a manufatura aditiva e propriedades do material para construir uma forma complexa a partir de estruturas de concreto.

Segundo LIM *et al.* (2012), a aplicação de concreto impresso em larga escala por meio de processos de manufatura aditiva é chamada de *Concrete Printing*. A pasta de argamassa extrudada e vários novos critérios foram discutidos, como por exemplo, o projeto de mistura de argamassa e o sistema de entrega que foi desenvolvido para o processo impresso. É importante destacar que a técnica de impressão por extrusão é a mais utilizada para o desenvolvimento da impressão 3D à base de materiais cimentícios, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 - Impressora 3D à base de extrusão na construção de casa



Fonte: GARCIA (2023)

2.3 Projetos de mistura de argamassas para Impressão 3D

O projeto da mistura de concreto é fundamental, tanto no processo de impressão 3D do concreto à base de cimento, quanto no desempenho estrutural dos elementos impressos. Na extrusão do concreto, o material fresco é construído em uma camada sobre a outra (*layer-by-layer*), fazendo as camadas inferiores sustentarem as camadas superiores. Recentemente, os estudos que investigaram o papel dos projetos de mistura de concreto na impressão 3D de materiais cimentícios, mostrados a seguir, se concentraram em diferentes proporções de aditivos químicos e proporções de água/cimento, enquanto os mais antigos tentaram usar um agregado menos grosso. As camadas com agregados grossos não conseguem manter o formato original das camadas impressas. Além disso, a grande dificuldade em passar agregados grossos pela bomba e pelo bocal da máquina dificulta o processo de impressão.

JEON *et al.*, (2013) utilizaram os seguintes materiais em diferentes proporções nos projetos de mistura: cimento Portland comum tipo I, cinzas volantes, escória de alto-forno e sílica ativa. Além disso, foi utilizado o agente espessante do tipo polissacarídeo, a resina de polímero estireno-acrílico e o agente redutor de água à base de policarbonato, para melhorar o desempenho, e a fibra de náilon de 3 mm de comprimento, para controlar o surgimento de fissuras. Como agregado miúdo, foi usada a areia silicosa com diâmetros variando de 0,1 mm a 0,6 mm. Para projetar a mistura de argamassa adequada para o sistema de construção automatizado de forma livre, foram realizadas medições de resistência à compressão, tempo de

endurecimento e teste de fluxo, alterando a proporção de água/aglutinante, os tipos de mistura e a proporção de substituição da mistura. Como resultado, a argamassa misturada com 30% de cinzas volantes e 10% de sílica ativa, com relação a/c igual a 0,35, apresentou a máxima resistência à compressão, assim como o menor tempo de endurecimento, adequado para a construção automatizada de forma livre. Além disso, a fibra e o agente espessante foram adicionados para aumentar a resistência do compósito e manter a forma.

LE *et al.*, (2012) prepararam as misturas de concreto para a impressão 3D de concreto reforçado com fibras com os agregados finos. O objetivo era investigar a extrudabilidade e a capacidade de construção das misturas de concreto. Para isso, o diâmetro dos sistemas de fornecimento de bicos foi de 9 mm para proporcionar uma alta resolução impressa. Portanto, os materiais utilizados foram areia, com tamanho máximo de 2mm, cimento CEM do tipo I, que, conforme a Tabela 3, equivale ao cimento brasileiro do tipo CP I, 52,5R de alto desempenho, cinza volante, sílica ativa e água. A Tabela 4 resume a proporção da mistura do concreto.

Tabela 3 - Equivalência dos tipos de cimento Portland internacionais aos brasileiros

CIMENTO PORTLAND					
CIMENTO BRASILEIRO		CIMENTO AMERICANO		CIMENTO EUROPEU	
Tipo	Norma	Tipo	Norma	Tipo	Norma
CP I e CP I - S	ABNT NBR 5732	I	ASTM C 150	CEM I	EN-197-1
CP II	ABNT NBR 11578	II	ASTM C 150	CEM II	
CP III	ABNT NBR 5735	IS	ASTM C 595	CEM III	
CP IV	ABNT NBR 5736	IP	ASTM C 595	CEM IV	
CP V - ARI	ABNT NBR 5733	III	ASTM C 150	CEM V	

Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Tabela 4 - Projetos de mistura para concreto de impressão 3D proposto por LE *et al.*, (2012)

Mistura	Cimento (Kg/m³)	Areia (Kg/m³)	Cinza volante (Kg/m³)	Sílica ativa (Kg/m³)	Água (Kg/m³)
1	376	1612	107	54	150
2	446	1485	127	64	178
3	513	1362	147	73	205
4	579	1241	165	83	232
5	643	1123	184	92	257

Fonte: Elaborada pelo autor (2023) a partir do estudo de LE *et al.*, (2012)

Os autores abordaram a resistência ao cisalhamento para a trabalhabilidade do concreto e a resistência à compressão para os corpos de prova impressos. Como resultado,

verificou-se que a mistura ótima tinha uma relação areia-aglutinante de 3:2, com o último compreendendo 70% de cimento, 20% de cinzas volantes e 10% de sílica ativa mais 1,2kg/m³ de fibras de polipropileno de 12/0,18mm de comprimento/diâmetro com uma relação água/ligante de 0,26, com um aditivo superplastificante e retardador com dosagens de 1% e 0,5% em peso de ligante. Essa massa foi impressa através de um bocal de 9mm de diâmetro. O tempo em aberto estendeu-se até 100 min e a resistência à compressão do concreto superou a meta estabelecida, sendo de 110 MPa aos 28 dias.

KAZEMIAN *et al.*, (2017) desenvolveram quatro diferentes projetos de mistura de concreto para impressão 3D, apresentados na Tabela 5. Em seu estudo, eles identificaram as misturas como: PPM (somente cimento Portland), SFPM (contendo sílica ativa), FRPM (contendo fibra), NCPM (contendo nanoargila). Foi projetado um procedimento de teste para ser aplicado em diferentes sistemas de impressão 3D de concreto, concentrado nas propriedades das camadas impressas, em vez de usar mecanismos de bombeamento ou extrusão. Para realizar a estrutura proposta, foi construída uma impressora de concreto linear em escala de laboratório, capaz de imprimir camadas de 38,1 mm por 25,4 mm.

Tabela 5 - Projetos de mistura para concreto de impressão 3D proposto por KAZEMIAN *et al.*, (2017)

Mistura	Cimento (Kg/m ³)	Agregado miúdo (Kg/m ³)	a/c	Sílica ativa (Kg/m ³)	Fibra (Kg/m ³)	Nanoargila (%)	Redutor de água (%)	VMA (%)
PPM	600	1379	0,43	0	0	0	0,05	0,11
SFPM	540	1357	0,48	60	0	0	0,16	0
FRPM	600	1379	0,43	0	1,18	0	0,06	0,1
NCPM	600	1379	0,43	0	0	0,3	0,15	0

Fonte: Elaborada pelo autor (2023) a partir do estudo de KAZEMIAN *et al.*, (2017)

A fim de obter uma noção realista do intervalo de tempo necessário entre a deposição de camadas consecutivas, foi considerada a construção, camada a camada, de um edifício de um piso. Tratou-se de uma casa de 108 m² com dois quartos e um banheiro. Com base na planta da casa, a distância de deslocamento para cada camada foi medida em 67 metros. Considerando a velocidade de impressão linear de 60 mm/s, obteve-se um intervalo de tempo entre camadas de 19 minutos. Para a avaliação da estabilidade de forma do concreto de impressão 3D, foram propostos dois métodos de ensaio diferentes: “assentamento” e “estabilidade do cilindro”. Os dados experimentais revelaram que a inclusão da sílica ativa e nanoargila (uma argila altamente purificada) aumentaram a estabilidade da forma da mistura

de impressão fresca, enquanto uma pequena melhora foi observada como resultado da adição de fibra de polipropileno.

ZHANG; XIAO, (2021) desenvolveram um estudo concentrado na retração plástica e nas rachaduras da argamassa impressa em 3D misturada com areia reciclada como agregado fino. A retração e o desenvolvimento de rachaduras foram medidos pelo processamento de imagens e o efeito da areia reciclada foi avaliado. Para isso, foram impressas em 3D argamassas de areia natural e reciclada com proporções de substituição de 25%, 50%, 75% e 100%. A Tabela 6 mostra os projetos das misturas executadas.

Tabela 6 - Projetos de mistura para concreto de impressão 3D proposto por ZHANG; XIAO, (2021)

Mistura	Cimento (Kg/m ³)	Nano argila (Kg/m ³)	Areia natural (Kg/m ³)	Areia reciclada (Kg/m ³)	SP (Kg/m ³)	HPMC (Kg/m ³)	SG (Kg/m ³)	Água (Kg/m ³)	Água adicionada (Kg/m ³)
NM	1000	5	1000	0	1,52	1,28	0,70	350	0
RSM-25%	1000	5	750	250	1,68	1,28	0,70	350	22,58
RSM-50%	1000	5	500	500	1,84	1,28	0,70	350	45,15
RSM-75%	1000	5	250	750	2,00	1,28	0,70	350	67,73
RSM-100%	1000	5	0	1000	2,16	1,28	0,70	350	90,30

Fonte: Elaborada pelo autor (2023) a partir do estudo de ZHANG; XIAO, (2021)

Os resultados mostraram que a contração plástica da argamassa impressa em 3D aumentou com o aumento do teor de areia reciclada. Além disso, com a maior proporção de substituição de areia reciclada, a rachadura plástica da argamassa impressa em 3D mostrou uma maior profundidade. Os autores concluíram que a argamassa impressa em 3D misturada com areia reciclada apresentou uma taxa de contração plástica menor em uma proporção de substituição de 50%. No entanto, quando é atingida a taxa de 100%, a argamassa precisa de mais considerações sobre a retração para evitar rachaduras precoces no estágio plástico.

O trabalho desenvolvido por TARHAN; ŞAHIN, (2021) buscou avaliar o efeito do aditivo incorporador de ar (AEA) no comportamento fresco e reológico de argamassas projetadas para serem usadas em impressoras 3D. Escória de alto forno, argila de caulim calcinada, fibra de polipropileno e vários aditivos químicos foram usados nas misturas produzidas com cimento branco (CEM I 52.5 R) e areia de quartzo. Além dos testes de peso unitário, teor de ar e resistência à compressão, a fim de determinar a estabilidade dos elementos de argamassa para impressão 3D criados por extrusão camada por camada sem nenhuma

deformação, foram aplicados testes de extrudabilidade, capacidade de construção e tempo aberto. A Tabela 7 mostra os projetos de mistura desenvolvidos.

Tabela 7 - Projetos de mistura para concreto de impressão 3D proposto por TARHAN; ŞAHİN, (2021)

Mistura	Cimento (Kg/m ³)	GGBFS (Kg/m ³)	Argila (Kg/m ³)	Micro fibra (Kg/m ³)	Água (Kg/m ³)	Agregado 0-0,5 (Kg/m ³)	Agregado 0-1 (Kg/m ³)	Aditivo I (Kg/m ³)	Aditivo II (Kg/m ³)
A0	680	136	2,45	1,82	285,6	333	675	0,88	8,16
A1	680	136	2,45	1,82	285,6	332	674	0,88	8,16
A1,5	680	136	2,45	1,82	285,6	332	673	0,88	8,16
A2	680	136	2,45	1,82	285,6	332	673	0,88	8,16

Fonte: Elaborada pelo autor (2023) a partir do estudo de TARHAN; ŞAHİN, (2021)

Com isso, os autores concluíram que a adição de AEA às argamassas diminuiu o peso unitário, a viscosidade, o rendimento e a resistência à compressão, mas aumentou o teor de ar, o diâmetro de espalhamento, o tempo de endurecimento inicial e a tixotropia da argamassa para impressão 3D. Por fim, eles recomendaram o desenvolvimento de uma mistura química exclusiva para argamassas para impressão 3D, considerando o teor de ar, o diâmetro de espalhamento, o tempo de endurecimento inicial e a tixotropia da argamassa. Além disso, destacam a importância dos ingredientes ativos dos aditivos químicos que afetam o desempenho fresco e reológico da argamassa, como superplastificante, modificador de viscosidade e controle de hidratação do cimento.

SKIBICKI et al., (2022) desenvolveram um trabalho cujo principal objetivo foi produzir uma argamassa impressa em 3D com grânulos de PET em substituição ao agregado natural (10 a 50% em volume). Para isso, quatro misturas para impressão foram feitas: uma de referência e três nas quais o agregado natural foi substituído por granulado de PET em quantidades de 10%, 30% e 50% (por volume), respectivamente. Para avaliar as propriedades do agregado artificial, foram realizados testes de resistência à compressão e à flexão para as amostras padrão e impressas, resistência ao congelamento-descongelamento e um de desempenho em alta temperatura. A Tabela 8 mostra os projetos de mistura desenvolvidos.

Tabela 8 - Projetos de mistura para concreto de impressão 3D proposto por SKIBICKI et al., (2022)

Mistura	Cimento (Kg/m ³)	Cinza volante (Kg/m ³)	Sílica ativa (Kg/m ³)	Agregado miúdo (%)	PET (%)	SP (Kg/m ³)
B800/PET0	560	160	80	100	0	1,30
B800/PET10	560	160	80	90	10	1,30
B800/PET30	560	160	80	70	30	1,30
B800/PET50	560	160	80	50	50	1,30

Fonte: Elaborada pelo autor (2023) a partir do estudo de SKIBICKI et al., (2022)

Os resultados mostraram que o granulado PET é útil na impressão 3D devido às suas propriedades de construção e extrudabilidade. As misturas impressas com alta quantidade de granulado de PET (30% e 50%) mostraram reduções de até 75% nas resistências à compressão e à tração e de até 80% no teste de resistência ao congelamento e descongelamento. A exposição a uma temperatura que excede o ponto de fusão do PET resulta em uma redução significativa da resistência à compressão dos corpos de prova impressos (até 68,8% para 50% de adição de PET). Os autores concluíram que as misturas com até 10% de PET podem ser usadas para a maioria dos elementos estruturais, mesmo sob condições térmicas variáveis.

Através das tabelas acima, foram apresentadas diferentes proporções de mistura na impressão 3D de concreto com uso de distintos aditivos para o controle da reologia dos materiais, apresentando resultados variados. Cada estudo apresentou uma medida diferente para o tempo de endurecimento da pasta de concreto com base nas proporções de *a/c* e de mistura. Verificou-se que a maioria das relações *a/c* das argamassas esteve entre (0,3 e 0,4). É possível inferir que a relação *a/c* ótima para as argamassas de impressão 3D gira em torno de 0,35 +/- 0,05, possuindo um papel fundamental na fluidez da mistura e na moldabilidade das peças de concreto impressas. Para os aditivos, a relação do acelerador na mistura teve efeito semelhante na maioria dos estudos, assim como para o superplastificante.

Foi possível verificar que os ensaios realizados no estado fresco possuem uma maior relevância em relação ao estado endurecido, alinhando às propriedades de extrudabilidade e capacidade de construção do material. O tempo de mistura do concreto é essencial no processo de impressão e foi verificada uma grande diferença em cada um dos estudos, dependendo das proporções da mistura e da relação *a/c*. Observou-se que os tempos de mistura variaram de 5 a 15 minutos e que a maioria das misturas não incluía o agregado graúdo devido ao tamanho das partículas e à má moldabilidade. Dessa forma, os pesquisadores geralmente escolheram partículas finas, com intervalo de 0,1 mm a 2 mm, para facilitar o bombeamento.

2.4 Reologia de argamassas para impressão 3D

Entre as técnicas usadas na impressão 3D de concreto, a baseada em extrusão é a mais pesquisada e utilizada. O processo de impressão 3D de concreto baseado em extrusão inclui o bombeamento do material de construção, a extrusão do material por meio de um bocal para criar a geometria de camada desejada e construção da estrutura com base no processo aditivo camada por camada (MECHTCHERINE *et al.*, 2020; JAYATHILAKAGE *et al.*, 2020; WOLFS *et al.*, 2018; KRUGER *et al.*, 2019).

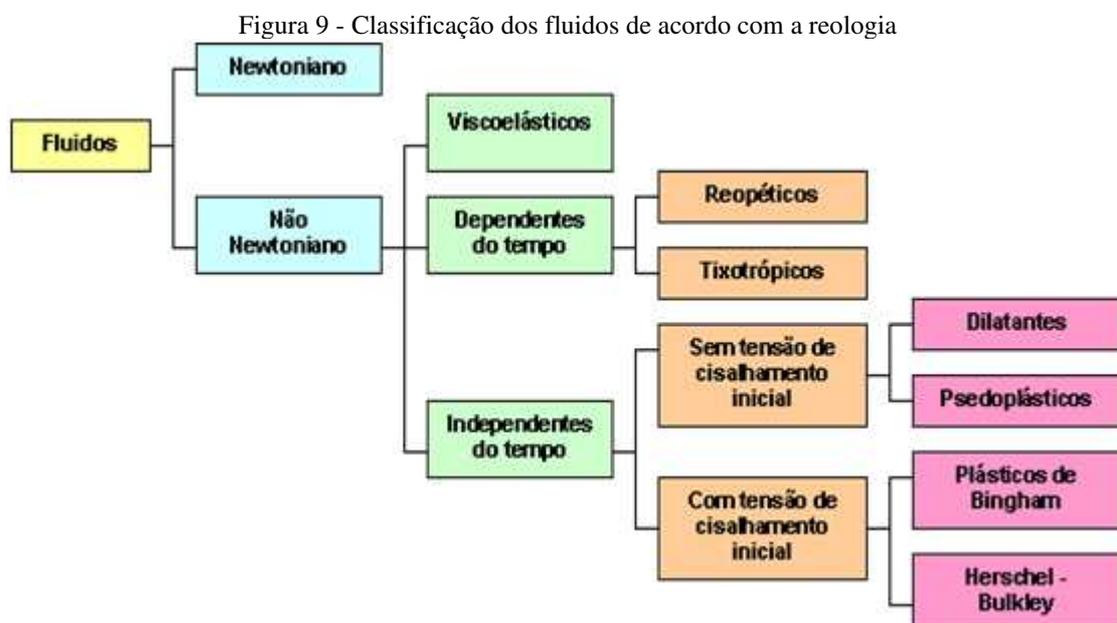
O principal problema no desenvolvimento de uma mistura para impressão 3D é equilibrar suas propriedades entre extrudabilidade e capacidade de construção, ou seja, a capacidade da camada inferior suportar as camadas superiores (LU *et al.*, 2019; MOHAN *et al.*, 2021). LIM *et al.* (2012) estabeleceu em seu trabalho os conceitos e métodos de teste recomendados para as propriedades frescas das misturas 3DCP, como extrudabilidade, capacidade de construção e tempo em aberto. A extrudabilidade refere-se à extrusão suave de misturas de impressão com boa qualidade superficial e consistência dimensional (KAZEMIAN *et al.*, 2017). Já a capacidade de construção é a capacidade de resistir à deformação das misturas de impressão 3D (3DP) após depositadas no bocal de impressão (JAYATHILAKAGE *et al.*, 2020).

Portanto, é necessário que o material tenha boa trabalhabilidade e fluidez (menor tensão de escoamento) adequada para a extrusão e o bombeamento de forma eficaz e contínuo por meio de um bocal, sem que ocorram bloqueios e segregação durante esse processo. Após a extrusão e a deposição de camadas, o material deve atingir resistência e rigidez suficientes para suportar seu peso (maior tensão de escoamento), bem como o peso das camadas superiores construídas, sem deformação excessiva (BUSWELL *et al.*, 2018; BUSWELL *et al.*, 2007).

A resistência da ligação entre duas camadas consecutivas deve ser melhorada, com o objetivo de evitar falhas estruturais frequentes no estado endurecido devido a uma ligação mais fraca entre duas camadas (MARCHMENT; SANJAYAN, 2020; MARCHMENT *et al.*, 2019). ZOU *et al.* (2021) afirmou em seu trabalho que o material necessita ter um bom comportamento tixotrópico, fenômeno em que a viscosidade aumenta com o tempo e diminui após o cisalhamento, com o objetivo de se adequar ao intervalo de tempo entre o lançamento das camadas. PERROT *et al.* (2008) afirmou que a velocidade de extrusão desempenha um papel fundamental. Por exemplo, em velocidades muito baixas, pode ocorrer segregação de fase e a pressão de extrusão aumenta.

A partir da relação taxa de deformação e tensão de cisalhamento, os materiais podem ser divididos em dois tipos: newtonianos e não-newtonianos. Enquanto o primeiro é considerado um fluido ideal, apresentando propriedades bem definidas e seguindo o modelo proposto pela Lei de Newton da viscosidade, o segundo é caracterizado por não apresentar relação única entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento, possuindo viscosidade dependente da cinemática do escoamento. Com isso, as curvas de escoamento são determinadas por modelos matemáticos, que relacionam a taxa de deformação e a tensão durante o escoamento por meio de diversos parâmetros.

Alguns exemplos de modelos matemáticos são: o Power-Law, que é o modelo mais simples e mais utilizado nas soluções de engenharia para fluidos puramente viscosos; o Herschel-Bulckley, que descreve fluidos com tensão limite de escoamento e possuem uma estrutura muito forte abaixo da tensão limite de escoamento, com viscosidade muito elevada. Ou seja, ao atingir a tensão limite de escoamento, a estrutura do fluido se quebra, causando uma queda brusca nos níveis de viscosidade; e Bingham, que apresenta uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, a partir do momento em que se atinge uma tensão de cisalhamento inicial. Na Figura 9, é possível observar a classificação dos fluidos de acordo com o comportamento reológico do material.



Fonte: COSTA (2017)

O concreto para impressão 3D comporta-se como um fluido de Bingham de acordo com LIU et al., (2021) e XU et al., (2021) e segue, portanto, o modelo de Bingham (Equação 1). Portanto, os dois principais parâmetros reológicos que definem um material de Bingham são a tensão de escoamento (τ_0) e a viscosidade (μ). A tensão de escoamento é definida como a tensão no início do fluxo do material, ou seja, o início do fluxo ocorre depois que a tensão de cisalhamento excede o valor da tensão de escoamento. Já a viscosidade do fluido é uma medida de sua resistência ao fluxo (BINGHAM, 1922).

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \text{ (Bingham)} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

τ igual a tensão de cisalhamento (Pa);

η_p igual a viscosidade plástica (Pa.s);

τ_0 igual a tensão de escoamento (Pa);

$\dot{\gamma}$ igual a taxa de cisalhamento (s^{-1}).

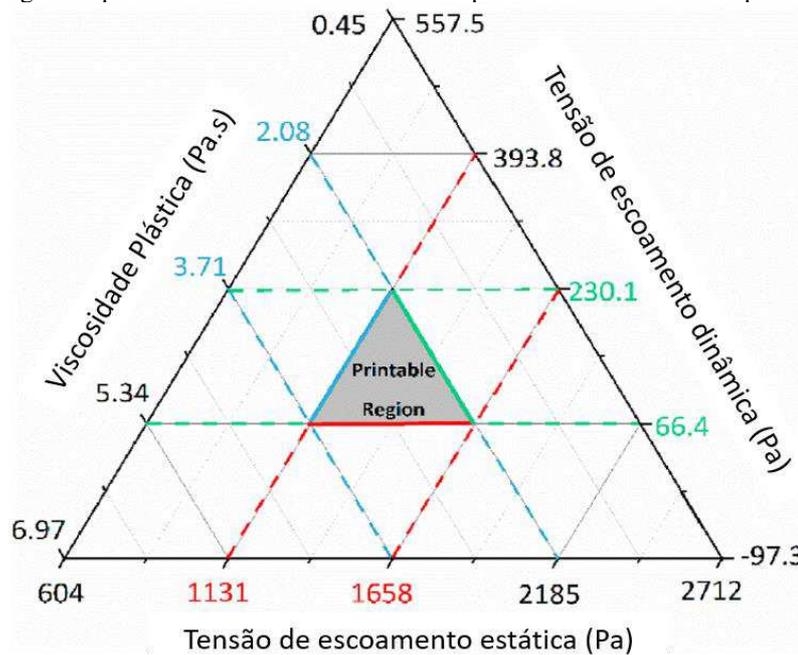
É fato que a trabalhabilidade e a compactação ajudam o concreto a cobrir a armadura adequadamente e a fornecer resistência de ligação antecipada, assim como a proteger a armadura da deterioração. No entanto, no concreto para impressão 3D não há compactação mecânica. O material é agitado apenas na fase de mistura e bombeamento. Por isso, essa agitação não é adequada para remover as bolhas de ar aprisionadas e reorganizar o material para proporcionar a densidade de empacotamento ideal. Como resultado, o 3DCP pode ser poroso em relação ao concreto moldado ou à mistura de argamassa com compactação ou vibração (LE *et al.*, 2012; HAMBACH; VOLKMER, 2017). Isso pode ser considerado um grande desafio para a impressão de concreto 3D, pois a maior porosidade resulta em propriedades mecânicas e problemas de durabilidade.

Com base nisso, três requisitos básicos para as propriedades reológicas das misturas de impressão 3D foram propostos por ZHANG *et al.* (2018): 1) tensão de escoamento dinâmica e viscosidade adequadas para garantir bombeamento e extrusão suaves; 2) alta tensão de escoamento estática para resistir à deformação após a extrusão; 3) excelente tixotropia para promover o tempo de impressão. Portanto, é fundamental que a reologia do material seja

estudada e conhecida, para que haja um maior controle ativo durante os estágios do processo de impressão.

LE *et al.* (2012) apontou que a tensão de cisalhamento que garante a extrudabilidade e a capacidade de bombeamento adequadas varia de 300 Pa a 900 Pa. LIU *et al.* (2021) estabeleceram faixas de tensão de escoamento dinâmica entre -97,3 Pa a 557,5 Pa, viscosidade plástica entre 0,45 Pa.s a 6,97 Pa.s e tensão de escoamento estática entre 604 Pa a 2712 Pa para o concreto celular de densidade entre 1550 e 1850 kg/m³. No entanto, os intervalos de melhor efeito, que configuraram uma impressão eficaz, variam de 66,4 Pa a 230,1 Pa para a tensão de escoamento dinâmica, 2,08 Pa.s a 3,71 Pa.s para a viscosidade plástica e 1113 Pa a 1658 Pa para a tensão de escoamento estática, conforme mostra a Figura 10. Por outro lado, XU *et al.* (2021) delimitaram a tensão de escoamento dinâmica e a viscosidade plástica entre 250-480 Pa e 3,2-5,6 Pa.s, respectivamente, e a tensão de escoamento estática necessária no intervalo de 420-550 Pa para o concreto à base de cimento Portland branco impresso em 3D.

Figura 10 - A região imprimível do concreto celular de impressão 3D com base em parâmetros reológicos



Fonte: LIU *et al.* (2021)

ZHANG *et al.* (2019) também consideraram a fluidez, as propriedades reológicas (viscosidade, tensão de escoamento, tixotropia) e o tempo em aberto como propriedades frescas críticas para controlar a capacidade de impressão (bombeabilidade, extrudabilidade e capacidade de construção) ao desenvolver concreto de impressão 3D de alta tixotropia. Essa

pesquisa indicou que a mistura de impressão melhorada pela tixotropia obteve maior fluidez inicial para bombeamento e melhor resistência à deformação após a extrusão. A Tabela 9 resume os limites dos parâmetros reológicos conforme o estudo realizado.

Tabela 9 - Parâmetros reológicos conforme os trabalhos estudados

Autor	Tensão de cisalhamento (Pa)	Tensão de escoamento dinâmica (Pa)	Tensão de escoamento estática (Pa)	Viscosidade Plástica (Pa.s)
LE et al. (2012)	300 a 900	-	-	-
LIU et al. (2021)	-	66,4 a 230,1	1113 a 1658	2,08 a 3,71
XU et al. (2021)	-	250 a 480	420 a 550	3,2 a 5,6

Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

O ensaio da mesa de fluxo foi usado para avaliar a viscosidade da argamassa fresca e a deformação. Com base nos estudos realizados, RAHUL; SANATHAM (2020) descobriram que os espalhamentos de 4 grupos de argamassa impressa em 3D variaram de 18,3 a 18,7 cm. LU *et al.* (2019) obtiveram diâmetros de espalhamento de materiais cimentícios imprimíveis em 3D variando de 15 a 25 cm, dependendo da proporção da mistura. TAY; QIAN; TAN, (2019) tentaram determinar a zona de capacidade de impressão do concreto para impressão 3D usando o teste da mesa de fluxo e descobriram que os diâmetros de propagação de 16 grupos de concretos variavam de 11 a 21 cm. RUBIO *et al.* (2017), por outro lado, produziram concretos impressos em 3D com diâmetros de espalhamento variando de 22 a 28 cm, dependendo da proporção de aditivos nas misturas.

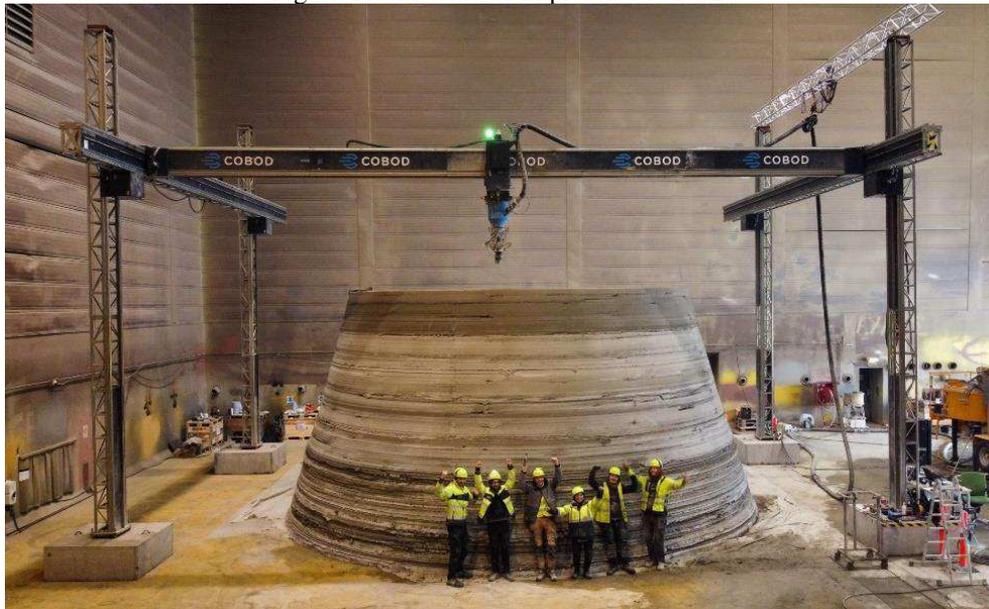
2.5 Etapas de processamento e tipos de sistemas de impressão 3D de concreto

Todos os sistemas de impressão 3D de concreto compõem uma série de etapas, com o objetivo final de produzir o material impresso em 3D autossuficiente. As principais etapas são definidas em sequência como: dosagem, mistura, armazenamento, transporte, extrusão do concreto e cura.

De acordo com WANGLER *et al.* (2022), a dosagem é o processo de pesagem de quantidades definidas de materiais secos, água, aditivos químicos e outros componentes. Na mistura, a água é inicialmente adicionada aos materiais secos e a energia mecânica é usada para dispersar os materiais secos de forma homogênea e para iniciar o contato entre a água e os materiais secos, distribuindo a água de forma ideal para cobrir homogeneamente todas as partículas sólidas. O armazenamento é uma etapa presente em alguns sistemas de impressão na

qual o material é armazenado antes de ser alimentado em um sistema de bombeamento. Essa operação de armazenamento. Por exemplo, no sistema de impressão COBOD, há um funil que alimenta o funil que alimenta o rotor/estator do cabeçote de impressão, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 - Sistema de impressão COBOD



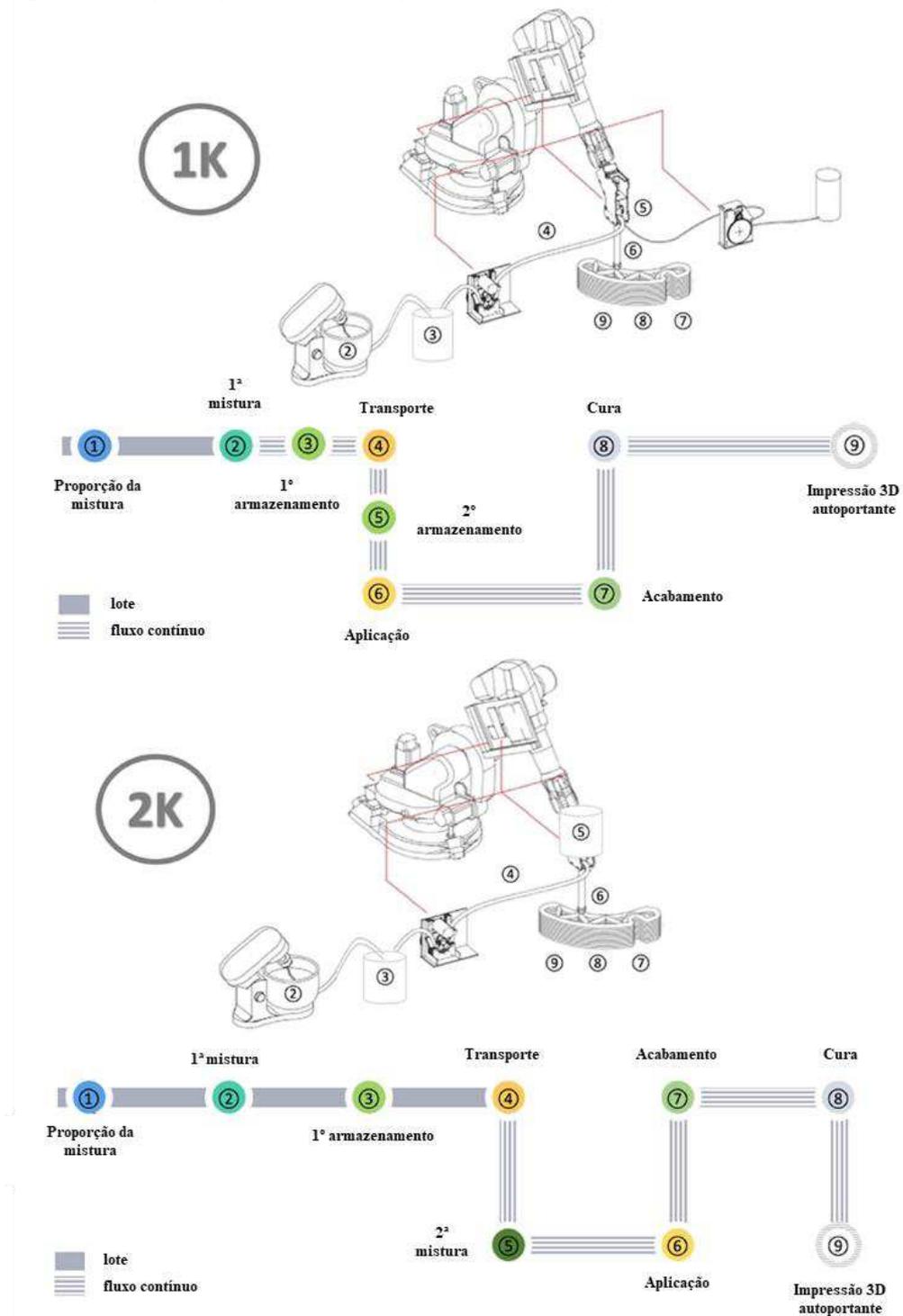
Fonte: COBOD (2023)

O transporte consiste na entrega do material ao cabeçote de impressão, sendo esse processo realizado exclusivamente por bombeamento. A maioria dos sistemas publicados utiliza bombas de cavidade progressiva (rotor/estator) para realizar essa operação, no entanto, de acordo com MECHTCHERINE et al. (2020), bombas de pistão também podem ser usadas. A etapa de aplicação na impressão por extrusão 3D de concreto é a extrusão a partir do cabeçote de impressão e a cura se refere a etapa em que o concreto está desenvolvendo sua força para suportar outras camadas. Essa etapa é fundamental para que a "capacidade de construção" seja alcançada, evitando o colapso da estrutura.

WANGLER *et al.* (2022) definiram o sistema de impressão composto pelas etapas descritas acima como sistema de um componente (1K). No entanto, citam ainda o sistema de dois componentes (2K), que contempla uma etapa de mistura secundária, envolvendo a injeção de um aditivo no cabeçote de impressão para o controle da rigidez, a fim de aumentar a capacidade de construção. Ainda de acordo com os autores, até o momento, a impressão no local por sistemas de grande escala são exclusivamente sistemas 1K, incluindo as mais avançadas impressoras disponíveis comercialmente, por exemplo, da COBOD, Apis Cor,

Contour Crafting e ICON. Por outro lado, os sistemas 2K, como os da Sika e da Baunit, estão atualmente ocupando espaços muito menores para a produção de componentes pré-fabricados. A Figura 12 mostra de forma esquematizada as etapas de processamento e os tipos de sistemas de impressão 3D de concreto.

Figura 12 - Etapas de processamento e tipos de sistemas de impressão 3D de extrusão de concreto



Fonte: Adaptado de WANGLER *et al.* (2022)

2.6 Panorama mundial atual da aplicação da Impressão 3D na construção civil

A aplicação da impressão 3D na construção civil está revolucionando o setor, permitindo a criação de edifícios e infraestruturas de forma mais rápida, econômica e sustentável. Esta tecnologia inovadora já está sendo aplicada em diferentes partes do mundo, com exemplos impressionantes de construções impressas em 3D que mostram o seu potencial.

No Texas (Estados Unidos), por exemplo, está sendo desenvolvido um projeto pioneiro que promete redefinir o futuro da habitação: o maior bairro do mundo construído por impressão 3D, denominado Wolf Ranch. O projeto é uma colaboração entre a empresa de construção ICON, especializada em impressão 3D, e a construtora Lennar. O bairro terá 100 casas impressas em 3D, variando entre 140 e 200 m², mostradas na Figura 13, sendo projetadas para serem sustentáveis, resilientes e esteticamente modernas. O projeto é um exemplo claro de como a tecnologia de impressão 3D pode transformar a indústria da construção. A escala e a complexidade do bairro demonstram que a impressão 3D não é apenas uma solução para habitação social ou projetos de pequena escala, mas também para empreendimentos residenciais de grande porte.

Figura 13 - Projeto Wolf Ranch: o maior bairro do mundo construído por impressão 3D



Fonte: Icon Build (2024)

Outro exemplo pode ser encontrado na Alemanha, onde foi realizada a construção do primeiro edifício de três andares do país construído inteiramente através de impressão 3D. Foi inaugurado em 2023 e marcou um novo capítulo na história da construção civil. O edifício, localizado no campus do Centro de Inovação em Engenharia da Universidade de Heidelberg, é uma estrutura de três andares que combina design moderno e funcionalidade. Com uma área total de cerca de 450 m², o prédio, mostrado na Figura 14, inclui espaços para escritórios, áreas de conferências e laboratórios. Cada andar foi projetado para maximizar a eficiência energética e a sustentabilidade, aproveitando ao máximo as capacidades únicas da impressão 3D. A impressão foi realizada utilizando a impressora BOD2, desenvolvida pela COBOD. A flexibilidade de design oferecida pela impressão 3D permitiu a inclusão de formas e estruturas que seriam difíceis de conseguir com métodos tradicionais de construção.

Figura 14 - Maior edifício impresso em 3D da Europa



Fonte: COBOD (2023)

Por sua vez, no Brasil, a tecnologia de impressão 3D na construção civil está ganhando destaque como uma solução inovadora para enfrentar desafios habitacionais e promover a sustentabilidade. Embora ainda esteja em fases iniciais, o uso da impressão 3D para a construção de casas no país já está sendo realizado. Um exemplo é o da empresa mineira Cosmos 3D, que já iniciou a aplicação da tecnologia no país (Figura 15).

Figura 15 - Casa impressa em 3D pela empresa brasileira Cosmos 3D

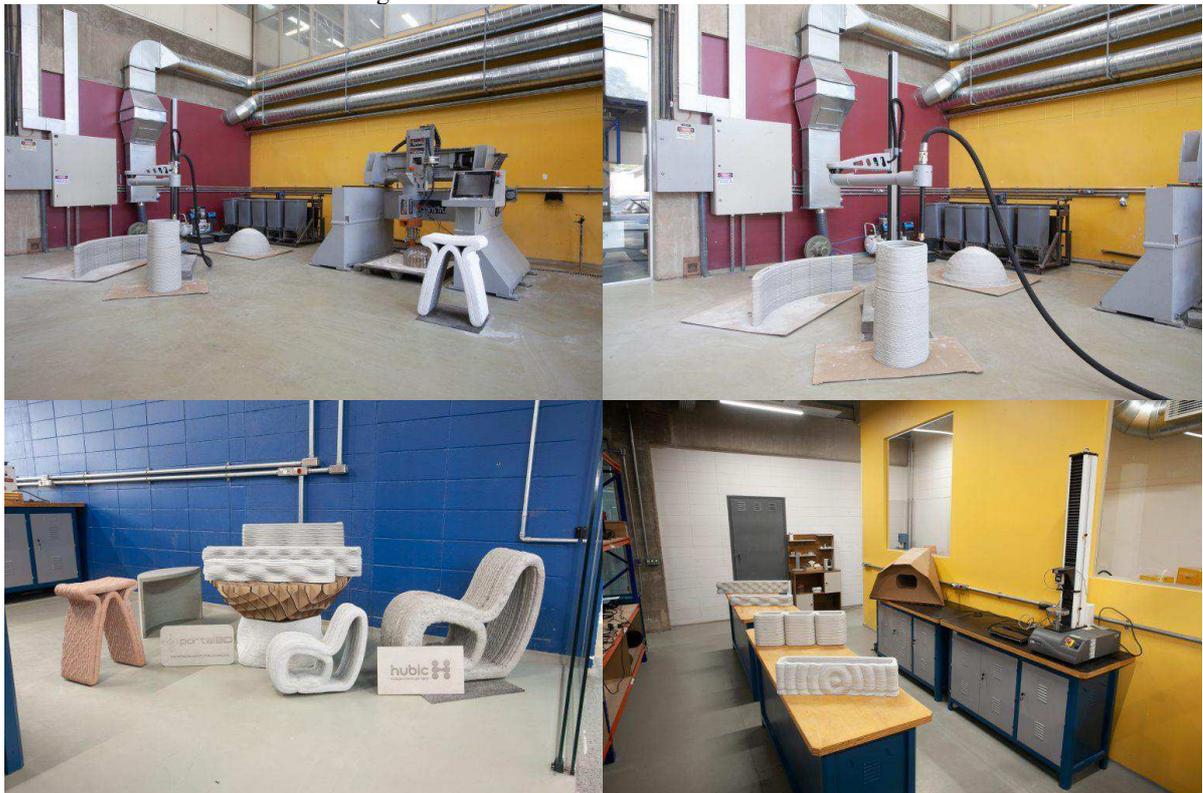


Fonte: Autor (2024)

Além disso, há um laboratório especializado em impressão 3D aplicada a construção civil, localizado em São Paulo, conhecido como Hub de Inovação da Construção (HubIC), que é uma parceria da Universidade de São Paulo – USP a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP em conjunto com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). O HubIC é um centro de excelência dedicado a impulsionar a inovação e a tecnologia no setor da construção civil e tem como objetivo reunir pesquisadores, estudantes, empresas e

profissionais da construção civil para colaborar no desenvolvimento de soluções inovadoras que respondam aos desafios contemporâneos da indústria, como sustentabilidade, eficiência energética e digitalização dos processos construtivos. O Hub conta com uma infraestrutura de ponta, incluindo laboratórios equipados com tecnologias avançadas, como impressoras 3D de grande escala. O desafio atual do HubIC é desenvolver uma cozinha totalmente impressa em 3D. A Figura 16 mostra alguns protótipos desenvolvidos pelo laboratório, assim como as impressoras 3D.

Figura 16 - Laboratório HubIC da ABCP/USP



Fonte: HubIC (2023)

Estes exemplos mostram como a impressão 3D está sendo aplicada de forma diversificada, desde habitação social a projetos habitacionais futuristas. À medida que a tecnologia continua evoluindo, espera-se que a impressão 3D desempenhe um papel crescente na construção civil, oferecendo soluções mais rápidas, econômicas e sustentáveis para os desafios globais de urbanização e habitação.

3 METODOLOGIA

A etapa metodológica de execução desse projeto foi dividida em quatro etapas, conforme mostra a Figura 17: 1) Levantamento bibliográfico acerca das características das massas de impressão 3D; 2) Caracterização de materiais para a produção de massas de impressão 3D; 3) Dosagem e testes de projetos de misturas para impressão 3D; 4) Desenvolvimento de protótipos.

Figura 17 - Etapa metodológica do estudo



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

É importante ressaltar que o estudo experimental do projeto do traço da argamassa foi realizado nas instalações da Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC/UFC). A impressão dos protótipos foi realizada no Hub de Inovação da Construção (HubIC) em São Paulo, que, conforme já relatado, é uma parceria da Universidade de São Paulo – USP a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP.

3.1 Etapa 1 – Levantamento bibliográfico acerca das características das massas de impressão 3D

Na primeira etapa de execução do projeto, inicialmente, houve a necessidade de uma minuciosa pesquisa bibliográfica com o objetivo de absorver o máximo de conhecimento acerca desta nova tecnologia, além de estudar os materiais a serem utilizados, os principais parâmetros utilizados e a formulação de traços para o concreto. Para isso, foi fundamental a pesquisa e leitura dos trabalhos já desenvolvidos no tema.

Foram utilizadas as bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, disponíveis a partir do Portal Periódicos CAPES, buscando, principalmente, pelas palavras-chave: “*3D printing*”, “*additive manufacturing*” e “*construction industry*”. Após a pesquisa, os trabalhos foram analisados através do título, resumo e palavras-chave. De forma manual, foram selecionadas e lidas as publicações que mais se aproximaram do tema deste trabalho.

Além disso, foram realizadas visitas a laboratórios de referência em impressão 3D no Brasil, como o Hub de Inovação da Construção (HubIC), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP) em parceria com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), no intuito de ver experiências exitosas e tipos de máquinas para impressão, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 - Visita realizada ao Laboratório HubIC da ABCP/USP



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Desenvolvida no Capítulo 2 deste trabalho, nessa etapa foram estudados os principais materiais utilizados, os parâmetros reológicos e no estado endurecido das massas de impressão 3D, os tipos de máquinas usadas, os testes laboratoriais necessários, os procedimentos e técnicas de mistura e impressão. Além disso, foram destacados os principais cuidados que se deve ter no momento da execução da impressão, levando em consideração o grande desafio que a impressão 3D apresenta neste aspecto.

3.2 Etapa 2 – Caracterização de materiais para a produção de massas de impressão 3D

Na segunda etapa de execução do projeto, com o domínio da tecnologia de impressão 3D, foi necessário o aprimoramento do uso de materiais e elementos construtivos. Os objetivos dessa etapa foram: estudo dos materiais para composição da matriz de impressão; caracterização da argamassa comercial e dos materiais locais utilizados para o desenvolvimento do projeto de mistura.

3.2.1 Caracterização da argamassa de projeção comercial

Devido à similaridade do preparo da mistura e bombeamento do material, acreditou-se, inicialmente, que a argamassa de projeção comercial se enquadrava como um ponto de partida para a dosagem da massa de impressão 3D com materiais locais. Portanto, foi realizada a caracterização mecânica e reológica de uma argamassa de projeção disponível atualmente no mercado, com o objetivo de verificar os parâmetros necessários para o desenvolvimento da argamassa para impressão 3D.

3.2.1.1 Caracterização reológica da argamassa de projeção comercial

Ao longo de toda esta pesquisa, as argamassas foram produzidas mediante a mistura no Reômetro *Pheso* do LMCC/UFC (Figura 19), permitindo a obtenção de informações reológicas ao longo de todo o processo de mistura. O equipamento trata-se de um reômetro móvel, composto por uma unidade motriz, na qual podem ser acopladas diferentes geometrias de ensaio. Foi desenvolvido na Poli-USP pelo professor Rafael Pileggi junto ao seu grupo de pesquisa do Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência (LME). O material a ser ensaiado é

colocado no recipiente e a geometria de ensaio pode ser posicionada a qualquer distância em relação ao fundo do recipiente. Com isso, ajusta-se uma rotação ao motor, que pode variar de 0 a 3000 rpm, e obtém-se a corrente elétrica necessária para manter o movimento. A partir da utilização desse reômetro rotacional foi possível controlar e garantir a homogeneidade das misturas.

Figura 19 - Reômetro *Pheso* do LMCC/UFC



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Através da calibração prévia já pré-definida pelos desenvolvedores, é possível correlacionar a corrente com o torque aplicado, tanto para concretos, quanto para argamassas. Todos os controles de posicionamento, rotação, visualização e armazenamento dos resultados são controlados por um software desenvolvido especificamente para o equipamento. Além disso, é possível programar os passos sequenciais de ensaio com rotações e posicionamentos distintos em cada um.

O *Pheso* tem uma geometria que necessita de aproximadamente 6 litros de volume de materiais. Durante o processo de mistura, o material foi submetido a aplicações de ciclos de torque, utilizando uma cuba metálica e uma geometria composta por 6 aletas duplas dispostas helicoidalmente com passo de 30 mm/45°, sendo o diâmetro das aletas de 16 mm, podendo ser

acoplada em duas posições distintas: central ou planetária. Neste trabalho, optou-se pela posição planetária para essa geometria, que além da rotação em torno do eixo ainda permite um movimento de translação ao redor do eixo central. Já o ensaio de fluxo foi realizado usando a geometria de palheta de 4 lâminas, denominada Vane, na posição central do reômetro. A geometria possui 7,5 cm de altura (h) e 12,5 cm de diâmetro. A Figura 20 mostra as geometrias utilizadas.

Figura 20 - Geometrias utilizadas no Reômetro Pheso do LMCC/UFC



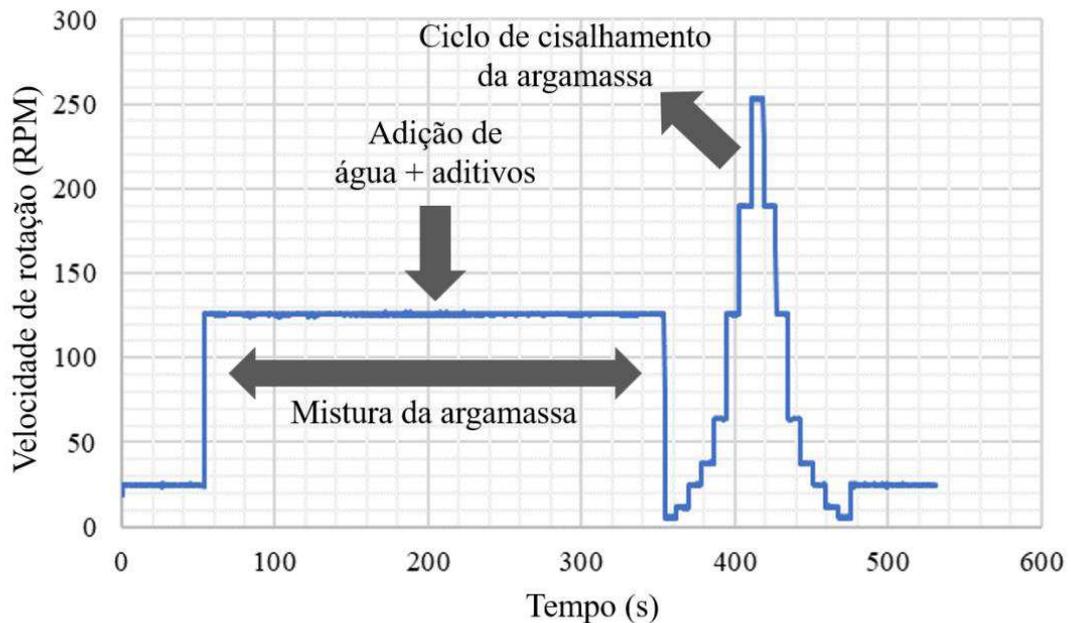
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Para a realização do ensaio, a configuração do equipamento para a mistura foi escolhida de modo que a rotação foi mantida constante, percebendo-se a mudança dos torques necessários para a mistura à medida que os materiais são adicionados e misturados na cuba. Com isso, os valores de torque puderam ser obtidos em cada etapa, assim como os torques máximos em pontos específicos. A sequência do processo de mistura (Figura 21) foi composta pelas seguintes etapas:

- 1) Adição do material seco (argamassa de projeção comercial) na cuba e posterior encaixe ao reômetro;
- 2) Posicionamento da geometria a 1 mm do fundo da cuba;
- 3) Homogeneização da argamassa por 1 minuto com uma velocidade de 25 RPM;

- 4) Adição total da água em um processo de mistura que durou 5 minutos a uma velocidade de 125 RPM;
- 5) Aplicação de ciclos de cisalhamento composto a partir da aceleração gradual de 6 RPM a 119 RPM, seguida pela desaceleração até 6 RPM, em 2 minutos;
- 6) Homogeneização da argamassa por 1 minuto com uma velocidade de 25 RPM.

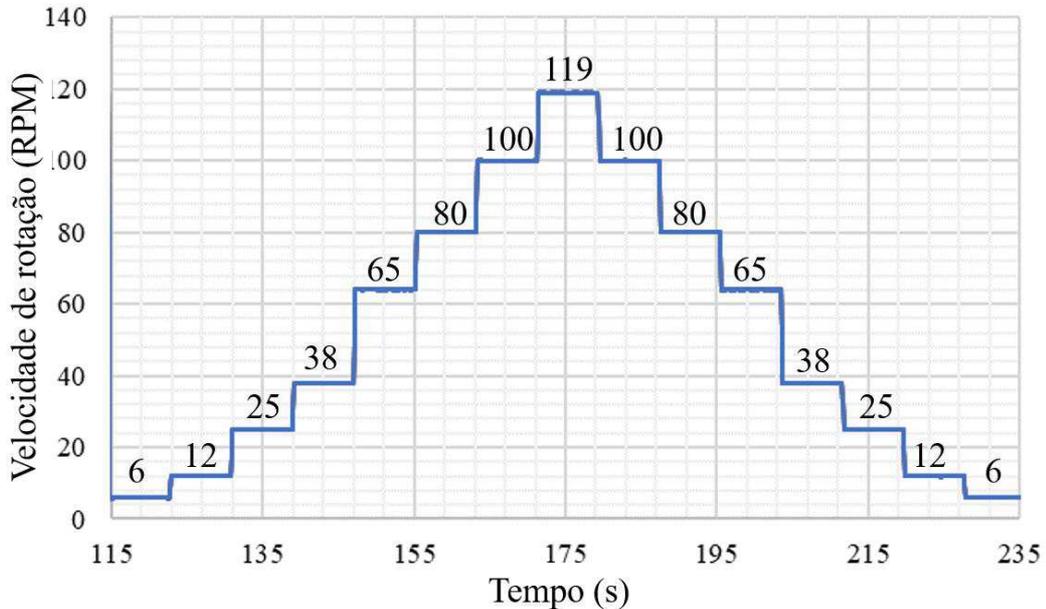
Figura 21 - Sequência do processo de mistura da argamassa de projeção comercial



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Na etapa do fluxo, a avaliação do torque em rotações variadas torna possível a análise do comportamento reológico da argamassa quando diferentes taxas de cisalhamento são aplicadas, desde baixas deformações até cisalhamentos intensos. Os ciclos de cisalhamento são caracterizados por um trecho de aceleração, com 8 patamares de 8 segundos cada um, seguido de um trecho de desaceleração, também com 8 patamares. Na Figura 22 é possível visualizar o perfil do ciclo de cisalhamento empregado para a argamassa.

Figura 22 - Perfil do ciclo de cisalhamento após a mistura no Reômetro Pheso do LMCC/UFC



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Com a conclusão do ensaio, foi possível obter os seguintes resultados principais: torque máximo de mistura, torque de escoamento, energia de mistura, viscosidade aparente, entre outros parâmetros que auxiliam na compreensão da reologia da argamassa. Esta análise permite correlacionar diversas situações do processo de mistura, tais como:

- Ensaio de abatimento: Este ensaio envolve a transição da argamassa de uma baixa taxa de cisalhamento (deformação devido ao seu próprio peso) para o repouso, podendo ser correlacionado com a tensão de cisalhamento em baixa taxa de cisalhamento para cada rampa.
- Viscosidade aparente em altas taxas de cisalhamento: Avaliar a viscosidade aparente (razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento) em altas taxas de cisalhamento é importante para situações de bombeamento ou mistura em misturadores de maior energia.
- Análise da área compreendida entre as rampas de aceleração e desaceleração: No gráfico "Rotação X Torque", essa área, análoga à taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento, pode ser correlacionada com a estabilidade da pasta, indicando a energia necessária para quebrar os aglomerados durante o ciclo. Segundo Pileggi (2001), os fenômenos de aglomeração e desaglomeração em pastas de cimento, junto com outros fatores, são responsáveis pelos comportamentos tixotrópicos ou

reopéxicos. Esta área é denominada “área de histerese”, onde áreas positivas indicam comportamentos tixotrópicos (desaglomeração mais rápida que a aglomeração ao longo do ciclo) e áreas negativas indicam comportamentos reopéxicos (aglomeração mais rápida que a desaglomeração ao longo do ciclo).

- Reajuste do modelo reológico de Bingham para cada rampa: Para cada rampa, o modelo reológico de Bingham foi ajustado aos dados experimentais, determinando os parâmetros correspondentes (BINGHAM, 1916). Este modelo é equivalente ao descrito pela Equação 1, mas utiliza rotação e torque em vez de taxa e tensão de cisalhamento (Equação 2).

Essas análises proporcionam uma visão detalhada e abrangente das propriedades reológicas da argamassa, essenciais para otimizar processos de mistura e aplicação.

$$T = T_0 + h_b R \text{ (Bingham)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

T : torque (N.m);

R : rotação (rpm);

T_0 : torque de escoamento (N.m);

h_b : constante equivalente à viscosidade plástica no modelo de Bingham (N.m/rpm);

Com a adoção do modelo de Bingham, as medições de torque e velocidade de rotação foram convertidas em valores de tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento para a geometria Vane com base nas Equações 3 e 4, respectivamente, propostas por HEIRMAN *et al.* (2008), em que o teste com a geometria Vane é assumido como um teste de cilindros concêntricos.

$$\tau = \frac{R^2 + r^2}{4\pi h R^2 r^2} T \quad \text{Equação 3}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} 2\pi N \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

R: raio da cuba (m);

r: raio da geometria Vane (m);

N: velocidade de rotação (rad/s);

T: torque aplicado (N.m);

h: altura da geometria Vane (m).

A partir das conversões realizadas, foi possível obter valores de tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento para cada etapa do teste de fluxo, permitindo a plotagem dos gráficos que validam a concordância do modelo de Bingham com os dados experimentais. O uso da equação do modelo de Bingham e o gráfico obtido permitem a determinação das propriedades reológicas da tensão de escoamento dinâmica (τ_0) e viscosidade plástica (μ_p). Já a propriedade de tensão de escoamento estático (τ_s) foi calculada a partir da determinação do valor máximo de torque (T_{max}) medido no teste usando a Equação 5, proposta por HEIRMAN *et al.* (2008).

$$\tau_s = \frac{T_{max}}{2\pi r^2 h}$$

Equação 5

Onde:

r: raio da geometria Vane (m);

T_{max} : torque máximo obtido no ensaio (N.m);

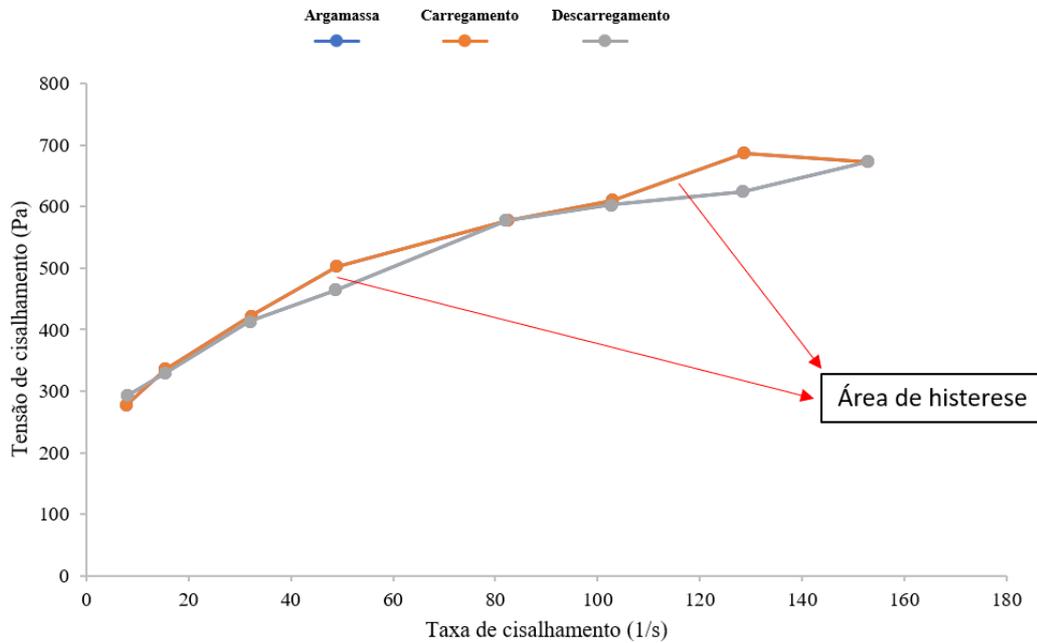
h: altura da geometria Vane (m).

Com isso, as propriedades reológicas foram comparadas com os valores-limite expostos por trabalhos de pesquisa anteriores (Tabela 9), com a finalidade de verificar o potencial do uso do material na impressão 3D.

Após a realização do teste de fluxo no reômetro rotacional, foi possível analisar o gráfico das curvas de tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento para determinar a existência de comportamento tixotrópico ou antitixotrópico, conhecido como reopexia, para a argamassa. Esses tipos de comportamento são identificados pela determinação das áreas de histerese das curvas, o que é possível pela diferença de comportamento entre a seção de carga e a de descarga, conforme mostrado na Figura 23. Se a viscosidade do material diminuir com o

tempo de cisalhamento, o comportamento tixotrópico é identificado. Por outro lado, se houver um aumento, identifica-se um comportamento reopéxico.

Figura 23 - Área de histerese do gráfico Tensão de cisalhamento vs. Taxa de cisalhamento



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

A análise da área de histerese pode ser correlacionada com a estabilidade da argamassa, expressando a energia necessária para romper os aglomerados durante o ciclo. De acordo com Pileggi (2001), os fenômenos de aglomeração e desaglomeração nas pastas de cimento, juntamente com outros fatores, são responsáveis pelo comportamento tixotrópico ou reopéxico. As áreas positivas se referem ao comportamento tixotrópico (quando, ao longo do ciclo, a desaglomeração é mais rápida do que a aglomeração) e as áreas negativas se referem ao comportamento reopexia (quando a aglomeração, ao longo do ciclo, é mais rápida do que a desaglomeração).

3.2.1.2 Caracterização mecânica da argamassa de projeção comercial

Com o material misturado no Reômetro *Pheso*, procedeu-se para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos. Para os cilíndricos, houve a colocação da argamassa na fôrma em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, com cada camada recebendo 30 golpes uniformes e homoganeamente distribuídos com o soquete normal. Terminado o

período inicial de cura, os corpos de prova foram retirados das fôrmas, identificados e imersos no tanque de cura com água, onde permaneceram até as idades de ruptura, que foram definidas em 7 e 28 dias, conforme a Figura 24.

Figura 24 - Tanque de cura e corpos de prova cilíndricos



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Para os corpos de prova prismáticos, inicialmente, com o molde fixo à mesa de adensamento, foi introduzida diretamente, em cada compartimento do molde, uma porção de argamassa. Com o auxílio do lado maior do nivelador de camadas, realizou-se o espalhamento da argamassa em cada compartimento, formando uma camada uniforme. Em seguida, foram aplicadas 30 quedas através da mesa de adensamento. De forma similar, foi introduzida a segunda camada de argamassa em cada compartimento do molde. Após a moldagem, os corpos-de-prova permaneceram por 48 h nos moldes para, finalmente, serem desmoldados e mantidos no laboratório com temperatura de 23 °C (Figura 25).

Figura 25 - Moldagem de corpos de prova prismáticos



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Para a caracterização mecânica, foi realizado o ensaio de resistência à compressão, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019), com os corpos de prova cilíndricos, com o objetivo de

determinar a capacidade de resistência da argamassa de projeção comercial a forças de compressão (Figura 26).

Figura 26 - Ensaio de resistência à compressão de corpo de prova cilíndrico



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Foi realizado também o ensaio de resistência à tração na flexão, de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2018), com os corpos de prova prismáticos, para verificar a capacidade máxima de carga que o material suportará até a falha quando submetido a esforços de tração (Figura 27).

Figura 27 - Ensaio de resistência à tração na flexão de argamassa de projeção comercial



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

3.2.2 Caracterização dos materiais locais

Os materiais empregados na elaboração dos compósitos para impressão 3D consistiram em: cimento Portland (CP) CP V de alta resistência inicial, produzido e vendido na região; areia lavada de rio (AREIA) como agregado, proveniente da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF); como aditivos, foram utilizados o modificador de viscosidade antissegregante (VMA) Centrament VMA MC e o superplastificante MC Powerflow 3700. A Tabela 10 mostra os ensaios de caracterização realizados para análise das propriedades físicas dos materiais, de acordo com suas normas correspondentes.

Tabela 10 - Ensaios de caracterização dos materiais utilizados

Material	Ensaio de caracterização	Norma técnica
Cimento Portland CP V - ARI	Granulometria a laser	ISO 13320 (2020)
	Massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Agregado miúdo	Granulometria	NBR 17054 (ABNT, 2022)
	Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)
	Absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021)
	Massa unitária e Índice de vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021)
	Teor de finos	NBR 16973 (ABNT, 2021)

Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

3.2.2.1 Cimento

Inicialmente, o cimento Portland (CP) CP V-ARI foi submetido ao ensaio de granulometria a laser, conforme as recomendações da ISO 13320 (2020), para verificação da distribuição do tamanho das suas partículas. O ensaio consiste em um procedimento de alto padrão tecnológico, utilizado por laboratórios especializados em análise granulométrica, para determinar os tamanhos de partículas de materiais a granel de diversos tamanhos, podendo medir centenas de nanômetros a milímetros. Uma amostra de 50 g do material foi utilizada. O ensaio foi realizado no laboratório da empresa Carbomil Química S/A através do analisador de partículas modelo CILAS 1090, com modo de dispersão líquido e obtenção de 100 classes de faixas granulométricas analíticas, dispostas entre 0,04 μm a 500 μm .

Em seguida, foi determinada a sua massa específica através da NBR 16605 (ABNT, 2017), que utiliza o frasco volumétrico de *Le Chatelier*. A Figura 28 mostra a realização do ensaio e a Tabela 11 exhibe os resultados dos ensaios de caracterização do cimento utilizado.

Figura 28 - Ensaio de massa específica do cimento CP V-ARI



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de caracterização do Cimento Portland CP V-ARI

Propriedade	Valor
Diâmetro médio da partícula (μm)	18,84
D10 (μm)	4,04
D50 (μm)	12,46
D98 (μm)	70,87
Massa específica (g/cm^3)	3,16

Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

3.2.2.2 Agregado miúdo

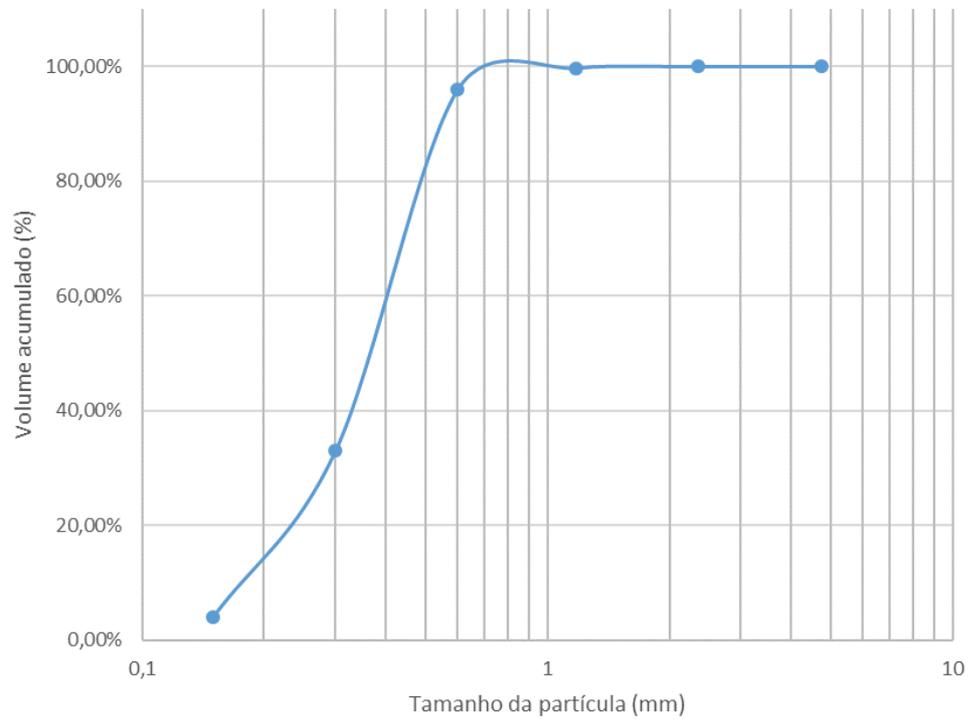
O agregado natural foi adquirido como areia média para a utilização na argamassa de impressão 3D, sendo utilizada a fração passante na peneira 1,18 mm. Inicialmente, o mesmo foi submetido ao ensaio de granulometria conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022). Foram separadas 2 amostras de 500 g da areia, ilustradas na Figura 29. A curva granulométrica foi mostrada na Figura 30.

Figura 29 - Amostras e peneiras utilizadas



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Figura 30 - Curva granulométrica da areia utilizada



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

A areia foi submetida aos ensaios de massa específica e absorção de água, mostrados nas Figuras 31 e 32, conforme os procedimentos da NBR 16916 (ABNT, 2021).

Figura 31 - Amostras submersas e molde utilizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Figura 32 - Amostra no frasco submetida ao banho



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Para a determinação da massa unitária e volume de vazios do agregado, de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021), utilizou-se o método A descrito pela norma, empregado para determinar a massa unitária de material compactado, quando os agregados tiverem dimensão máxima característica de 37,5 mm ou menor. A Figura 33 ilustra o recipiente utilizado.

Figura 33 - Recipiente utilizado no ensaio de massa unitária e volume de vazios



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

O ensaio de teor de finos, obtido através de determinação do material fino que passa na peneira 75 μm por lavagem, seguindo os procedimentos da NBR 16973 (ABNT, 2021), foi mostrado nas Figuras 34 e 35.

Figura 34 - Amostras separadas e peneira de 75 μm utilizada



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Figura 35 - Comparação da limpidez entre as lavagens



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Por fim, com os ensaios realizados, procedeu-se com o preenchimento da Tabela 12 com os devidos resultados.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de caracterização da areia

Propriedade	Valor
Diâmetro máximo (mm)	0,60
D10 (mm)	0,18
D50 (mm)	0,38
D90 (mm)	0,57
Módulo de finura	1,67
Massa específica (g/cm ³)	2,62
Absorção de água por imersão (%)	1,01
Massa unitária (Kg/m ³)	1475,00
Índice de vazios (%)	40,82
Teor de finos (%)	2,20

Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

3.3 Etapa 3 – Dosagem e testes de projetos de misturas para impressão 3D

3.3.1 Dosagem do projeto de mistura

Com base nos projetos de mistura já realizados, estudados a partir do levantamento bibliográfico, buscou-se definir uma mistura de referência para servir como base ao planejamento dos testes. Como relatado na revisão bibliográfica, altos teores de finos e altas relações entre agregados e ligantes favorecem a extrudabilidade e a coesão de materiais à base de cimento.

Buscando analisar os projetos de misturas desenvolvidos por DIAS (2022), optou-se por reproduzir corpos-de-prova com as mesmas dosagens, porém utilizando os materiais da RMF. Conforme a maioria dos autores estudados, o traço inicial partiu da proporção 1:1. Em seguida, visando a redução do consumo de cimento, a quantidade da proporção de agregado foi aumentada a cada 0,5 até chegar na relação 1:3 (cimento:agregado). Por sua vez, a quantidade de aditivos (superplastificante SP e modificador de viscosidade HPMC) e a relação água/materiais secos (A/Ms) foram mantidas constantes, conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 13 - Composições adotadas de acordo com DIAS (2022)

Mistura		Cimento (Kg/m ³)	Areia (Kg/m ³)	Água (Kg/m ³)	SP (%)	HPMC (%)	A/Ms (%)	a/c (Kg/Kg)
M1	1:1,0	1085,5	1085,5	234,5	0,89	0,15	10,8	0,22
M2	1:1,5	859,2	1288,8	232,0	0,89	0,15	10,8	0,27
M3	1:2,0	710,4	1420,9	230,9	0,89	0,15	10,8	0,33
M4	1:2,5	606,3	1515,8	229,2	0,89	0,15	10,8	0,38
M5	1:3,0	528,6	1585,7	228,3	0,89	0,15	10,8	0,43

Fonte: Elaborada pelo autor (2023) a partir do estudo de DIAS (2022)

Após essa etapa, foi utilizado o método de dosagem proposto pela ACI (*American Concrete Institute*) na tentativa de definir uma dosagem que obtivesse melhor desempenho para a impressão. A diferença esteve na ausência de agregados graúdo para esse tipo de material. Todas as quantidades foram determinadas por massa.

Inicialmente, o tamanho máximo da partícula de areia foi utilizado para determinar a quantidade de água e a porcentagem do teor de ar incorporado. Sabe-se que a quantidade de água é reduzida de acordo com a utilização do aditivo superplastificante (SP). Em seguida, a partir do gráfico da Lei de Abrams, a relação água/cimento foi determinada de acordo com a resistência desejada. Com isso, a quantidade de cimento foi obtida através da quantidade de água e da relação a/c. Por fim, foi determinada a quantidade de areia necessária, juntamente com água e cimento, considerando o teor de ar incorporado, para completar um volume teórico total de um 1 metro cúbico. O procedimento foi realizado considerando as massas específicas de cada material. Por sua vez, as quantidades de aditivos químicos foram determinadas como uma porcentagem em relação a massa de cimento.

É importante ressaltar que as dosagens foram obtidas de forma subsequente, ou seja, após a análise do desempenho de cada projeto de mistura até que se obtivesse uma dosagem

considerada apropriada para utilização na impressão 3D. Os mesmos são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Projetos de mistura obtidos a partir do método de dosagem ACI

Mistura		Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	SP (%)	VMA (%)	A/Ms (%)	a/c (kg/kg)
T1	1:1,70	702,87	1193,01	263,88	0,89	0,15	13,92	0,38
T2	1:2,25	624,77	1256,17	264,45	0,89	0,15	14,06	0,42
T3	1:3,00	540,67	1324,18	281,15	0,89	0,15	15,08	0,52
T4	1:3,60	418,07	1500,80	250,84	1,50	0,15	13,07	0,60
T5	1:3,00	481,43	1450,85	250,34	2,00	0,15	12,96	0,52
T6	1:3,60	418,07	1500,80	250,84	2,00	0,30	13,07	0,60
T7	1:3,00	481,43	1448,75	264,79	2,00	0,15	13,72	0,55
T8	1:3,00	481,43	1448,75	264,79	2,00	0,15	13,72	0,55
T9	1:3,00	481,43	1448,75	264,79	1,50	0,15	13,72	0,55
T10	1:3,00	481,43	1448,75	264,79	1,00	0,15	13,72	0,55

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Analisando a tabela, é possível verificar que a mistura T1 definida inicialmente teve um consumo de cimento igual a 702,87 Kg/m³. Com isso, buscou-se, para as demais, reduzir seu consumo, visando contribuir para a produção de materiais com índices de consumo mais sustentáveis. T4 e T5 foram as primeiras misturas que tiveram os menores consumos de cimento, iguais a 418,07 Kg/m³ e 481,43 Kg/m³, respectivamente, servindo de referência às demais. Com isso, as misturas T6 a T10 foram realizadas com base na análise dos testes realizados nas argamassas T4 e T5, no qual buscou-se variar apenas as proporções de aditivos até que se obtivesse uma mistura com potencial para impressão 3D.

Os testes preliminares nas misturas da Tabela 14 foram realizados no LMCC/UFC e, com base nos resultados, a argamassa T10 foi selecionada para os ensaios definitivos de impressão no HubIC (ABCP/USP). Em seguida, após os testes de impressão, foram dosadas mais 2 misturas, de acordo com a impressora 3D utilizada. Os mesmos são mostrados na Tabela 15 a seguir.

Tabela 15 - Projetos de mistura obtidos após os testes de impressão no HubIC

Mistura		Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	SP (%)	VMA (%)	A/Ms (%)	a/c (kg/kg)	Tipo de impressora
TDP	1:3,00	481,43	1448,75	231,08	1,00	0,15	11,97	0,48	Pórtico
TDBR	1:3,00	481,43	1448,75	264,79	1,00	0,45	13,72	0,55	Braço robótico

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

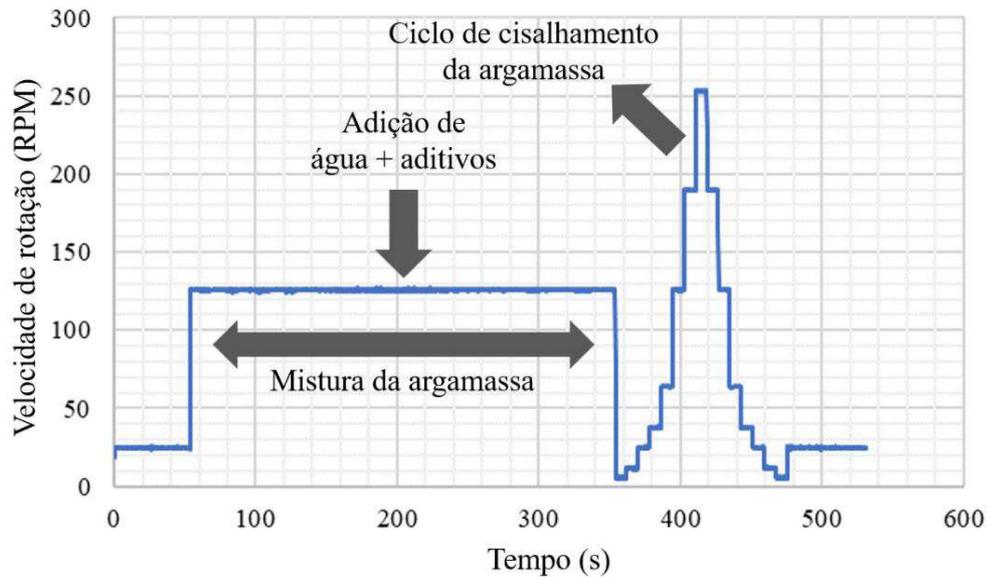
É possível verificar que o tipo de impressora faz com que a mistura seja alterada. Enquanto a impressora do tipo pórtico necessitou de uma mistura, chamada neste trabalho de TDP (tentativa definitiva – pórtico), com menor quantidade de água, a do tipo braço robótico, chamada neste trabalho de TDBR (tentativa definitiva – braço robótico), necessitou da mesma quantidade da argamassa T10, selecionada previamente aos testes de impressão, variando apenas a quantidade de VMA. Destaca-se que todos os procedimentos realizados serão explicados nos próximos itens deste trabalho.

3.3.1.1 Sistema de mistura das argamassas dosadas

De forma similar a argamassa de projeção comercial, o processo de mistura das argamassas dosadas com materiais da RMF foi realizado através do Reômetro *Pheso* do LMCC/UFC (Figura 19). Os materiais foram colocados no recipiente e a geometria denominada *Attritor* (Figura 20) foi posicionada na posição planetária, permitindo uma mistura mais precisa e garantindo a homogeneidade das misturas. A sequência do processo de mistura (Figura 36) foi composta pelas seguintes etapas:

- 1) Adição do material seco (cimento, areia e VMA) na cuba e posterior encaixe ao reômetro;
- 2) Posicionamento da geometria a 1 mm do fundo da cuba;
- 3) Homogeneização da argamassa por 1 minuto com uma velocidade de 25 RPM;
- 4) Adição total da água em um processo de mistura que durou 5 minutos a uma velocidade de 125 RPM;
- 5) Aplicação de ciclos de cisalhamento composto a partir da aceleração gradual de 6 RPM a 119 RPM, seguida pela desaceleração até 6 RPM, em 2 minutos.
- 6) Homogeneização da argamassa por 1 minuto com uma velocidade de 25 RPM;

Figura 36 - Sequência do processo de mistura das argamassas dosadas com materiais da RMF



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

3.3.2 Testes das argamassas dosadas

Para conceber o desenvolvimento de processos viáveis para a construção civil utilizando a tecnologia de impressão 3D, foi necessária a realização de testes laboratoriais, para a verificação do desempenho dos projetos de mistura formulados. A análise do comportamento reológico, o teste de fluidez, o ensaio de densidade e teor de ar incorporado, o teste manual com pistola de extrusão e a caracterização mecânica das argamassas, que serão explicados a seguir, foram realizados com o objetivo de determinar uma dosagem que atendessem aos parâmetros da literatura e da argamassa de projeção comercial e, dessa forma, fosse destinada a utilização nas impressoras 3D do HubIC (ABCP/USP).

3.3.2.1 Comportamento reológico das argamassas dosadas

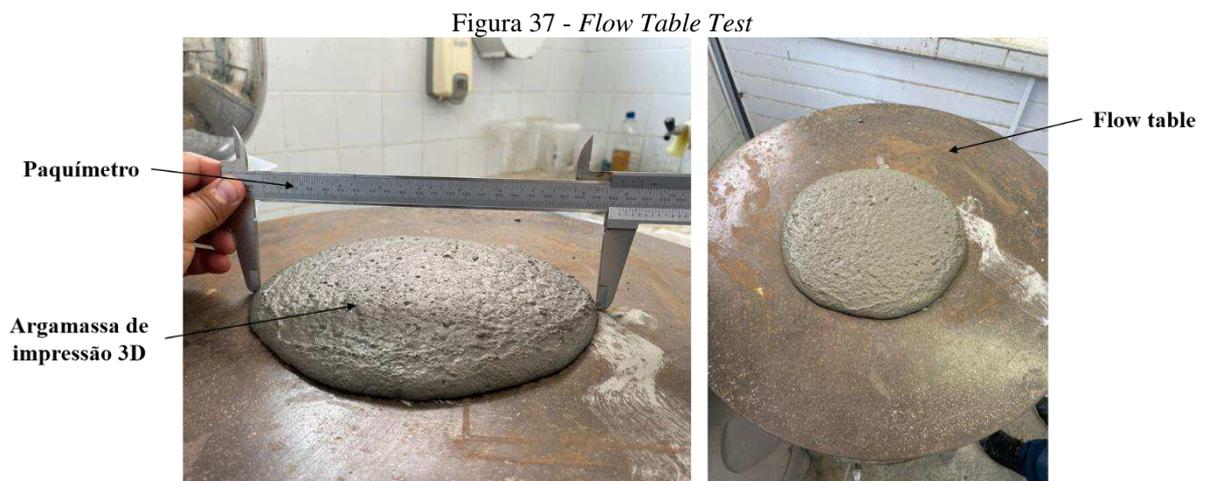
De forma análoga ao procedimento realizado com a argamassa de projeção comercial, após a mistura no reômetro *Pheso*, as argamassas dosadas foram submetidas ao ensaio de fluxo, com o objetivo de extrair os parâmetros reológicos de tensão de cisalhamento, tensão de escoamento dinâmica, tensão de escoamento estática e viscosidade plástica e, dessa forma, tornar possível a comparação com os dados da literatura (Tabela 9) e da argamassa de projeção comercial.

Portanto, o ensaio foi realizado utilizando a geometria denominada *Vane* no reômetro (Figura 20) e os procedimentos foram os mesmos explicados no item 3.2.1.1 deste trabalho. É importante destacar que, aplicando as diferentes taxas de cisalhamento no material, ao final do ensaio é possível avaliar todo seu comportamento durante o teste e, com isso, extrair os parâmetros reológicos desejados.

3.3.2.2 Teste de fluidez

Para verificar a capacidade de construção das argamassas, foi realizado o ensaio de espalhamento obtido no aparato *Flow Table*, conforme os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2016), para a determinação do índice de consistência do material. De acordo com Lu *et al.*, 2019, o *Flow Table Test* é um método frequentemente usado para avaliar intuitivamente a trabalhabilidade de materiais cimentícios imprimíveis em 3D por extrusão, que pode ser caracterizado pelo diâmetro do fluxo.

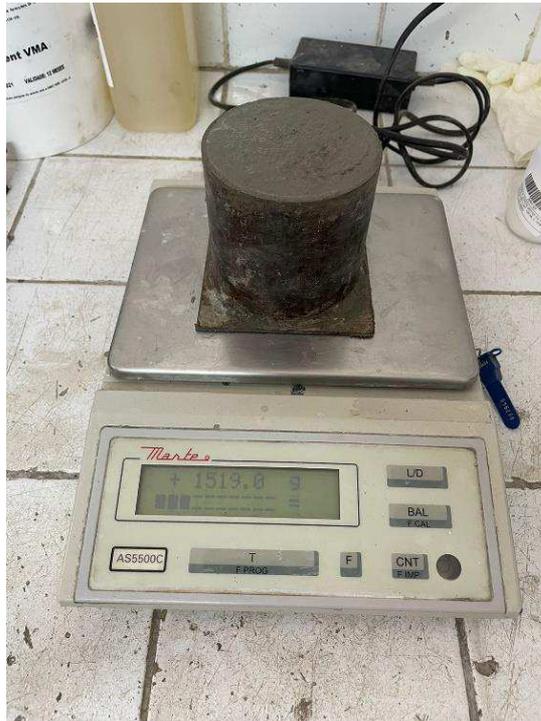
Além disso, MA *et al.*, 2018 e WENG *et al.*, 2018 citam que esse teste é preferível em laboratórios e em campo principalmente devido à sua simplicidade e resultados imediatos e vem sendo amplamente usado na caracterização reológica dos materiais 3DCP. TAY; QIAN; TAN, 2019 revelam que este método simples e padronizado vem sendo utilizado para determinar a capacidade de impressão das misturas antes da impressão 3D (Figura 37).



3.3.2.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A medição da densidade de massa e teor de ar incorporado no estado fresco foi realizada de acordo com os procedimentos da NBR 13278 (ABNT, 2005). Após o preparo da argamassa, a mistura foi introduzida em um recipiente rígido, conforme ilustra a Figura 38, com 3 camadas de alturas aproximadas, sendo aplicados 20 golpes em cada camada com a espátula na posição vertical. Foram efetuadas três quedas do recipiente com altura aproximada de 3 cm, com o objetivo de evitar a presença de vazios entre a argamassa e a parede do recipiente. Em seguida, rasou-se a mistura e eliminou-se qualquer vestígio de resíduo, para, então, ser registrada a massa do molde com o compósito fresco. Finalmente, procedeu-se com os cálculos conforme especificado na norma.

Figura 38 - Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

3.3.2.4 Teste manual com pistola de extrusão de argamassa

Em seguida, as argamassas foram submetidas ao teste manual com uma pistola de extrusão de argamassa com o objetivo de verificar a extrudabilidade do material, pois acreditou-se que o processo configuraria um ponto de partida para o teste em uma máquina de impressão 3D. A pistola utilizada é ilustrada na Figura 39.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

O objeto conta com quatro tipos de bocais de diferentes tamanhos. Os mais utilizados neste trabalho foram o retangular de 61 mm e os circulares de 16 mm e 24 mm, que se assemelharam aos bocais da máquina de impressão 3D utilizada posteriormente. A condição almejada era que a mistura dosada fosse capaz de ser extrudada por todos os bocais da pistola. É importante destacar que esse teste foi realizado apenas com as misturas T5 em diante, uma vez que o objetivo das primeiras dosagens foi concentrado em reduzir o consumo de cimento.

3.3.2.5 Caracterização mecânica das argamassas dosadas

Para a caracterização mecânica das argamassas dosadas, foram realizados os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, de forma similar ao realizado com a argamassa de projeção comercial.

O ensaio de resistência à tração na flexão, mostrado na Figura 40, seguiu os procedimentos da NBR 13279 (ABNT, 2005). Inicialmente, foram moldados 6 corpos-de-prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) para a realização do ensaio nas idades de 7 e 28 dias.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Em seguida, ainda de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), procedeu-se para a realização do ensaio de resistência à compressão. Para isso, para cada mistura dosada, utilizou-se as metades resultantes do rompimento dos seis corpos-de-prova do ensaio de flexão para a determinação da resistência à compressão (Figura 41), totalizando doze corpos-de-prova para as mesmas idades (7 e 28 dias).

Figura 41 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

3.4 Etapa 4 – Desenvolvimento de protótipos

Após os testes iniciais no LMCC/UFC, foi necessária a ida ao laboratório do HubIC (ABCP/USP) para o desenvolvimento dos protótipos. De acordo com a definição da matriz de impressão, foram construídos os protótipos, que simularam a execução de uma parede em “L” de 1,50 m de comprimento por 1,00 m de largura e 0,20 m de altura. Além dela, foram impressos seis blocos de concreto com dimensões de 15x30x20cm para avaliação da resistência à compressão do produto desenvolvido.

3.4.1 Sistema de impressão

Os ensaios foram realizados em duas impressoras com tipologia do sistema de impressão de um componente (1K), de acordo com a definição estabelecida por WANGLER *et al.* (2022). Os primeiros testes de impressão foram realizados com auxílio da impressora tipo pórtico do HubIC (ABCP/USP), pois acreditou-se inicialmente que a argamassa selecionada, quando ajustada a sua dosagem para esse tipo de máquina, tornaria mais fácil a utilização, em seguida, na impressora do tipo braço robótico.

A impressora 3D do tipo pórtico é da empresa *4Constru*, tinha área de impressão de 70 cm x 70 cm por 30 cm de altura, um bico de 20 mm e o movimento dos eixos era realizado nas 3 direções, além de ser composto de um software de impressão que depositava o material, neste trabalho, a taxas de velocidade de 6.000 mm/min a 10.000 mm/min. A Figura 42 ilustra a máquina.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Por sua vez, a impressora do tipo braço robótico é da empresa 3DPotter e o modelo é denominado Scara Elite v2, sendo projetado para funcionar com um sistema de bombeamento. Além disso, a máquina é acoplada a um sistema de extrusão de mangueira contínua de alta pressão e grande capacidade, que pode fornecer cargas de material entre 40 e 115 Kg de extrusão contínua.

A Scara Elite, mostrada na Figura 43, é capaz de atingir velocidades extremas, porém a velocidade é relativa, dependendo de fatores como: tamanho do bico, altura da camada e obtenção de uma boa adesão na camada intermediária. Mesmo com uma velocidade de impressão rápida, a impressora mantém baixo ruído. Sua área de impressão possui 360 graus e o braço robótico é capaz de imprimir dentro de uma área circular limite de até 2 metros. Isso significa que é possível criar um recipiente enorme com a impressora, abrindo possibilidade de imprimir pequenas estruturas de uma casa, por exemplo.

Figura 43 - Impressora 3D do tipo braço robótico



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

A mistura do material foi realizada através de um misturador automático composto por um motor de 3 Cv de potência com capacidade para 160 Kg de argamassa. Por sua vez, para bombear o material, foi utilizada uma máquina com capacidade para 120 Kg e um motor de 7,5 Cv de potência acoplado a um inversor de frequência que levava o material por uma mangueira de 32 mm de diâmetro até a cabeça de impressão, conforme ilustra a Figura 44.

Figura 44 - Conjunto misturador-bomba



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

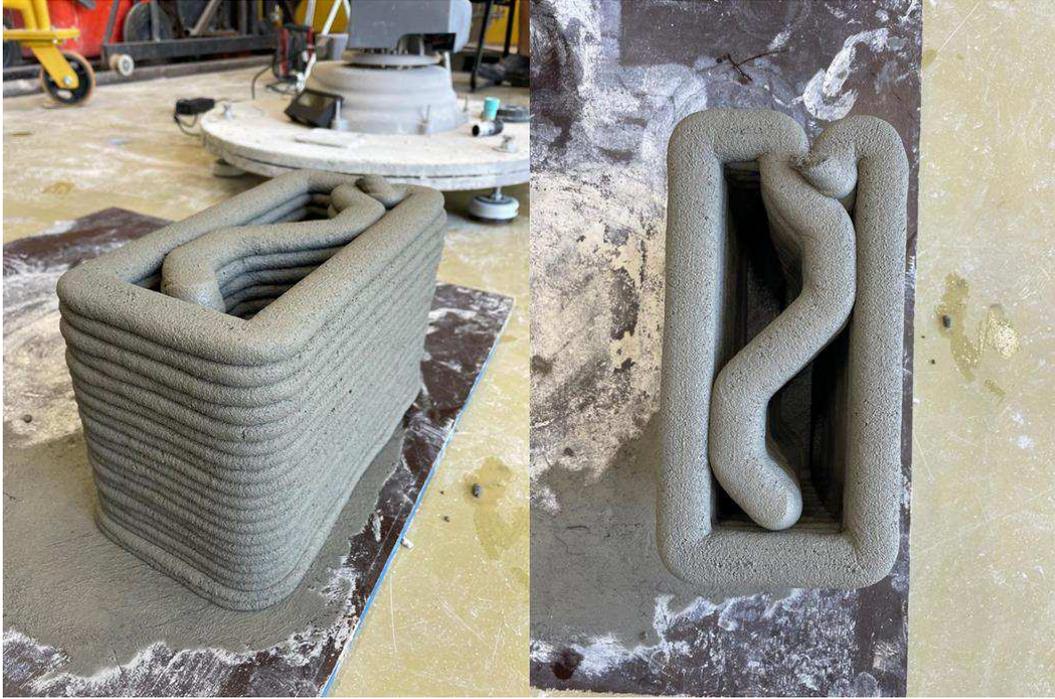
Uma diferença relevante entre ambas as impressoras que deve ser destacada é processo de extrusão da massa. Enquanto a impressora do tipo pórtico apresenta um sistema que extruda o material a partir do seu esmagamento no cabeçote extrusor, a impressora do tipo braço robótico realiza a extrusão do material a partir do bombeamento e velocidade de impressão. Com isso, ressalta-se a importância da adequação da argamassa ao tipo de sistema de impressão e ao kit de equipamento utilizado, já que cada um apresenta suas particularidades.

Neste trabalho, a mistura definitiva foi obtida levando em consideração sua adequação ao sistema de mistura, bombeamento e extrusão da impressora do tipo braço robótico do HubIC (ABCP/USP). Com isso, a rota do material foi definida através da: separação dos materiais; mistura dos mesmos através do misturador automático; bombeamento e transporte através da mangueira (Figura 44); e extrusão da massa pelo bico extrusor (Figura 43). É importante destacar que, caso esta dosagem seja utilizada em outro sistema, deve-se realizar os devidos ajustes visando a sua readequação.

3.4.2 Caracterização mecânica

Para a caracterização mecânica dos protótipos, foram desenvolvidas, através da impressora 3D Scara Elite, seis amostras de blocos de concreto de dimensões 15 x 30 cm e 20 cm de altura com o objetivo de analisar a resistência à compressão na idade de 28 dias, de acordo com os procedimentos da NBR 6136 (ABNT, 2016) e NBR 12118 (ABNT, 2013), normas que tratam dos blocos de concreto para alvenaria e métodos de ensaio, respectivamente. Os mesmos são mostrados na Figura 45.

Figura 45 - Blocos de concreto impressos em 3D



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

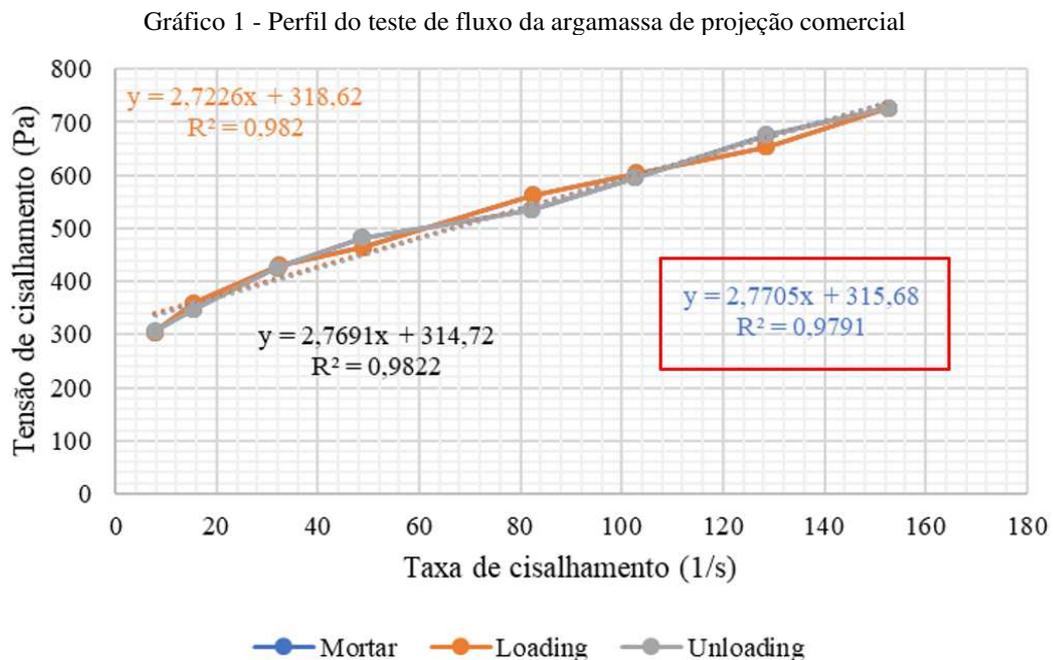
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os principais resultados encontrados, assim como as suas correlações e discussão com dados previamente estudados na literatura.

4.1. Comportamento reológico das argamassas

Inicialmente, foi necessário determinar os parâmetros reológicos da argamassa de projeção comercial que, junto com os dados analisados na literatura, mostrados na Tabela 9, foram utilizados como base para a comparação dos resultados obtidos com as argamassas dosadas.

O Gráfico 1 mostra o perfil do teste de fluxo usando a geometria Vane no reômetro rotacional. Para determinar os parâmetros reológicos usando o modelo de Bingham, foi considerado o estágio rotulado como "Mortar" no gráfico, caracterizado pela linha pontilhada azul. As propriedades reológicas foram obtidas ajustando-se os dados ao modelo de Bingham, e a equação linear que descreve o modelo está destacada no gráfico.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

A interceptação calculada com o eixo y é considerada a tensão de escoamento dinâmica, enquanto o coeficiente angular da linha representa a viscosidade plástica do modelo. Embora a geometria do Vane seja caracterizada por ter uma boa aproximação do teste de

cilindro concêntrico em baixas velocidades de rotação (HEIRMAN et al., 2008), os modelos propostos descreveram com precisão as velocidades testadas nesta pesquisa. Os resultados dos principais parâmetros reológicos são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros reológicos da argamassa de projeção comercial

Mistura	Tensão de cisalhamento (Pa)	Tensão de escoamento dinâmica (Pa)	Tensão de escoamento estática (Pa)	Viscosidade Plástica (Pa.s)
Argamassa de projeção comercial	303,78 a 726,73	315,68	1098,75	2,77

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Comparando os resultados da argamassa de projeção comercial com os dados obtidos na literatura é possível observar que a tensão de cisalhamento se encontra dentro dos limites descritos por LE *et al.* (2012), a tensão de escoamento dinâmica está dentro dos limites estabelecidos por XU *et al.* (2021). Por sua vez, em relação a tensão de escoamento estático, verificou-se que o resultado foi levemente inferior ao descrito por LIU *et al.* (2021). No entanto, o valor obtido para a viscosidade plástica ficou dentro dos limites estabelecidos pelo mesmo autor.

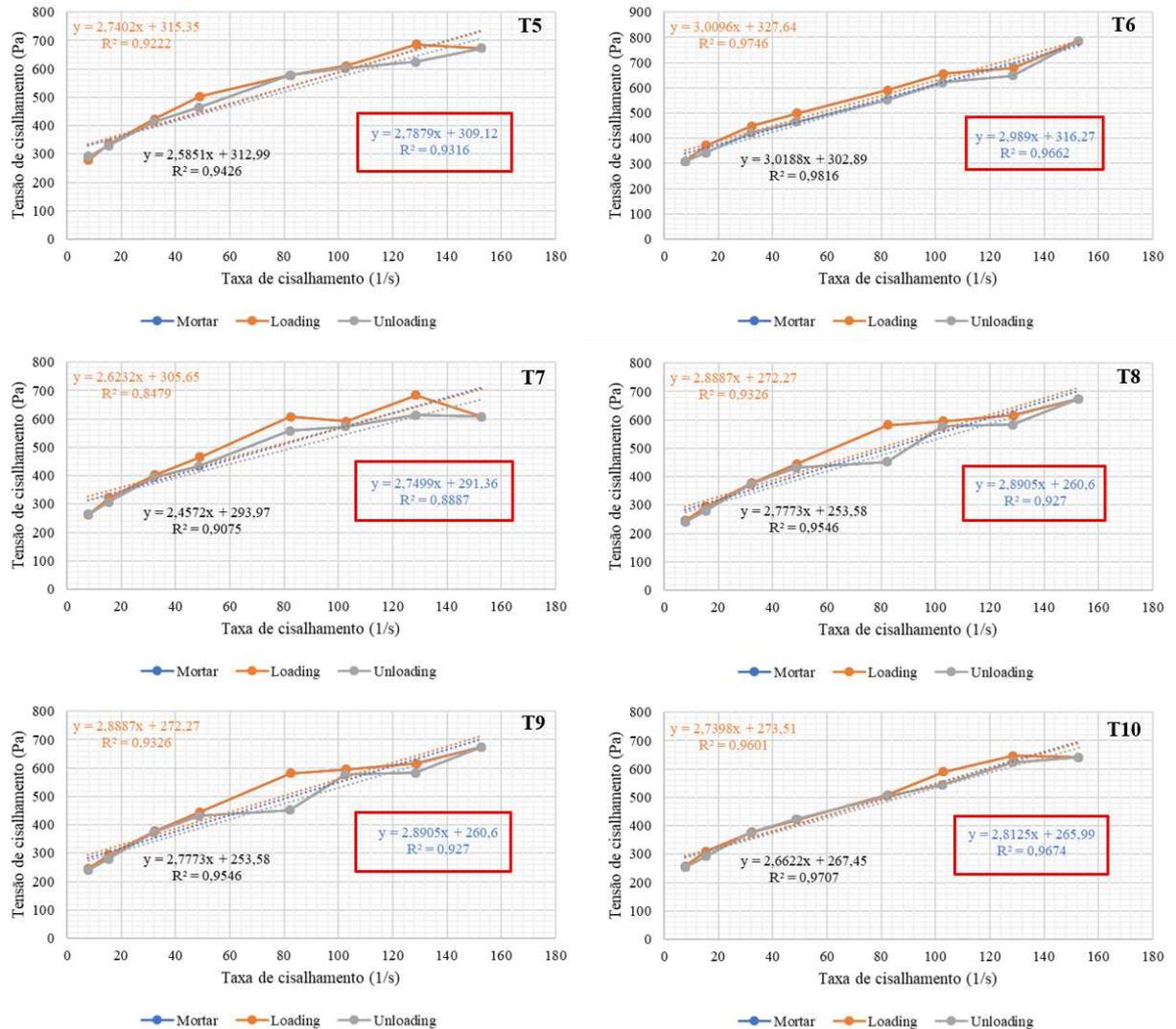
O Gráfico 1 também mostra que a área de histerese, ou seja, a área entre as rampas de carregamento (linha laranja) e descarregamento (linha cinza) no gráfico "Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento", é positiva, indicando o comportamento tixotrópico da argamassa de projeção comercial. Isso significa que a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento no estágio de carregamento é maior do que no estágio de descarregamento, resultando em uma diferença positiva entre os dois estágios.

O resultado vai de encontro ao estabelecido por ZOU et al. (2021) no item 2.4 deste trabalho, no qual afirmaram que a argamassa precisa ter um bom comportamento tixotrópico para se adaptar ao intervalo de tempo entre o assentamento das camadas. Portanto, a análise da área de histerese do material também é um fator importante que serve como parâmetro para afirmar a possibilidade de seu uso na impressão 3D. Levando em consideração os resultados obtidos, foi possível atestar que a argamassa de projeção comercial atendeu às expectativas e pode ser utilizada como parâmetro reológico de comparação com as argamassas dosadas para impressão 3D.

Após a análise do comportamento reológico da argamassa de projeção comercial, realizou-se o mesmo procedimento para as argamassas dosadas. É importante destacar que

como o objetivo das argamassas T1 a T4 foi reduzir o consumo de cimento, essa análise foi realizada somente para as argamassas T5 a T10 e a argamassa definitiva TDBR. A Figura 46 mostra os perfis do teste de fluxo usando a geometria Vane no reômetro rotacional.

Figura 46 - Perfis do teste de fluxo das argamassas dosadas



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

De forma análoga ao resultado da argamassa de projeção comercial, é possível visualizar na figura que, através das áreas de histereses, as argamassas T5 a T10 também obtiveram comportamento tixotrópico, enquadrando-se ao estabelecido por ZOU et al. (2021). Os resultados dos parâmetros reológicos são mostrados na Tabela 17 a seguir.

Tabela 17 - Parâmetros reológicos das argamassas dosadas

Autor / Mistura		Tensão de cisalhamento (Pa)	Tensão de escoamento dinâmica (Pa)	Tensão de escoamento estática (Pa)	Viscosidade Plástica (Pa.s)
Parâmetros de referência	Le et al. (2012)	300 a 900	-	-	-
	LIU et al. (2021)	-	66,4 a 230,1	1113 a 1658	2,08 a 3,71
	XU et al. (2021)	-	250 a 480	420 a 550	3,2 a 5,6
	Massa comercial	303,78 a 726,73	315,68	1098,75	2,77
Argamassas dosadas	T5	277,40 a 686,80	309,12	1038,40	2,79
	T6	308,02 a 785,67	316,27	1187,86	2,99
	T7	261,46 a 684,12	291,36	1034,32	2,75
	T8	240,96 a 673,97	260,6	1018,99	2,89
	T9	245,23 a 626,61	272,97	947,38	2,70
	T10	254,31 a 647,12	265,99	978,38	2,81
	TDBR	314,41 a 739,19	358,2	1117,58	2,69

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

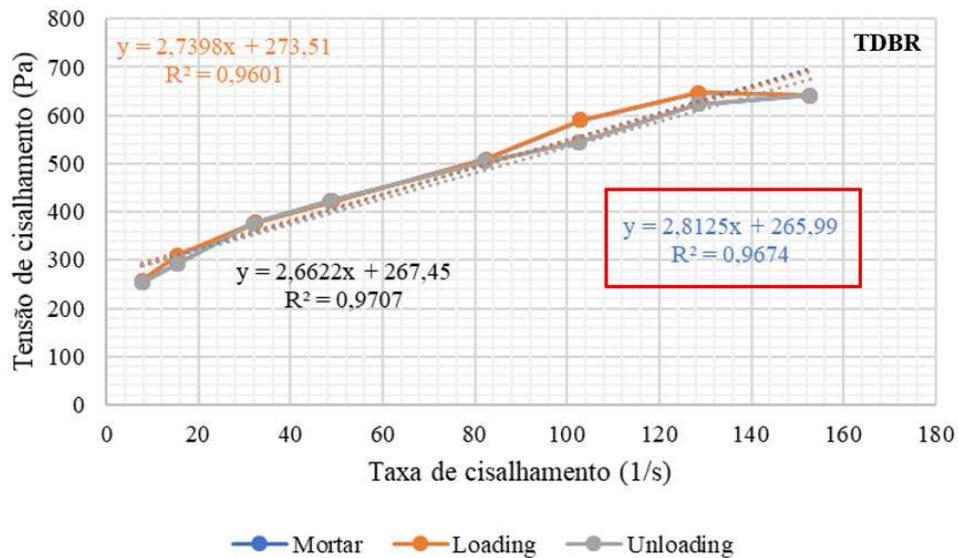
Com base nos autores e na argamassa de referência, é possível verificar que, inicialmente, a argamassa T5 obteve o resultado do limite inferior da tensão de cisalhamento (277,40 Pa) e a tensão de escoamento estática (1038,40 Pa) ligeiramente menor. Por sua vez, a argamassa T6 se enquadrou nos quatro parâmetros analisados. De forma similar a T5, as argamassas T7, T8, T9 e T10 também obtiveram resultados do limite inferior da tensão de cisalhamento e a tensão de escoamento estática menores, iguais a 261,46 Pa e 1034,32 Pa, 240,96 Pa e 1018,99 Pa, 245,23 Pa e 947,38 Pa, 254,31 Pa e 978,38 Pa, respectivamente. No entanto, percebe-se que essa diferença em relação aos valores de referência é mínima, o que pode ser justificado pelo uso de agregados com diferentes granulometrias, assim como a utilização de distintos aditivos em comparação com as argamassas estudadas na literatura.

Com relação a mistura definitiva obtida impressora de braço robótico (TDBR), verificou-se na Tabela 17 que os quatro parâmetros se enquadraram nas referências estudadas. Em relação a argamassa de projeção comercial, por exemplo, os resultados da tensão de cisalhamento, tensão de escoamento dinâmica, tensão de escoamento estática e viscosidade plástica foram muito próximos, com diferenças de +10,63 a +12,46 Pa, +42,52 Pa, +18,83 Pa e -0,08 Pa.s, respectivamente.

No Gráfico 2 a seguir, é possível visualizar o perfil do teste de fluxo, que, de forma análoga às demais, também obteve comportamento tixotrópico. No entanto, além dos

parâmetros reológicos, os resultados do teste de fluidez, mostrados no próximo item, é outro ensaio necessário para atestar o potencial de uso das argamassas na impressão 3D.

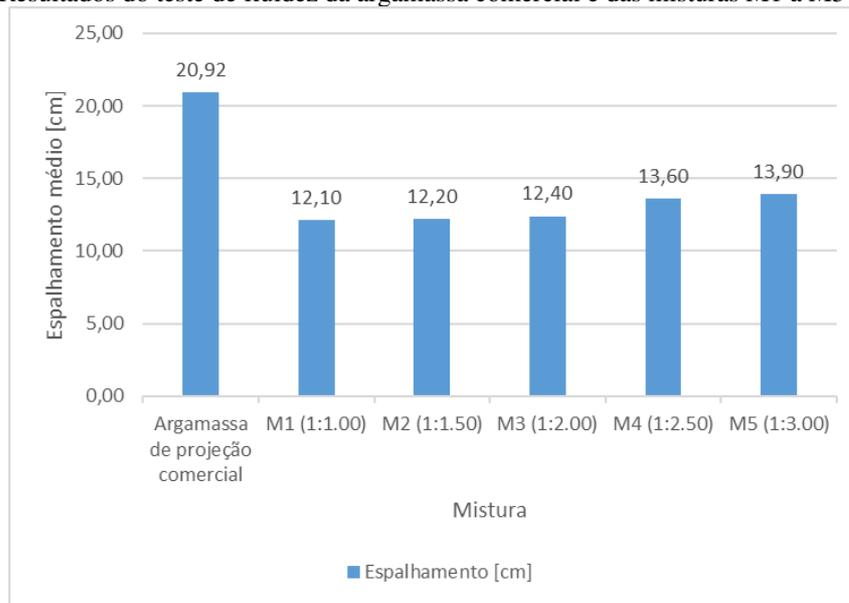
Gráfico 2 - Perfil do teste de fluxo da argamassa TDBR



4.2. Teste de fluidez

Inicialmente, na produção da argamassa de projeção comercial, obteve-se um resultado médio do espalhamento igual a 20,92 cm. Em seguida, para verificar a capacidade de construção dos projetos de mistura produzidos com materiais da RMF e baseados no estudo de DIAS (2022), com as dosagens mostradas na Tabela 13, obteve-se os resultados mostrados a seguir, obtidos no ensaio de espalhamento realizado no aparato *Flow table*.

Gráfico 3 - Resultados do teste de fluidez da argamassa comercial e das misturas M1 a M5 (DIAS, 2022)



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Figura 47 - Resultados do teste de fluidez das misturas M1 a M5 (DIAS, 2022)



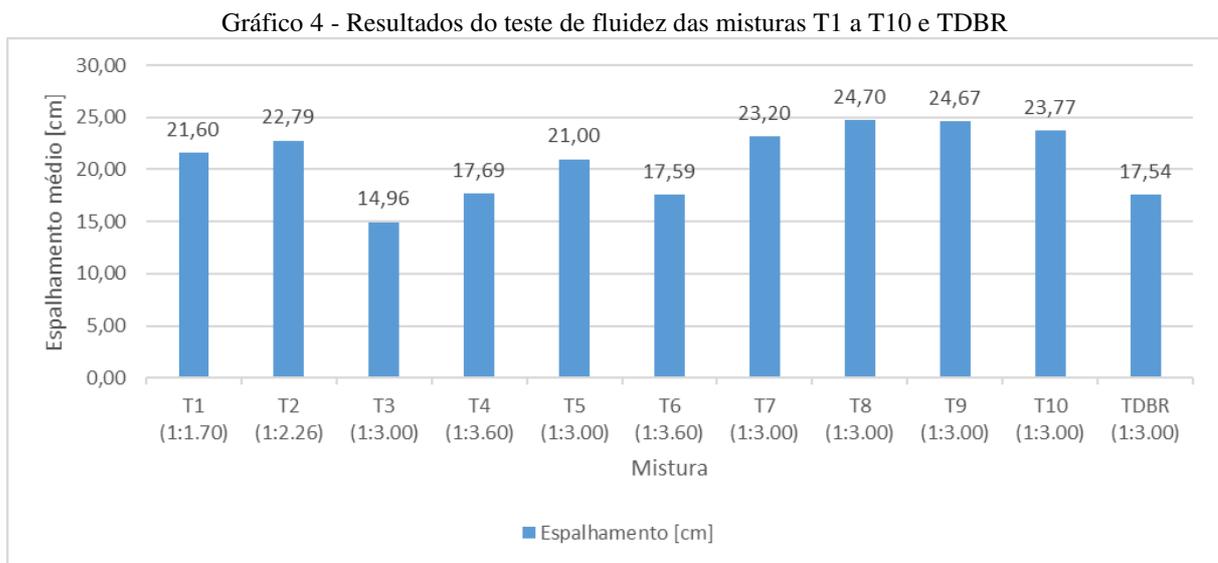
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

É importante destacar que no trabalho desenvolvido por DIAS (2022), o autor obteve para as misturas M1 a M5, respectivamente, os seguintes espalhamentos: 0 cm; 23,25 cm; 22,10 cm; 24,50 cm; 16,60 cm. O mesmo relatou que as misturas 1:1,00 e 1:3,00 não foram capazes de serem impressas quando se mantém as relações de água/materiais secos e teores de aditivos constantes, mesmo com espalhamentos nas faixas 16 cm e 21 cm, devido à baixa mobilidade do material.

Através da análise do Gráfico 3 e da Figura 47, embora os resultados se tenham enquadrado nos limites descritos por TAY; QIAN; TAN, (2019), expostos no item 2.4 deste trabalho, é possível verificar que as piores consistências foram obtidas para as argamassas M1, M2 e M3, com presença significativa de vazios, devido às altas quantidades de agregados em relação ao cimento. Por sua vez, nas misturas M4 e M5, embora tenham apresentado baixos valores para o índice de consistência também, percebe-se uma menor presença de vazios.

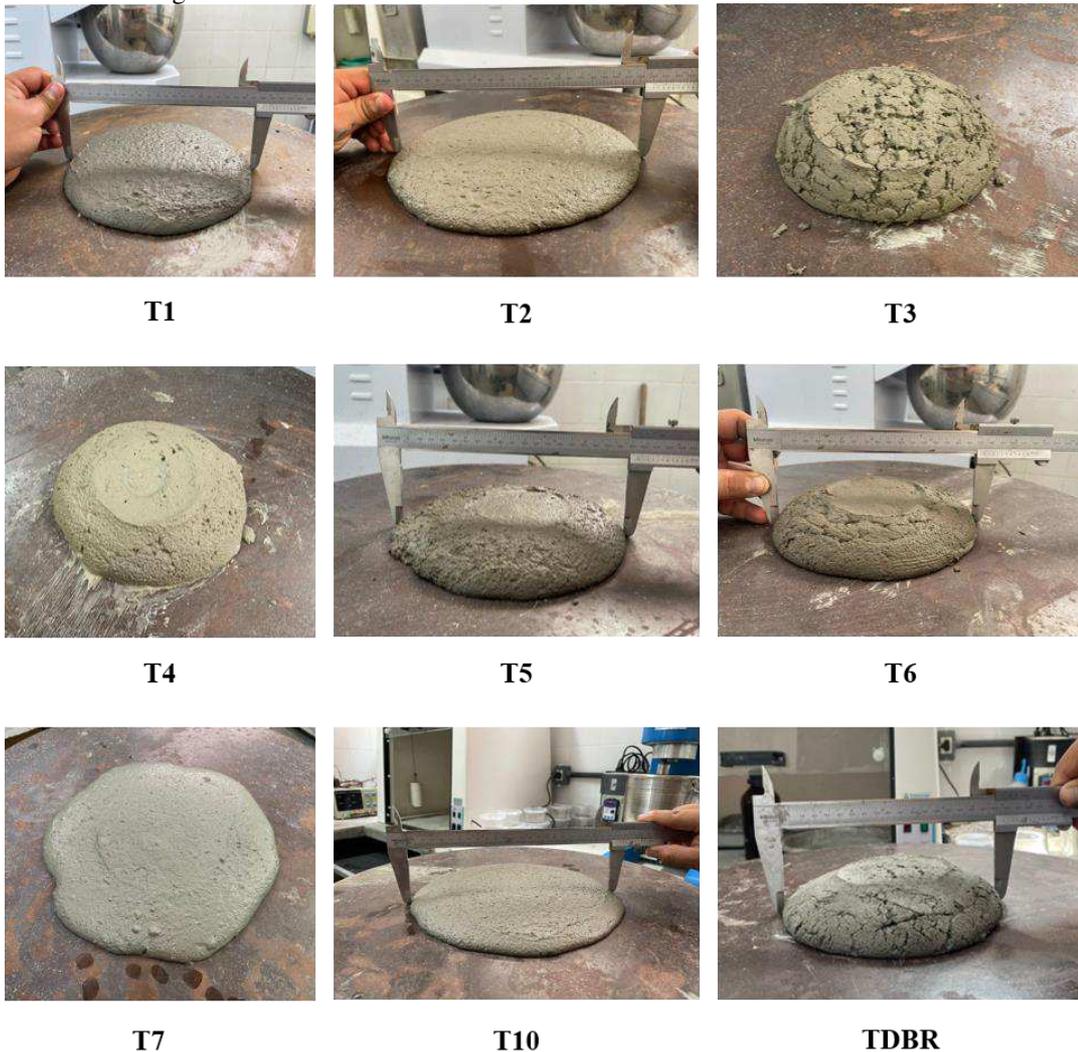
Comparando os resultados com os valores apresentados por DIAS (2022), observa-se uma significativa diferença entre os espalhamentos com as mesmas dosagens (M1 a M5). Com isso, é possível inferir que o tipo de agregado tem relação direta com a fluidez do material, uma vez que a reprodução das mesmas dosagens fez com que os espalhamentos reduzissem.

Em seguida, realizou-se o ensaio para os projetos de mistura dosados a partir do método ACI, compostos pelas misturas T1 a T10 e TDBR, expostos nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. Os resultados são mostrados no Gráfico 4 e Figura 48 a seguir.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Figura 48 - Resultados do teste de fluidez das misturas T1 a T10 e TDBR



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Através da análise do Gráfico 4 e da Figura 48, é possível perceber que o maior espalhamento foi obtido pela argamassa T8, fato que pode ter sido influenciado pelo teor de superplastificante na mistura, igual a 2%. Por sua vez, o menor espalhamento foi obtido pela argamassa T3, que possuiu um teor de aditivo de 0,89%, semelhante ao desenvolvido por DIAS (2022).

Os resultados demonstraram que à medida que a proporção entre o agregado e o cimento aumentou, o espalhamento diminuiu, necessitando o ajuste do superplastificante. Por outro lado, foi possível verificar que a mistura definitiva TDBR, com seu teor de VMA triplicado em relação à mistura T10, teve seu espalhamento afetado, sendo reduzido para 17,54 cm. Em comparação com o espalhamento obtido para a argamassa de projeção comercial, verificou-se que o resultado foi 3,38 cm menor, indicando uma massa mais estabilizada.

Embora os resultados tenham se enquadrado nos limites estabelecidos por RAHUL; SANATHAM (2020), LU *et al.* (2019), TAY; QIAN; TAN, (2019), RUBIO *et al.* (2017), expostos no item 2.4 deste trabalho, e tenham se aproximado ao espalhamento obtido para a argamassa de projeção comercial, a análise exclusiva do resultado do ensaio não é suficiente para atestar o uso da argamassa na impressão 3D.

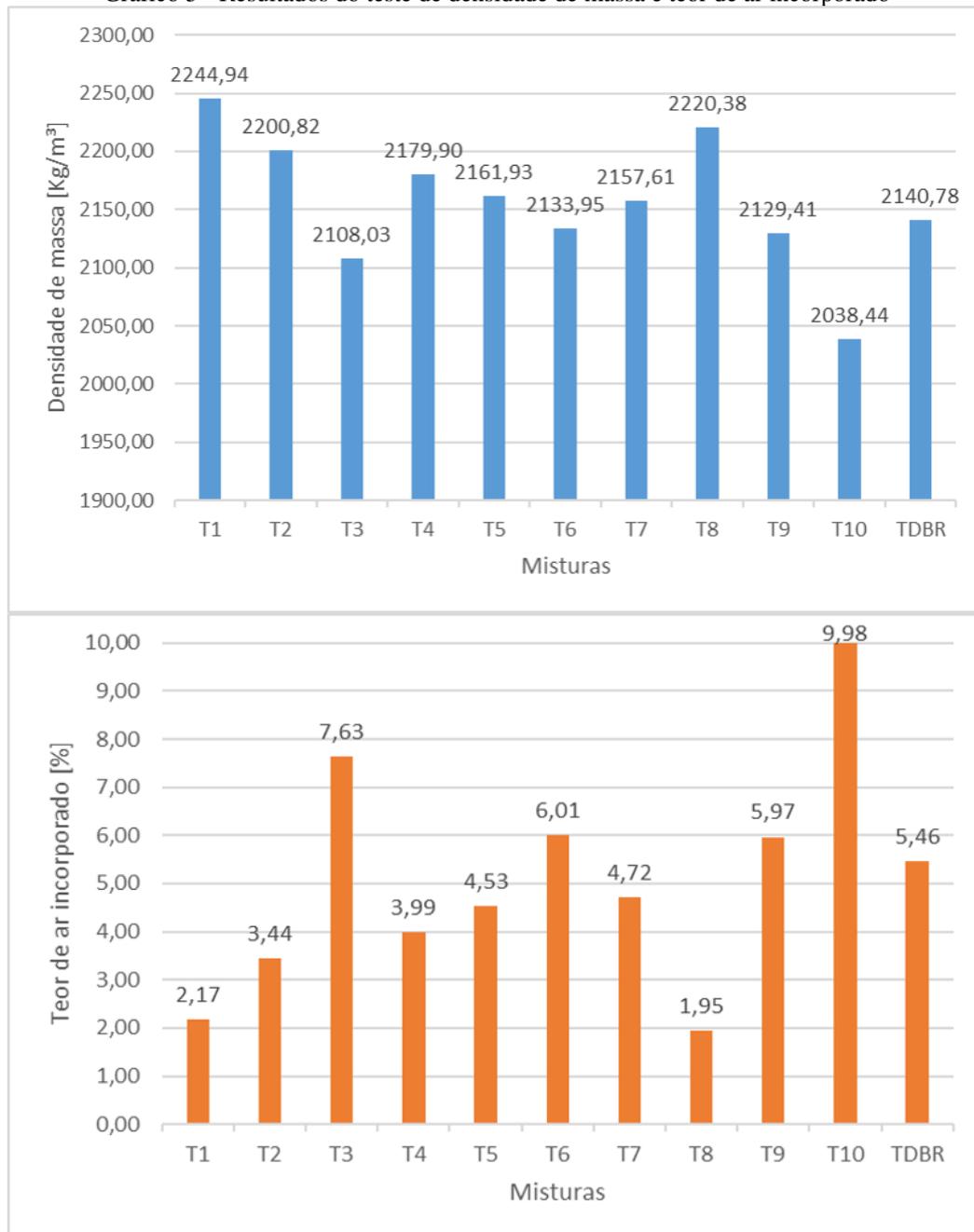
4.3. Densidade de massa e teor de ar incorporado

O Gráfico 5 mostra os resultados obtidos para a densidade de massa e teor de ar incorporado. Em geral, para a densidade de massa, não se observou uma diferença significativa, considerando uma amplitude de 206,5 Kg/m³ entre as argamassas T1 (maior resultado) e T10 (menor resultado). No trabalho desenvolvido por WOLFS *et al.* (2018), os autores obtiveram resultados entre 2111 a 2229,1 kg/m³. Por sua vez, LE *et al.*, 2012 encontraram em seu trabalho uma densidade média de 2250 Kg/m³. Os valores estão próximos aos encontrados nesta pesquisa.

Através da análise do gráfico, é possível observar que a argamassa T1 foi a que obteve maior densidade e menor teor de ar incorporado, justificado pela maior quantidade de finos entre as demais, que contribuiu para o preenchimento de vazios e, por conseguinte, aumentou a densidade de massa. À medida que se aumentou a relação agregado/cimento, observou-se a diminuição da densidade e aumento do teor de ar nas misturas.

Entre as argamassas T6 e T8, observou-se um aumento da densidade e diminuição do teor de ar à medida que se aumentou a concentração de superplastificante nas misturas. No entanto, após a diminuição do aditivo nas misturas T9 e T10, foi observado o resultado oposto. Por fim, para a mistura definitiva (TDBR), o aumento do modificador de viscosidade contribuiu para a diminuição do teor de ar e aumento da densidade, enquadrando-se dentro do limite estabelecido por WOLFS *et al.* (2018).

Gráfico 5 - Resultados do teste de densidade de massa e teor de ar incorporado



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

4.4. Teste manual com pistola de extrusão de argamassa

Considerando o objetivo do teste, que consistiu na verificação da extrudabilidade das argamassas, é importante destacar que a análise foi apenas visual. Inicialmente, realizou-se a simulação da impressão da argamassa de projeção comercial com a pistola de extrusão e, através da Figura 49, verificou-se uma boa capacidade de construção da massa, que apresentou estabilidade entre as camadas.

Em seguida, realizou-se o teste com as demais misturas. O objetivo era que as mesmas, após submetidas ao teste, obtivessem resultados semelhante ao observado para a argamassa de projeção. Além disso, era importante que a massa fosse capaz de ser extrudada pelos bocais circulares, se aproximando do bocal da impressora que fora utilizada posteriormente.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

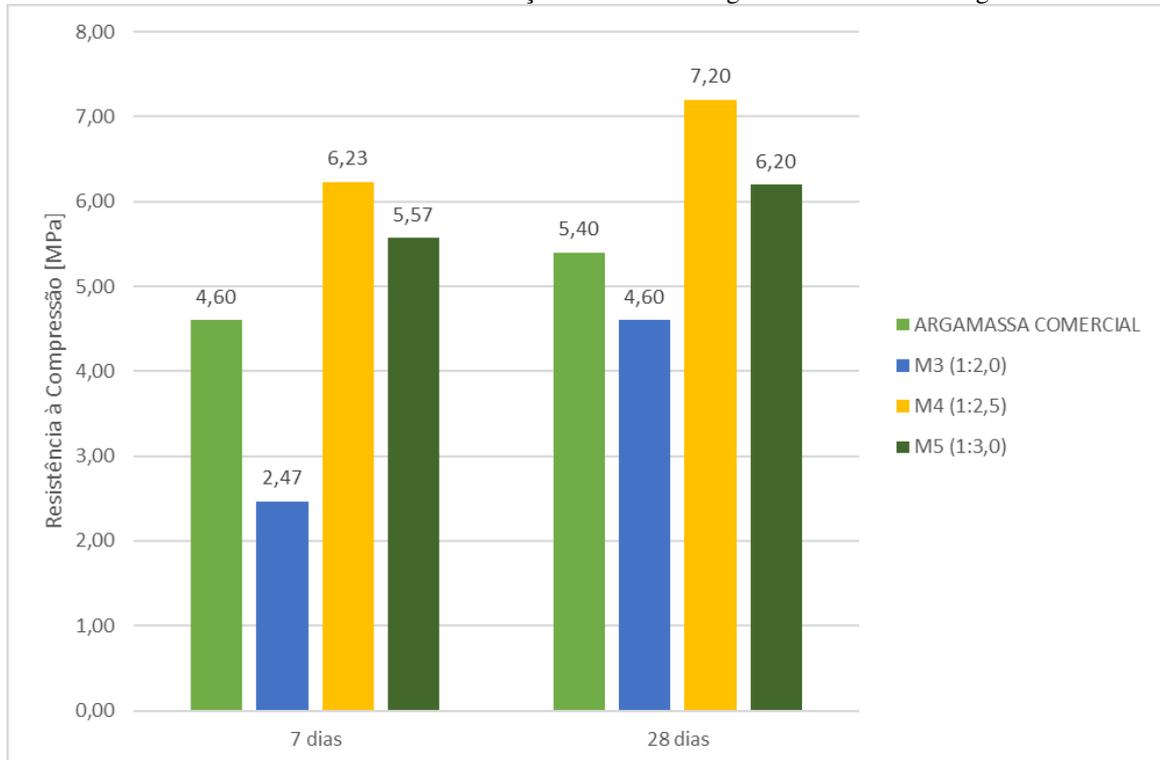
Como pode ser observado na figura, a argamassa T10 apresentou boa capacidade de ser extrudada pelo bocal circular, o que motivou sua utilização para o teste de impressão 3D no Laboratório do HubIC da ABCP/USP, que será mostrado na etapa do desenvolvimento dos protótipos neste trabalho.

4.5. Caracterização mecânica das argamassas

Inicialmente, para os testes de resistência à tração na flexão, realizados de acordo com os procedimentos da NBR 13279 (ABNT, 2005), das argamassas M1 a M5 e com as dosagens desenvolvidas por DIAS (2022), obteve-se os resultados mostrados no Gráfico 6 para as idades de 7 e 28 dias. Destaca-se que não foi possível obter as resistências das argamassas

M1 e M2, pois as mesmas não ficaram trabalháveis, impossibilitando a moldagem dos corpos-de-prova.

Gráfico 6 - Resultados do teste de resistência à tração na flexão da argamassa comercial e argamassas M1 a M5

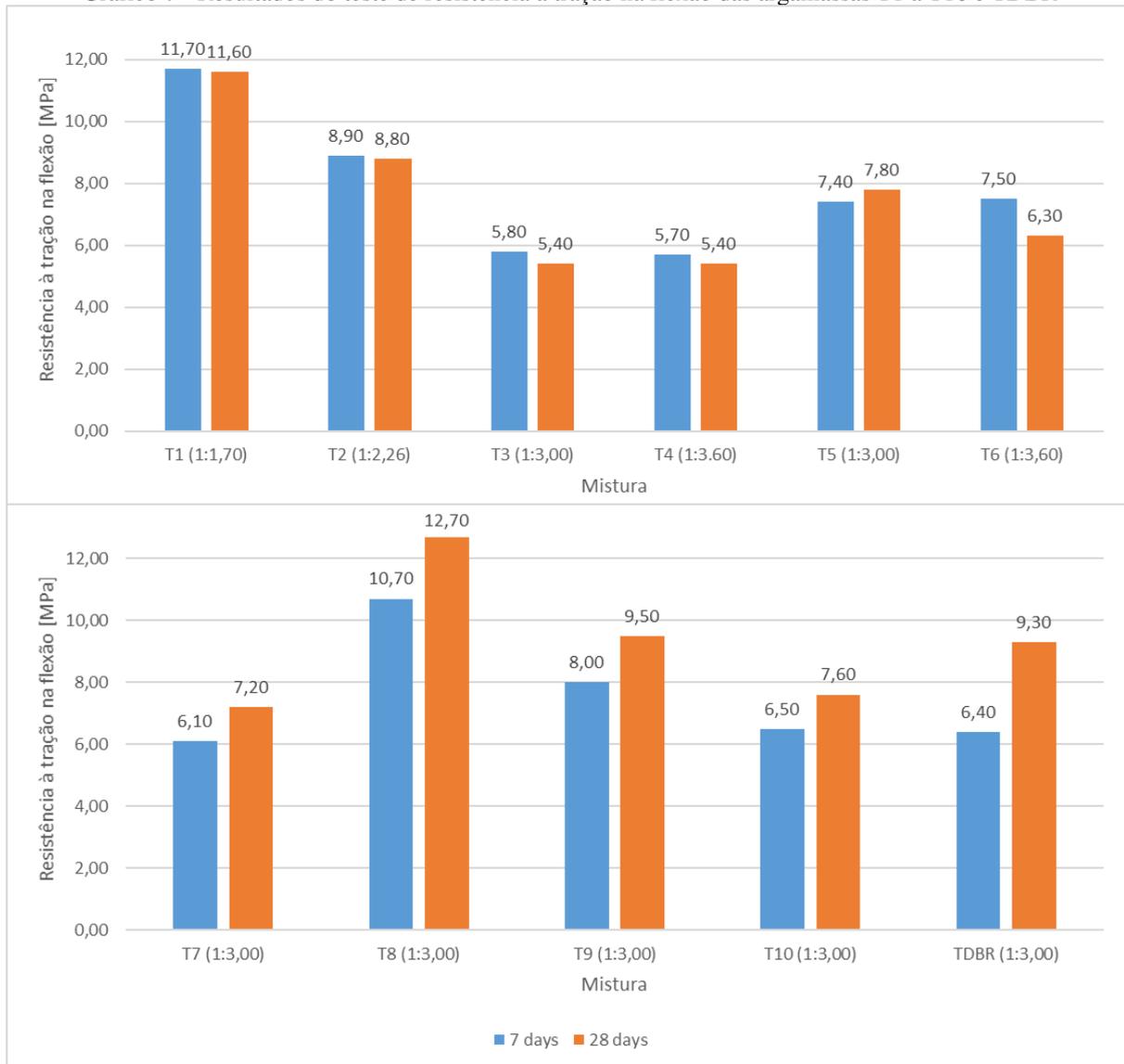


Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

É possível verificar que os melhores resultados apresentados, tanto aos 7, quanto aos 28 dias, foi para a mistura M4, com resultados iguais a 6,23 MPa e 7,20 MPa, respectivamente. Por sua vez, os piores foram observados para a mistura M3, com valores iguais a 2,47 MPa e 4,60 MPa aos 7 e 28 dias, respectivamente, que pode ser justificado pela grande quantidade de vazios no interior dos corpos-de-prova. No gráfico, também é possível observar os resultados obtidos para a argamassa de projeção comercial, iguais a 4,60 e 5,40 MPa aos 7 e 28 dias, respectivamente, que serviram como parâmetro para os demais.

Em seu trabalho, DIAS (2022) obteve 6,53 MPa aos 28 dias para a mistura M4, sendo o resultado aproximadamente 10% menor que o obtido com os materiais da RMF. Por outro lado, o autor obteve 9,55 MPa aos 28 dias para a mistura M3, sendo o valor mais de 100% maior que o obtido neste trabalho, evidenciando a influência que a origem dos materiais possui nas dosagens. O autor não conseguiu resultados para a mistura M5. Em seguida, o ensaio foi realizado com as argamassas T1 a T10 e TDBR e os resultados foram mostrados no Gráfico 7 a seguir.

Gráfico 7 - Resultados do teste de resistência à tração na flexão das argamassas T1 a T10 e TDBR

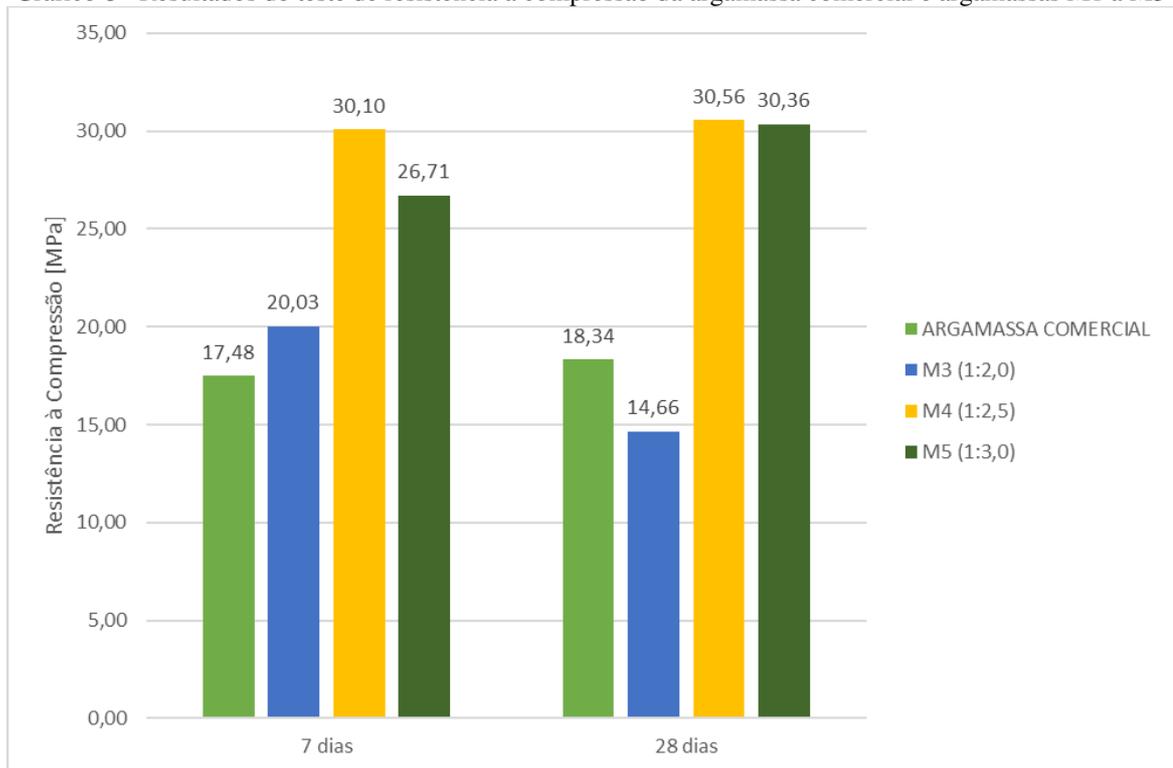


Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

É possível observar uma queda nos resultados entre T1 e T4, com uma amplitude de 6,20 MPa aos 28 dias, que é justificada pela redução do consumo de cimento nas dosagens. Após os ajustes de aditivos nas demais misturas, principalmente do superplastificante, verificou-se um aumento dos resultados, atingindo 12,70 MPa para a argamassa T8 aos 28 dias. Além disso, verificou-se que a mistura definitiva TDBR atingiu 9,30 MPa aos 28 dias. De forma similar, MA *et al.*, 2018, em seu estudo, realizaram a moldagem dos corpos de prova e verificaram uma resistência média igual a 7,80 MPa, demonstrando um resultado satisfatório da argamassa testada na impressora.

Para os ensaios de resistência à compressão, foram obtidos os resultados mostrados no Gráfico 8 a seguir, das misturas M1 a M5, no qual é possível verificar que os melhores resultados foram obtidos para a mistura M4, atingindo 30,10 MPa e 30,56 MPa aos 7 e 28 dias, respectivamente, e, os piores, para a M3, iguais a 20,03 MPa e 14,66 MPa respectivamente para as mesmas idades. Observa-se também os resultados obtidos para a argamassa de projeção comercial, iguais a 17,48 e 18,34 MPa aos 7 e 28 dias, respectivamente.

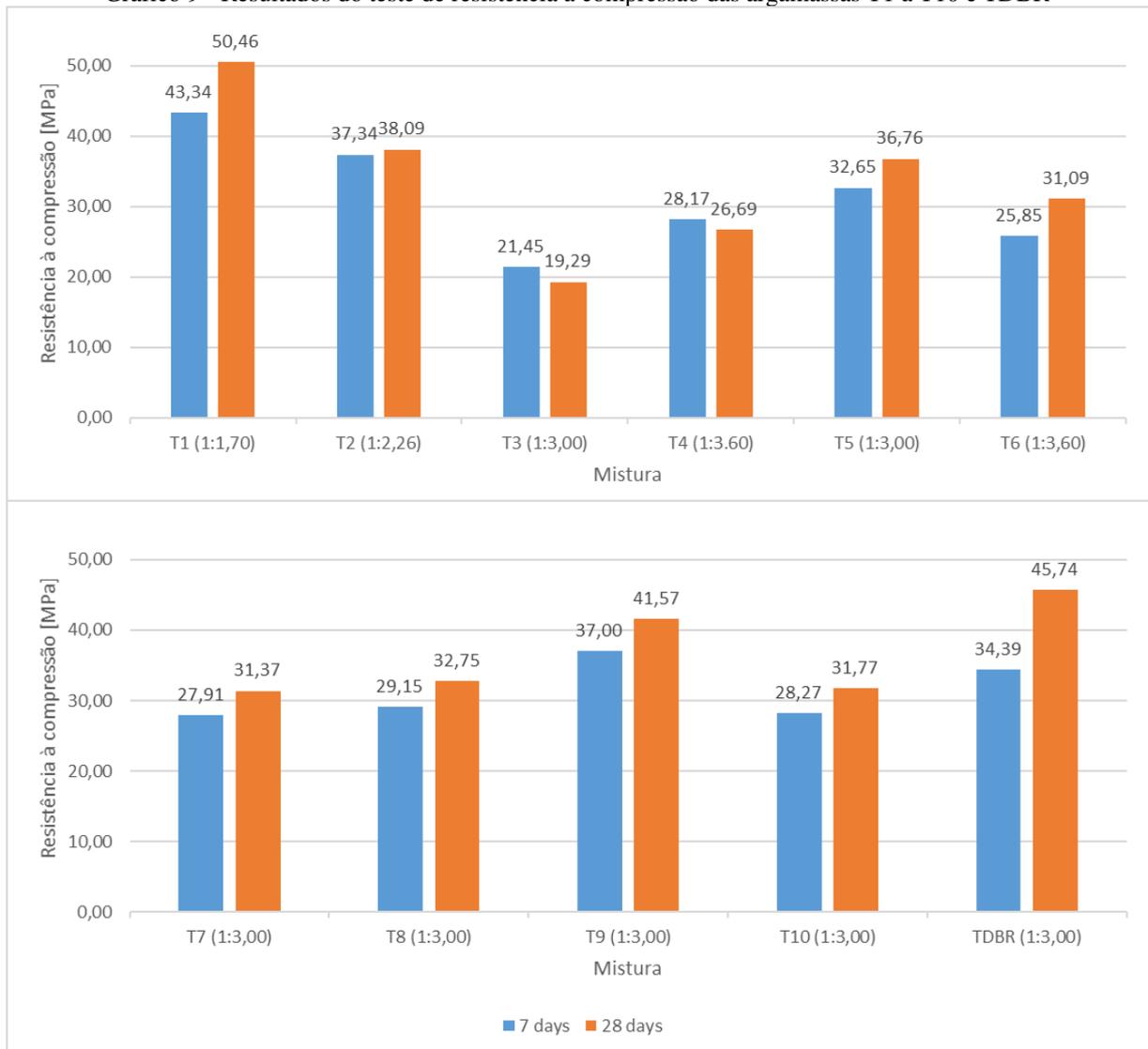
Gráfico 8 - Resultados do teste de resistência à compressão da argamassa comercial e argamassas M1 a M5



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Para a argamassa M4, DIAS (2022) obteve 47,27 MPa aos 28 dias, sendo o resultado em torno de 55% maior que o obtido neste trabalho. Já para a mistura M3, o autor conseguiu atingir 56,30 MPa na mesma idade, quase 300% a mais, um resultado expressivamente maior em relação ao encontrado neste trabalho, que demonstra a grande influência da origem dos materiais em relação às resistências. Em seguida, foram realizados ensaios com as argamassas T1 a T10 e TDBR, cujos resultados são apresentados no Gráfico 9 abaixo.

Gráfico 9 - Resultados do teste de resistência à compressão das argamassas T1 a T10 e TDBR



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Assim como na resistência à tração na flexão, a resistência à compressão também foi influenciada pela relação a/c , pelo consumo de cimento e proporção de aditivos. A mistura T1 apresentou o melhor desempenho em termos de resistência à compressão. No entanto, as misturas T3 e T4 mostraram os piores desempenhos. Isso se deve, em parte, à relação a/c mais elevada dessas misturas em comparação com as demais atrelada ao menor consumo de cimento.

É possível verificar que a mistura definitiva TDBR obteve um resultado igual a 45,74 MPa aos 28 dias com um consumo de cimento de 481,43 Kg/m³. No estudo desenvolvido por KAZEMIAN et al., (2017), verificou-se que os autores conseguiram atingir 44,70 MPa aos 28 dias para a argamassa 3D convencional, sem adições e com um consumo de cimento igual

a 600 Kg/m³. Com isso, é possível inferir que o resultado da argamassa testada na impressora foi satisfatório.

Após os resultados de caracterização mecânica, é importante destacar que a comparação das massas dosadas com a de projeção comercial, nesse aspecto, torna-se inviável, devido a finalidade de utilização da mesma. Como observado nos Gráficos 6 e 8, foram obtidos valores iguais a 5,40 MPa e 18,34 MPa aos 28 dias para a resistência à tração na flexão e à compressão, respectivamente. Ou seja, resultados significativamente inferiores ao desejado para a finalidade de uso da argamassa definitiva de impressão 3D.

Considerando os resultados atingidos, é fundamental destacar que a obtenção de concretos de alta resistência e durabilidade está geralmente associada a um maior consumo de cimento Portland. Além disso, nota-se que o ajuste do SP nas misturas proporcionou uma melhor dispersão das partículas no concreto, o que resultou em maior eficácia e melhores resultados de resistência à tração na flexão e compressão. As propriedades do concreto no estado endurecido são influenciadas pelas características no estado fresco. Concretos com melhor dispersão das partículas alcançam resistências à compressão mais elevadas.

4.6. Desenvolvimento de protótipos

Após a seleção da argamassa T10, foi necessária a ida ao Laboratório do HubIC em São Paulo (ABCP/USP) para o desenvolvimento dos protótipos. Todos os materiais da RMF foram transportados para São Paulo via rodoviária. Os primeiros testes foram realizados na impressora do tipo pórtico, na qual algumas peças foram impressas com o objetivo de verificar a extrudabilidade e capacidade de impressão da argamassa previamente selecionada, conforme mostra a Figura 50.

A peça localizada ao lado esquerdo da figura foi a primeira a ser impressa. A impressão foi realizada com o bocal de 20 mm da máquina, possuindo uma altura da camada igual a 12 mm e velocidade de 10.000 mm/min, atingindo 18 cm de altura. Por sua vez, a peça ao lado direito da figura foi impressa após alguns ajustes de configuração da máquina. A mesma foi impressa com o mesmo bocal de 20 mm, porém com a altura da camada igual a 10 mm e velocidade de 6.000 mm/min, atingindo 27 cm de altura.

Figura 50 - Peças impressas na impressora do tipo pórtico



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Conforme explicado no item 3.3.1 deste trabalho, é importante ressaltar que, após os testes iniciais, a argamassa T10 foi ajustada para a impressão, dando origem a mistura definitiva, nomeada TDBR. Além disso, a necessidade do ajuste do traço para a utilização na impressora do tipo braço robótico levou em consideração a dificuldade encontrada nas primeiras tentativas em relação ao bombeamento do material.

Durante a impressão, foi observado que a bomba necessitou trabalhar em uma potência maior que o convencional, gerando mais calor e, conseqüentemente, o aquecimento do material. Fato que pode ser considerado ruim, uma vez que o torna passível de segregação. Devido a questões logísticas, a solução encontrada foi aumentar, de forma proporcional, a quantidade do aditivo modificador de viscosidade e submeter o material a novos testes de impressão.

Como já relatado, a proporção de VMA foi triplicada, obtendo o traço definitivo TDBR, que foi utilizado para a impressão da parede e dos blocos mostrados a seguir. Conforme os resultados apresentados, verificou-se que o aumento do VMA fez com que a mistura ficasse mais estável e com menor índice de vazios, acreditando-se que, conseqüentemente, isso favoreceu o desempenho mecânico satisfatório.

Durante a impressão da parede, observou-se uma grande melhora em relação ao problema de aquecimento. Porém, na última camada impressa, aos 20 cm de altura, a temperatura aumentou novamente, o que levou a inferir a necessidade de finos no material, como adições parciais ao cimento, que foi destacado como sugestão para trabalhos futuros, descrito no próximo capítulo deste trabalho. Para os blocos, o problema de aquecimento foi observado apenas na impressão do sexto bloco.

Levando em consideração os aspectos observados e, visando evitar a segregação observada, destaca-se a importância de realizar um estudo mais aprofundado acerca da evolução da tensão de escoamento ao longo do tempo de impressão, uma vez que é esse o esforço medido para que o material inicie (estática) e que mantenha o fluxo (dinâmica). Argamassas com maior estabilidade apresentam maiores taxas de cisalhamento. A necessidade de cargas menores em relação a deformação torna possível um melhor processo de bombeamento e impressão pelo bocal. Para isso, alguns testes podem ser úteis, como o *squeeze-flow* para analisar o grau de deformação e a viscosidade da argamassa no estado fresco e penetrômetro para avaliação do tempo de pega do material.

Figura 51 - Parede impressa na impressora do tipo braço robótico



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

O teste com a argamassa TDBR foi realizado a partir do desenvolvimento de uma parede em “L” de 1,50 m de comprimento por 1,00 m de largura, 0,20 m de altura e 0,13 m de

espessura e a impressão de seis blocos de concreto com dimensões de 15x30x20cm, mostrados nas Figuras 51 e 52, respectivamente. É importante destacar que as peças foram impressas com o bocal de 20 mm da máquina e a altura da camada igual a 10 mm, além de uma velocidade igual a 6.000 mm/min. Com isso, para atingir a altura desejada, foram necessárias a impressão de 20 camadas para cada protótipo.

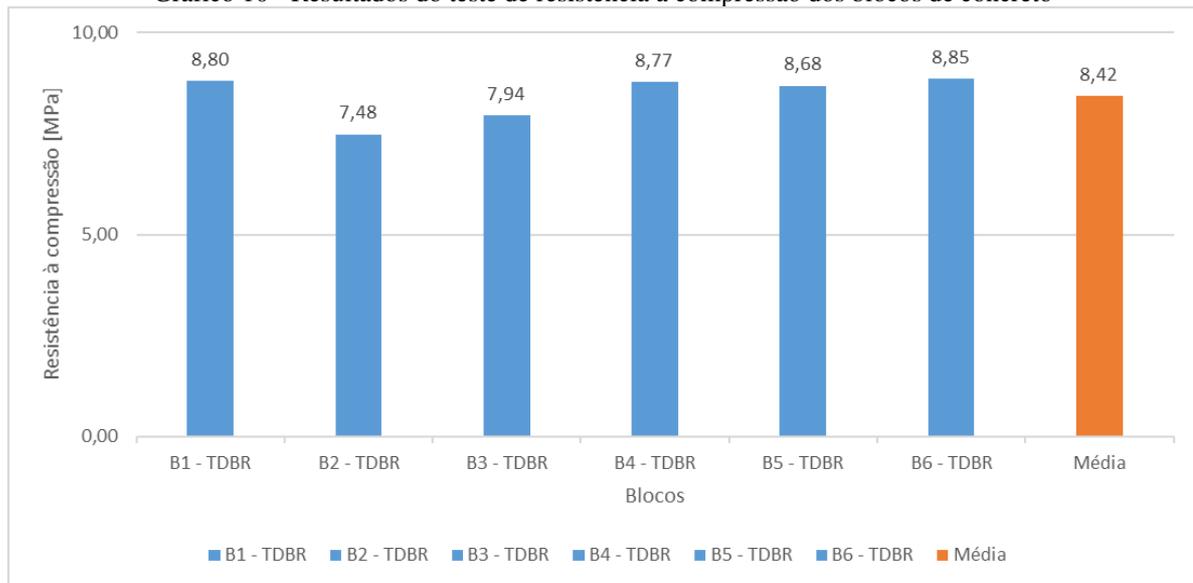
Figura 52 - Blocos de concreto impressos em 3D



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Após a impressão dos blocos no Laboratório do HubIC (ABCP/USP), foi necessário aguardar 28 dias para a submetê-los ao ensaio de resistência à compressão. O Gráfico 10 mostra os resultados.

Gráfico 10 - Resultados do teste de resistência à compressão dos blocos de concreto



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Através do gráfico, é possível verificar que a média dos resultados foi igual a 8,42 MPa, com variação de apenas 1,37 MPa entre os resultados maiores e menores, iguais a 8,85 MPa e 7,48 MPa, respectivamente. Com isso, de acordo com a Tabela 3 da NBR 6136 (ABNT, 2016), que descreve os requisitos de classificação para o ensaio de resistência à compressão, é possível enquadrar o bloco impresso como um protótipo de função estrutural de classe A, uma vez que o resultado foi maior que 8 MPa. Os resultados satisfatórios dos ensaios atestam o potencial de utilização da mistura TDBR na impressão 3D.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tecnologia de impressão 3D aplicada a construção civil é um sistema inovador e bastante promissor no Brasil. As vantagens citadas, como a redução da mão de obra, desperdício e tempo de execução da obra, justificam a elaboração deste trabalho, cuja proposta foi desenvolver um projeto de mistura de compósito cimentício com materiais da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) para ser utilizado em impressão 3D na construção civil. Dessa forma, o resultado deste trabalho será fundamental para o desenvolvimento de projetos futuros com esse material.

Como consequência, o Ceará poderá avançar no estudo dessa tecnologia, sendo fundamental para que o estado se torne referência. É importante destacar que o investimento em uma tecnologia inovadora, com potencial de crescimento dentro do mercado da construção civil, é fundamental para o crescimento do estado no aspecto inovador e tecnológico, gerando inúmeros benefícios à população. Entre eles, destaca-se a redução do déficit habitacional, uma vez que a construção de novas moradias com esse material poderá ser realizada mais rapidamente.

Dentre os tipos de impressora 3D de concreto existentes no mercado, o sistema utilizado nesse trabalho pode ser extremamente útil para o Estado, uma vez que a máquina do tipo braço robótico torna possível a impressão de diversos componentes e módulos para a construção de habitações de interesse social em larga escala, garantindo as vantagens dessa tecnologia, com destaque para a velocidade de execução e diminuição de mão de obra.

Com base nos resultados expostos e metodologia utilizada, é possível constatar que este trabalho cumpriu com o objetivo inicialmente proposto, avaliando os principais parâmetros reológicos, as propriedades mais usuais para essa nova técnica construtiva no estado fresco e endurecido. De uma forma geral, pode-se concluir que:

- Entre a primeira dosagem realizada (T1) e a definição da última (TDBR) foi possível constatar a redução de 31,50% do consumo de cimento;
- Para o atendimento das propriedades de extrudabilidade e capacidade de construção, os resultados dos testes no estado fresco possuem maior relevância em relação ao estado endurecido;
- As argamassas, especialmente a mistura TDBR, apresentaram comportamento tixotrópico, favorecendo a utilização na impressão 3D;

- Em relação aos parâmetros reológicos analisados: tensão de cisalhamento, tensão de escoamento dinâmica, tensão de escoamento estática e viscosidade plástica, foi possível verificar que a argamassa TDBR se aproximou significativamente dos limites estabelecidos pela argamassa de projeção comercial, com diferenças de +10,63 a +12,46 Pa, +42,52 Pa, +18,83 Pa e -0,08 Pa.s, respectivamente;
- O resultado do ensaio de espalhamento das argamassas, isoladamente, não é suficiente para atestar sua utilização na impressão 3D, uma vez que a maioria dos resultados se enquadraram aos limites estabelecidos na literatura. A argamassa definitiva TDBR obteve uma diferença de -3,38 cm em relação ao espalhamento da argamassa de projeção comercial;
- Quanto menor a massa específica, maiores foram os resultados de índice de vazios. Quanto menor o consumo de cimento, menor a densidade de massa dos compósitos;
- Os resultados das resistências à tração na flexão e compressão indicaram possuir relação com o consumo de cimento e, conseqüentemente, índice de vazios;
- Após o aumento da quantidade de VMA da mistura TDBR em relação a T10, verificou-se a redução da fluidez, do índice de vazios e, conseqüentemente, o aumento das resistências à tração na flexão e compressão;
- Foi possível enquadrar o bloco impresso como um protótipo de função estrutural de classe A de acordo com a norma, uma vez que obteve um resultado médio maior que 8 MPa;
- A correlação entre os resultados desta pesquisa e os valores encontrados na literatura internacional sugere que os compósitos 3DCP desenvolvidos estão em conformidade com os padrões normalmente utilizados nesta inovadora técnica de construção.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Com o objetivo de contribuir cada vez mais para a produção de novas pesquisas e preencher algumas lacunas nessa temática, sugere-se os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Produzir compósitos para aplicações de impressão 3D com a adição de materiais sustentáveis como substitutos parciais ao cimento, como a calcita, resíduos de pó de vidro, metacaulim, escória ou cinza volante, contribuindo para a redução do seu consumo e, conseqüentemente, para a redução da emissão de CO₂ na atmosfera;
- Analisar o efeito da utilização de agregados com diâmetros menores na produção das argamassas para impressão 3D, para reduzir o teor de ar da mistura;
- Utilizar materiais alternativos como substitutos parciais ao agregado na produção das argamassas 3DCP, para analisar o efeito da mistura de diferentes agregados na impressão;
- Analisar o efeito da utilização de diferentes proporções de aditivos na produção dos compósitos para impressão 3D;
- Analisar a relação do tempo de impressão entre as camadas e a capacidade de construção das misturas 3DCP;
- Estudar a evolução da tensão de escoamento ao longo do tempo de impressão.

REFERÊNCIAS

ALL3DP. 2019. Disponível em: <<https://all3dp.com>>. Acesso em: 09. de out. 2023.

ARAÚJO, Rísia Amaral. **Avaliação de misturas cimentícias para impressão 3D com desempenho térmico otimizado**. Orientador: Antônio Eduardo Martinelli. 2022. 125f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6136: **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12118: **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 2005.

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 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó — determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: **Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: **Agregados - determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16973: **Agregados - determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: **Agregado miúdo - determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: **Agregados - determinação da composição granulométrica - método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.

BINGHAM, E.C. **An investigation of the laws of plastic flow**. National Bureau of Standards, 1916.

BINGHAM, E.C. **Fluidity and plasticity**. McGraw-Hill, 1922.

BOS, F., WOLFS, R., AHMED, Z., SALET, T. Manufatura aditiva de concreto na construção: potenciais e desafios da impressão 3D em concreto. **Prototipagem Virtual e Física**, 11:3, p. 209-225, 2016.

BUSWELL, R.A., DE SILVA, W.L., JONES, S., DIRRENBERGER, J. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research, **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 37–49, 2018.

BUSWELL, R.A., SOAR, R.C., GIBB, A.G., THORPE, A. Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction, **Automation in Construction**, v. 16, p. 224–231, 2007.

CAÑETE VELA, I. **3D Printer Electronics Design**. Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.

CHAN, H.K.; GRIFFIN, J.; LIM, J.J.; ZENG, F.; CHIU, A.S.F. The impact of 3D Printing Technology on the supply chain: Manufacturing and legal perspectives. **International Journal of Production Economics**, v. 205, p. 156–162, 2018.

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

CIB (COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION). **New Perspective in Industrialisation in Construction - A State-of-the-Art Report**. Girmscheid, G., Scheublin, F. (Eds.). IBB – Institut für Bauplanung und Baubetrieb. Zurich: Eigenverlag des IBB an der ETH Zürich, 2010. ISBN 978-3-906800-17-2. 429 p.

COELHO, Arthur Wilson Fonseca. Manufatura Aditiva por Jato de Aglutinante (Impressão 3D): fabricação e avaliação de compósitos de gesso com fibras de sisal. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

CONSTRUÇÃO DE ADITIVOS: DA CASA À PONTE UTILIZANDO IMPRESSÃO 3D. 3D Fila, 2023. Disponível em: < <https://3dfila.com.br/blog/construcao-de-aditivos-da-casa-a-ponte-utilizando-impressao-3d/>>. Acesso em: 09 de out. de 2023.

COSTA, C. M.; NACCACHE, M. F.; VARGES, P. Caracterização reológica de fluidos complexos. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, [S. l.], v. 4, n. 7, p. 3–28, 2017. Disponível em: <https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/999>. Acesso em: 9 out. 2023.

DELGADO CAMACHO, D., CLAYTON, P., O'BRIEN, W. J., SEEPERSAD, C., JUENGER, M., FERRON, R., *et al.* Applications of additive manufacturing in the construction industry – a forward-looking review. **Automation in Construction**, v. 89, p. 110–119, 2018. doi: 10.1016/j.autcon.2017.12.031

DIAS, L. S. **Metodologia de dosagem com base em relações constitutivas básicas de misturas para impressão 3d em concreto (3DCP)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Natal, RN, 2022.

DOLENC, A. **An overview of rapid prototyping technologies in manufacturing**. Helsinki University of Technology, pp 1–23, 1994.

FABRICIO, M. M. **Processos construtivos flexíveis: projeto da produção**. 1996. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FARAH, M. F. S. **Tecnologia, processo de trabalho e construção habitacional**. São Paulo, 1992. Tese (Doutorado em Sociologia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1992.

FENG, P., MENG, X., ZHANG, H. Mechanical behavior of FRP sheets reinforced 3D elements printed with cementitious materials. **Composite Structures**, v. 134, p. 331–342, 2015. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.08.079.

FLEURY, A. C. C.; VARGAS, N. **Organização do trabalho: uma abordagem interdisciplinar: sete casos brasileiros para estudo**. São Paulo: Atlas, 1983. 232 p.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Diretoria de Estatística e Informações. **Déficit habitacional no Brasil – 2016-2019**. Belo Horizonte: FJP, 2021. 169 p. Relatório.

GANTRY SYSTEMS: WORKING OUTSIDE THE ENVELOPE. Macron Dynamics Inc, 2023. Disponível em: <https://www.macrondynamics.com/job-stories/gantry-systems-overview>>. Acesso em: 09 de out. de 2023.

GARCIA, E. Nos EUA, empresa constrói 1ª casa impressa em 3D de dois andares. Tilt Uol, 2023. Disponível em: <https://www.uol.com.br/tilt/noticias/reuters/2023/01/12/impressao-3d-atinge-novo-patamar-com-casa-de-dois-andares.htm>. Acesso em: 09 de out. de 2023.

GIBBONS, G. J., WILLIAMS, R., PURNELL, P., FARAHI, E. 3D printing of cement composites. **Advances in Applied Ceramics**, v. 109, p. 287–290, 2010. doi: 10.1179/174367509X12472364600878.

GOSSELIN, C.; DUBALLET, R.; ROUX, P.; GAUDILLIÈRE, N.; DIRRENBERGER, J.; MOREL, P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete—A new processing route for architects and builders. **Material & Design**, v. 100, p. 102–109, 2016.

HAMBACH M, VOLKMER D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. **Cement And Concrete Composites**, v. 79 p. 62–70, 2017.

HAN, Y., YANG, Z., DING, T., XIAO, J. Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete, **Journal of Cleaner Production**, v. 278, 123884, 2021.

HEIRMAN, G.; VANDEWALLE, L.; VAN GEMERT, D.; WALLEVIK, O., Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer, **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 150, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2007.10.003>.

HONDA, Wilson Saburo. **Certificação da Sustentabilidade de Edifícios de Escritórios Corporativos no Brasil**. 2016. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

HWANG, D.; KHOSHNEVIS, B. (2004). **Concrete wall fabrication by contour crafting**, in 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2004), Jeju. doi: 10.22260/ISARC2004/0057

IAN, G.; DONGPING, S. Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process. **Rapid Prototyping Journal**, v. 3, p. 129–136, 1997. doi: 10.1108/13552549710191836.

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 13320 - **Particle size analysis — Laser diffraction methods**, Switzerland, 2020.

IZADGOSHASB, H.; KANDIRI, A.; SHAKOR, P.; LAGHI, V.; GASPARINI, G. Predicting Compressive Strength of 3D Printed Mortar in Structural Members Using Machine Learning. **Applied Sciences**, v. 11, 10826, 2021.

JAYATHILAKAGE, R., RAJEEV, P., SANJAYAN, J., Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing, **Construction and Building Materials**, v. 240, 117989, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117989>.

JENG, J.-Y., PENG, S.-C. CHOU, C.-J. Metal rapid prototype fabrication using selective laser cladding technology. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 16, p. 681–687, 2000. doi: 10.1007/s001700070039.

JEON, K.-H., PARK, M.-B., KANG, M.-K., KIM, J.-H. **Development of an automated freeform construction system and its construction materials**, in Proceedings of the 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining. Citeseer. 1359–1365, 2013. doi: 10.22260/ISARC2013/0153

KAZEMIAN, A., YUAN, X., COCHRAN, E., KHOSHNEVIS, B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: laboratory testing of fresh printing mixture, **Construction and Building Materials**, vol. 145, pp. 639–647, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>.

KHOSHNEVIS, B. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies, **Automation in Construction**, v. 13, p. 5–19, 2004.

KHOSHNEVIS, B., DUTTON, R. Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. **Materials Technology**, v. 13, p. 53–56, 1998. doi: 10.1080/10667857.1998.11752766

KIBERT, C. J. Establishing principles and a model for sustainable construction. **Anais do XVI CIB TG 16, Sustainable Construction**, Tampa, Florida, USA, 1994. Disponível em: https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC24773.pdf. Acesso em: 09 maio 2023.

KOLOSISOV, S., BOILLAT, E., GLARDON, R., FISCHER, P., LOCHER, M. 3D FE simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, p. 117–123, 2004. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2003.10.019.

KRUGER, J., ZERANKA, S., VAN ZIJL, G., 3D concrete printing: a lower bound analytical model for buildability performance quantification, **Automation in Construction**, v. 106, 102904, 2019.

KRUTH, J. P., MERCELIS, P., VAN VAERENBERGH, J., FROYEN, L., ROMBOUTS, M. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. **Rapid Prototyping Journal**. v. 11, p. 26–36, 2005. doi: 10.1108/13552540510573365.

LE, T.T., AUSTIN, S.A., LIM, S., BUSWELL, R.A., GIBB, A.G.F., THORPE, T., Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, **Materials Structures**, v. 45, p. 1221–1232, 2012. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>.

LE TT, AUSTIN SA, LIM S, BUSWELL RA, LAW R, GIBB AGF, et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 558–66, 2012.

LIM, S., BUSWELL, R.A., LE, T.T., AUSTIN, S.A., GIBB, A.G.F., T. THORPE, Developments in construction-scale additive manufacturing processes, **Automation in Construction**, v. 21, p. 262–268, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>.

LIPSON, H., KURMAN, M. **Fabricated: The New World of 3D Printing**. New York, NY: JohnWiley and Sons, 2013.

LIU, C., WANG, X., CHEN, Y., ZHANG, C., MA, L., DENG, Z., CHEN, C., ZHANG, Y., PAN, J., BANTHIA, N. “Influence of hydroxypropyl methylcellulose and silica fume on stability, rheological properties, and printability of 3D printing foam concrete”, **Cement and Concrete Composites**, v.122, 1041581, 2021.

LLORET, E., SHAHAB, A. R., LINUS, M., FLATT, R. J., GRAMAZIO, F., KOHLER, M. et al. Complex concrete structures: merging existing casting techniques with digital fabrication. **Computer Aided Design**, v. 60, p. 40–49, 2015. doi: 10.1016/j.cad.2014.02.011

LU, B., WENG, Y.W., LI, M.Y., QIAN, Y., LEONG, K.F., TAN, M.J., QIAN, S.Z., A systematical review of 3D printable cementitious materials, **Construction and Building Materials**, v. 207, p. 477–490, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144>.

LU, B.; QIAN, Y.; LI, M.; WENG, Y.; LEONG, K.F.; TAN, M.J.; QIAN, S. Designing spray-based 3D printable cementitious materials with fly ash cenosphere and air entraining agent. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 1073–1084, 2019.

MA, G.; LI, Z.; WANG, L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 162, p. 613–627, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>.

MA, G., WANG, L. and JU, Y., State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction, **Science China: Technological Sciences**, v. 61, p. 475–495, 2017. doi: 10.1007/s11431-016-9077-7.

MARCHMENT, T., SANJAYAN, J., Mesh reinforcing method for 3D concrete printing, **Automation in Construction**, v. 109, 102992, 2020.

MARCHMENT, T., SANJAYAN, J., XIA, M., Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification, **Materials & Design**, v. 169, 107684, 2019.

MARCHON, D., KAWASHIMA, S., BESSAIES-BEY, H., MANTELLATO, S. and NG, S., Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry, **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 96–110, 2018. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.014.

MECHTCHERINE, V., BOS, F.P., PERROT, A., DA SILVA, W.L., NERELLA, V., FATAEI, S., WOLFS, R.J., 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, 106037, 2020.

MECHTCHERINE, V.; NERELLA, V.N.; WILL, F.; NÄTHER, M.; OTTO, J.; KRAUSE, M. Large-scale digital concrete construction—CONPrint3Dconcept for on-site, monolithic 3D-printing. **Automation in Construction**, v. 107, 102933, 2019.

MOHAN, M.K., RAHUL, A.V., VAN TITTELBOOM, K., DE SCHUTTER, G., Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content, **Cement and Concrete Research**, v. 139, 106258, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106258>.

MOURA, A.; SÁ, M. V. V. A. Influência da racionalização e industrialização na construção sustentável. **Revista Tecnologia & Informação – Revista Científica da Escola de Engenharias e Ciências Exatas**. Universidade Potiguar, Natal, Ano 1, n.1, p 64-77, 2014.

NGO, T. D., KASHANI, A., IMBALZANO, G., NGUYEN, K. T. Q., HUI, D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges, **Composites Part B: Engineering**, vol. 143, pp. 172–196, 2018.

ONU – Organização das Nações Unidas. **The Vancouver Declaration On Human Settlements**. 1976. Disponível em: <https://www.un.org/en/conferences/habitat/vancouver1976> - Acesso em 20 abr. 2023.

PEGNA, J. Exploratory investigation of solid freeform construction, **Automation in Construction**, v. 5, p. 427–437, 1997.

PERROT, A., M'ELINGE, Y., RANGEARD, D., ESTELLE, P., LANOS, C., Extrusion Criterion for Firm Cement-Based Materials, AIP, **AIP Conference Proceedings**, 2008, pp. 96–98.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. 2001. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia de materiais) São Carlos: UFSCAR, 2001.

RADHARAMANAN, R. **Additive manufacturing in manufacturing education: a new course development and implementation**. 124th ASEE Annu 2017. Conf. Expo., vol (2017-June), 2017.

RAHUL, A.V.; SANTHANAM, M. Evaluating the printability of mortars containing lightweight coarse aggregates. **Cem. Mortar Compos.** 2020, 109, 103570.

ROUSSEL, N., Rheological requirements for printable concretes, **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 76–85, 2018. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.04.005.

RUBIO, M.; SONEBI, M.; AMZIANE, S. **3D printing of fiber cement-based materials: Fresh and rheological performances**. In Proceedings of the Second International Conference on Bio-based Building Materials, Clermont-Ferrand, France, 21–23 June 2017

SCHUTTER, G.D., LESAGE, K., MECHTCHERINE, V., NERELLA, V.N., HABERT, G., AGUSTI-JUAN, I. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials, **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 25–36, 2018.

SILVA MATEUS, R. F. M. **Avaliação da sustentabilidade da construção: propostas para o desenvolvimento de edifícios mais sustentáveis**. Minho: Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2009. (Tese de Doutorado). Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/9886>. Acesso em: 09 maio 2023.

SKIBICKI, S. et al. The effect of using recycled PET aggregates on mechanical and durability properties of 3D printed mortar. **Construction and Building Materials**, v. 335, 2022.

SOLANO, R. B. P. A importância da arquitetura sustentável na redução do impacto ambiental. Anais do Espaço Sustentável: Inovações em Edifícios e Cidades - NUTAU 2008. Disponível em: <http://www.usp.br/nutau/CD/28.pdf>. Acesso em: 09 maio 2023.

TAHMASEBINIA, F.; NIEMELÄ, M.; SEPASGOZAR, S.M.E.; LAI, T.Y.; SU, W.; REDDY, K.R.; SHIROWZHAN, S.; SEPASGOZAR, S.; MARROQUIN, F.A. Three-dimensional printing using recycled high-density polyethylene: Technological challenges and future directions for construction. **Buildings**, v. 8, 165, 2018.

TARHAN, Y.; ŞAHIN, R. Fresh and rheological performances of air-entrained 3d printable mortars. **Materials**, v. 14, n. 9, 2021.

TAY, Y.W. D., PANDA, B., PAUL, S. C., MOHAMED, N. A. N., TAN, M. J., LEONG, K. F. 3D printing trends in building and construction industry: a review. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 12, p. 261–276, 2017. doi: 10.1080/17452759.2017.1326724

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, 106968, 2019.

TAYLOR, F.W. **Princípios de Administração Científica**. São Paulo: Editora Atlas, 1999.

TIPOS DE IMPRESSORA 3D E SUAS APLICAÇÕES. Print It 3D, 2018. Disponível em: <<https://www.printit3d.com.br/post/tipos-de-impressora-3d>>. Acesso em: 09 de out. de 2023.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **A sustentabilidade dos materiais de construção**. 2. ed. Minho: TecMinho, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/28852>. Acesso em: 09 maio 2023.

TRINDADE, F. E. **Administração científica de Taylor e as “novas formas” de organização do trabalho: possibilidades de coexistência? Um estudo de caso na indústria têxtil catarinense**. 2004, 213f. Dissertação (Mestrado em administração) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis -SC, 2004.

TUDO SOBRE IMPRESSÃO 3D DE CONCRETO. Print It 3D, 2020. Disponível em: <<https://www.printit3d.com.br/post/tudo-sobre-impress%C3%A3o-3d-de-concreto>>. Acesso em: 09 de out. de 2023.

VALENCIA, N. World’s First 3D Printed Bridge Opens in Spain, 2017.

WANGLER, T., PILEGGI, R., GUREL, S., FLATT, R. A chemical process engineering look at digital concrete processes: critical step design, inline mixing, and scaleup. **Cement and Concrete Research**. 155. 106782. 2022. 10.1016/j.cemconres.2022.106782.

WENG, Y. et al. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 163, p. 600–610, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112>.

WENG, Y., LI, M., RUAN, S., WONG, T.N., TAN, M.J., OW YEONG, K.L., QIAN, S. Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach, **Journal of Cleaner Production**, v. 261, 121245, 2020.

WITHELL, A., DIEGEL, O., GRUPP, I., REAY, S., DE BEER, D., POTGIETER, J. (2011). **“Porous ceramic filters through 3D printing, innovative developments in virtual and**

physical prototyping,” in Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (Leiria: CRC Press), 313.

WOLFS, R., BOS, F., SALET, T., Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: numerical modelling and experimental testing, **Cement and Concrete Research**, v. 106, p. 103–116, 2018.

WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P.; SALET, T. A. M. Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 447-454, 2018.

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, p. 21–31, 2016. doi: 10.1016/j.autcon.2016.04.005.

XIA, M., NEMATOLLAHI, B., SANJAYAN, J. Printability, accuracy and strength of geopolymer made using powder-based 3D printing for construction applications, **Automation in Construction**, vol. 101, pp. 179–189, 2019.

XU, J., CHEN, M., ZHAO, Z., LI, L., WANG, S., HUANG, Y., ZHAO, P., GONG, C., LU, L., CHENG, X. “Printability and efflorescence control of admixtures modified 3D printed white Portland cement-based materials based on the response surface methodology”, **Journal of Building Engineering**, v. 38, 102208, 2021.

ZHANG, H.; XIAO, J. Plastic shrinkage and cracking of 3D printed mortar with recycled sand. **Construction and Building Materials**, v. 302, 2021.

ZHANG, Y.u., 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, p. 278–285, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061>.

ZHANG, Y., ZHANG, Y.S., LIU, G.J., YANG, Y.G., WU, M., PANG, B., Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink, **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 263–271, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115>.

ZOU, S., XIAO, J., DUAN, Z., DING, T., HOU, S. “On rheology of mortar with recycled fine aggregate for 3D printing”, **Construction and Building Materials**, v. 311, 125312, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125312>.