



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

LÍVIA FERNANDA SILVA

**MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES
DESENVOLVIDOS COM METACALIM E HPMC PARA
IMPRESSÃO 3D: INFLUÊNCIA NOS ASPECTOS DE
EXTRUDABILIDADE E CONSTRUTIBILIDADE**

LONDRINA
2023

LÍVIA FERNANDA SILVA

**MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES
DESENVOLVIDOS COM METACAULIM E HPMC PARA
IMPRESSÃO 3D: INFLUÊNCIA NOS ASPECTOS DE
EXTRUDABILIDADE E CONSTRUTIBILIDADE**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora.

Orientadora: Prof^a Dr^a Berenice Martins Toralles

Coorientadora: Prof^a Dr^a Luciana Cristina Soto Herek Rezende.

LONDRINA
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

S586m Silva, Livia Fernanda.
Materiais cimentícios suplementares desenvolvidos com metacaulim e HPMC para impressão 3D: influência nos aspectos de extrudabilidade e construtibilidade / Livia Fernanda Silva. - Londrina, 2023.
243 f. : il.

Orientador: Berenice Martins Toralles.

Coorientador: Luciana Cristina Soto Herek Rezende.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

Inclui bibliografia.

1. Materiais cimentícios impressos - Tese. 2. Materiais cimentícios sustentáveis - Tese. 3. Manufatura aditiva - Tese. 4. Adições - Tese. I. Toralles, Berenice Martins . II. Rezende, Luciana Cristina Soto Herek. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU 62

LÍVIA FERNANDA SILVA

**MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES
DESENVOLVIDOS COM METACAULIM E HPMC PARA
IMPRESSÃO 3D: INFLUÊNCIA NOS ASPECTOS DE
EXTRUDABILIDADE E CONSTRUTIBILIDADE**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Estadual
de Londrina, como requisito parcial à obtenção
do título de Doutora.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª Dr^ª Berenice Martins Toralles
Universidade Estadual de Londrina (UEL)

Prof^º. Dr^º Aron Lopes Petrucci
Universidade Estadual de Londrina (UEL)

Prof^ª Dr^ª Lisiane Ilha Librelotto
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Dr^º Nério Vicente Júnior
Empresa Next Chemical

Prof^ª Dr^º Ravindra Gettu
Indian Institute of Technology Madras

Londrina, 06 de abril de 2023.

DEDICATÓRIA

Ao André Luiz, Fernando, Léia, Lauriê e Lara, por serem esteio, amor e presença
constante em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me abençoar diariamente, por iluminar meu caminho e ser minha fortaleza. Pelo seu agir constante em minha vida. Por me capacitar nesta caminhada sendo fonte de ânimo e alegria.

Ao meu marido, André Luiz dos Reis, por ser esteio, pelo seu amor e calma. Pela paciência e compreensão nesta caminhada. Por me ouvir de forma atenta e buscar soluções para me ajudar. Por me incentivar e com amor me motivar a ser melhor.

Aos meus pais, José Fernando Silva e Léia Akucevikus Ferreira e Silva, por todo amor e dedicação. Por não medirem esforços para minha formação.

As minhas irmãs, Lauriê e Lara, por serem apoio, amor e calma, pela nossa união e por me ensinarem a ser um ser humano melhor diariamente.

À Prof. Berenice, pela pesquisadora e profissional exemplar. Por todo o aprendizado e seriedade no desenvolvimento desta pesquisa. Por toda confiança depositada, em que tive o privilégio de aprender com seus ensinamentos que levarei por toda a vida.

À Prof. Luciana, por todo o seu acolhimento e disponibilidade do maquinário de impressão 3D. Pelo seu profissionalismo, por sempre me apoiar e por não medir esforços por essa pesquisa.

Ao Maicon Douglas Leles da Silva, por todo o apoio e dedicação, pela sua amizade e proatividade. Por se deslocar e não medir esforços para execução dos ensaios para a operação do maquinário de impressão 3D.

À Monique de Brito Filgueiras, pela sua amizade, empatia e dedicação com a pesquisa. Por ser apoio e leveza em dias difíceis e por não medir esforços em auxiliar. Que possamos, juntas, desenvolver mais trabalhos aos longos dos anos.

A minha amiga-irmã Aline Almeida Inhoti, pelo profissionalismo e competência na correção textual desta tese e, sobretudo pela sua amizade e apoio. Pelo seu ouvir atento e sensível. Por me ensinar a cada dia a ser uma pessoa e profissional melhor.

Aos alunos do grupo de pesquisa da UEL: Ester Amorim, Gustavo Filla, Lauane Costa, Sara Souza e Pedro Santos pelo trabalho desenvolvido de forma conjunta, por toda dedicação e apoio ao longo desta pesquisa e por serem motivadores em diversos momentos.

Ao Gevanildo Alves, por toda dedicação, profissionalismo, disponibilidade e proatividade no desenvolvimento de ensaios e sobretudo pelo seu apoio e humanidade.

A toda equipe do SENAI e Instituto Senai de Inovação em Engenharia de Estruturas (ISI-EE), pela oportunidade profissional e aprendizado constante, por todo o atendimento e por possibilitar que fossem realizados os ensaios.

Ao departamento da UEM de Agronomia pela execução dos ensaios de caracterização do metacaulim, por todo apoio e profissionalismo dos professores Doutores Ivan Granemann de Souza Júnior e Antonio Carlos Saraiva da Costa.

Ao professor Eduardo Inocente Jussiani, por toda disponibilidade nos ensaios de microtomografia de raios-X e professor Francisco Cláudio Morato Leite, por todo auxílio e execução dos ensaios de propriedades mecânicas.

Ao Doutor Sílvio Marcucci, pelo seu apoio e dedicação na interpretação e correção dos ensaios de caracterização do metacaulim.

Ao Paulo Duarte, pela sua ajuda em relação a equação aplicada na metodologia na análise da taxa de deformação.

Ao meu amigo João Karlos Locastro pelas suas palavras de apoio e acolhimento durante esta caminhada. Por me motivar a ser melhor todos os dias.

Ao Anderson Sopena, pela amizade, viagens, pela doação de material de inglês e disponibilidade de equipe para a execução dos ensaios.

Às amigadas que fiz ao longo do programa: Francieli Pinto, Maria Fernanda Porto, Geovana Nogueira, Nicole Schwantes-Cezario Gerson Sandoval, Adriana Challiol, Tainara Quadros e Mariana Fabiche pelo apoio e troca de conhecimento durante esta caminhada.

A MC Química pela doação do aditivo retentor HPMC. Em especial a Cecília Silva por todo o atendimento e disponibilidade. E a Instituto Cesumar de Ciência e Tecnologia (ICeTI) pela doação de cimento e areia.

À Lilian Keylla Berto por possibilitar o contato inicial com o maquinário de impressão 3D.

Ao Bruno Mazetto pela disponibilidade de empréstimo de equipamento.

A banca examinadora, Prof. Dr. Aron Petrucci, Prof^a Dr^a Lisiane Librelotto e Prof. Dr. Ravindra Gettu pela leitura atenciosa e valiosas contribuições nesta tese.

Aos amigos e professores do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime,
pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.

(Josué 1:9)

RESUMO

A construção civil vem sofrendo transformações por meio do emprego de ferramentas e processos capazes de impulsionar o setor, tais como o da manufatura aditiva (MA). A impressão 3D é um modelo de (MA) que apresentou crescimento considerável nos últimos anos, sendo que para a difusão desta tecnologia alguns desafios devem ser sanados, dentre eles o desenvolvimento de materiais cimentícios considerados extrudáveis, construtivos e sustentáveis. Dentre as adições utilizadas, o metacaulim (MC) é considerado promissor por promover a construtibilidade e potencializar as propriedades mecânicas. Assim, esta tese teve como objetivo analisar os efeitos de materiais cimentícios desenvolvidos para impressão 3D com adição de (MC) nas porcentagens de 0%, 5%, 10% e 30% em substituição a massa de cimento e adição de 0,3% de aditivo químico hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) quanto aos aspectos de extrudabilidade, construtibilidade e propriedades mecânicas. Para isso, a Campanha Experimental desta pesquisa foi dividida em quatro Estudos, sendo o estudo A relacionado aos ensaios de consistência normal, início e fim de pega e retenção de água e os Estudos B, C e D relacionados aos ensaios de extrudabilidade, construtibilidade e propriedades mecânicas por meio da extrusão de materiais cimentícios em impressora 3D de bancada, com vazão constante de 2,46 L/min, velocidade de 50 mm/s e volume do misturador de 90 Litros. Os resultados obtidos demonstraram que todos os materiais cimentícios foram considerados extrudáveis, com camadas contínuas, bordas visíveis e com coeficientes de variação (CV) referentes as larguras das camadas menores que 10%, em que se constatou uma baixa variabilidade e potencial construtivo. Em relação a construtibilidade foi possível a sobreposição de até quatro camadas contínuas com comprimentos de 1600 mm e de 2400 mm em aproximadamente 1 hora, em que foram observados maior predominância de vincos nos materiais cimentícios conforme o aumento de (MC). O aumento da porcentagem de (MC) nos materiais cimentícios ocasionou menores resultados de deformações nas camadas. Com os resultados de propriedades mecânicas foi possível concluir que a maior porcentagem de (MC) aumentou a resistência à tração na flexão, de compressão e aderência entre camadas. E que menores resultados de resistência a tração na flexão e de aderência entre camadas foram obtidos para o material cimentício com maior predominância de umidade superficial. Conclui-se que a adição de (MC) e de HPMC promoveu misturas cimentícias extrudáveis, construtivas e sustentáveis, sendo consideradas promissoras para serem aplicadas a impressão 3D.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Adições. Materiais cimentícios impressos. Materiais cimentícios sustentáveis.

ABSTRACT

The construction industry has been undergoing transformations through the use of tools and processes capable of boosting the sector, such as additive manufacturing (AM). 3D printing is a model of AM that has shown considerable growth in recent years, and for the diffusion of this technology, some challenges must be overcome, among them the development of cementitious materials considered extrudable, constructive, and sustainable. Among the additives used, metakaolin (MK) is considered promising for promoting constructability and enhancing mechanical properties. Thus, this thesis aimed to analyze the effects of cementitious materials developed for 3D printing with the addition of MK in percentages of 0%, 5%, 10%, and 30% by replacing the mass of cement and adding 0.3% of the chemical additive hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) regarding extrudability, constructability, and mechanical properties. To do so, the Experimental Campaign of this research was divided into four Studies, with Study A related to normal consistency tests, setting time, and water retention, and Studies B, C, and D related to extrudability, constructability, and mechanical properties through the extrusion of cementitious materials in a desktop 3D printer, with a constant flow rate of 2.46 L/min, a speed of 50 mm/s, and a mixer volume of 90 liters. The results showed that all cementitious materials were considered extrudable, with continuous layers, visible edges, and coefficient of variation (CV) of layer widths less than 10%, indicating low variability and constructive potential. Regarding constructability, it was possible to overlap up to four continuous layers with lengths of 1600 mm and 2400 mm in approximately 1 hour, where greater predominance of grooves was observed in cementitious materials as the amount of MK increased. The increase in the percentage of MK in cementitious materials resulted in lower deformation results in the layers. With the results of mechanical properties, it was possible to conclude that the higher percentage of MK increased flexural strength, compression, and interlayer adhesion. And that lower results of flexural strength and interlayer adhesion were obtained for the cementitious material with a greater predominance of surface moisture. It is concluded that the addition of MK and HPMC promoted extrudable, constructive, and sustainable cementitious mixtures, considered promising for 3D printing applications.

Keywords: Additive manufacturing. Additions. Printed cementitious materials. Sustainable cementitious materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da revisão sistemática utilizada nesta pesquisa	27
Figura 2 – Etapas de resultados da revisão sistemática utilizadas nesta pesquisa.....	30
Figura 3 – Fluxograma dos tópicos abordados na revisão bibliográfica desta pesquisa	36
Figura 4 – Evolução dos projetos de impressão 3D a nível mundial	39
Figura 5 – Publicações referentes à impressão 3D na construção civil (1997-2016).....	40
Figura 6 – Método de extrusão pelo método <i>Contour Crafting</i>	42
Figura 7 – Impressão 3D no método <i>D-Shape</i>	43
Figura 8 – Impressão 3D no método <i>Concrete Printing</i>	44
Figura 9 – Impressão 3D – Objetos impressos pelo método <i>Contour Crafting, D-Shape e Concrete Printing</i>	45
Figura 10 – Edificações no método <i>Contour Crafting</i> da empresa chinesa Winsun.....	46
Figura 11 – Projeto para moradias populares por meio do método <i>Contour Crafting</i> ...	47
Figura 12 – Edificação produzida pela empresa <i>ApisCor</i>	47
Figura 13 – Edificação produzida pela empresa <i>ApisCor</i>	48
Figura 14 - Casa em impressão 3D da ICON localizada nos EUA	49
Figura 15 – Comunidade de casas impressas no México	49
Figura 16 – Casa em impressão 3D da SQ4D, EUA	50
Figura 17 – Casa impressa da 3D PrintedHouse, Holanda.....	51
Figura 18 - Construções impressas pela italiana Wasp	51
Figura 19 – Primeira casa em impressão 3D do Brasil.....	52
Figura 20 – Etapas do processo de impressão 3D utilizando materiais cimentícios	59
Figura 21 – Número de publicações de pesquisas com materiais cimentícios aplicados a impressão 3D	60
Figura 22 –Publicações e revistas com pesquisas sobre o desenvolvimento de materiais cimentícios aplicados a impressão 3D.....	61
Figura 23 – Percentual dos cimentos utilizados para impressão 3D	62
Figura 24 - Resultados de análise térmica diferencial na formação de produtos de hidratação cimentícia em diferentes porcentagens de HPMC	75
Figura 25 - Tixotropia em materiais cimentícios impressos.....	79
Figura 26 - Extrudabilidade em material cimentício impresso.....	84
Figura 27 - Continuidade e coesão na extrudabilidade.....	85
Figura 28 – Ensaio de mesa de abatimento e squeeze flow.....	90
Figura 29 - Sobreposição de camadas com diferentes teores de argila	94
Figura 30 – Parede construída com camadas sobrepostas.....	95
Figura 31 - Extrusão de camadas em diferentes tempos – janela de impressão	96
Figura 32 - Aparelho de teste de cilindro	97
Figura 33 -Ligação entre camadas	98
Figura 34 – Análise da perda de umidade nas camadas impressas em diferentes tempos	105
Figura 35 - Resultados da resistência entre camadas em diferentes velocidades.....	106
Figura 36 -Umidade superficial nas camadas impressas com adição de nanoargila	107

Figura 37 -Imagem digital e térmica de infiltração em laje	109
Figura 38 -Imagem térmica de painel fotovoltaico	110
Figura 39 -Imagem térmica de edificações.....	111
Figura 40 -Imagens da capela.....	111
Figura 41 - Fluxograma da campanha experimental utilizada nesta pesquisa	115
Figura 42 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	118
Figura 43 - Ensaio de difratometria de raio x (MC).....	120
Figura 44 - Isotermas de adsorção e dessorção (MC)	121
Figura 45 - Ensaio de difratometria de raio X (MC).....	122
Figura 46 - HPMC em pó	123
Figura 47 - Cadeia molecular do HPMC	124
Figura 48 - Descrição do Estudo A adotado nesta pesquisa.....	128
Figura 49 - Descrição da metodologia do Estudo B para as argamassas arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC	131
Figura 50 - Descrição da metodologia do Estudo B para a argamassa arg_MC_30_HPMC	133
Figura 51 - Ensaio de consistência em argamassa após a extrusão.	134
Figura 52 – Sistema de impressão 3D de bancada da impressora 3D utilizada nesta pesquisa	135
Figura 53 - Sistema de impressão 3D.....	137
Figura 54 - Bico extrusor da impressora 3D utilizada nesta pesquisa.....	138
Figura 55 - Análise da argamassa por meio do teste da mão	139
Figura 568 - Metodologia adotada para realização do ensaio de extrudabilidade.....	140
Figura 57 – Metodologia do Estudo C adotada nesta pesquisa	144
Figura 58 - Coleta da amostra para ensaio de densidade de massa	145
Figura 59 - Sólido 3D obtido por meio do ensaio de construtibilidade.....	147
Figura 60 - Procedimento para análise da taxa de deformação e (CV) das camadas ...	149
Figura 61 - Execução do ensaio de construtibilidade - fotografias e medidas	150
Figura 62 - Página inicial do software Image J	151
Figura 63 - Calibração das imagens	152
Figura 64 – Inserção da escala na imagem	153
Figura 65 – Demarcação da reta na camada para cálculo da área	154
Figura 66 – Demarcação da área	155
Figura 67 - Imagem da camada com área demarcada	156
Figura 68 – Comando para o cálculo da área das camadas no software	157
Figura 69 - Câmera termográfica utilizada nesta pesquisa.....	158
Figura 70 - Execução e imagem obtida por meio da câmera termográfica	159
Figura 71 - Descrição do Estudo D adotado nesta pesquisa.....	162
Figura 72 - Região de corte do corpo de prova para ensaio em microtomografia	164
Figura 73 - Resultados de retenção de água e teor de ar incorporado em argamassas .	169
Figura 74 - Resultados de densidade de massa em argamassas ensaiadas	171
Figura 75 - Resultados obtidos referentes aos tempos de misturas da arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC	175

Figura 76 - Resultados obtidos referentes aos tempos de mistura da arg_MC_30_HPMC	177
Figura 77 - Resultados de consistência antes e após a extrusão das camadas.....	178
Figura 78 - Imagens da primeira camada extrudada das argamassas ensaiadas.....	180
Figura 79 - Camadas extrudadas das argamassas arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC	185
Figura 80 - Resultados das médias das larguras das camadas	190
Figura 81 - Resultados das médias das alturas das camadas	191
Figura 82 - Resultados de consistência antes e após extrusão das argamassas	196
Figura 83 - Resultados de densidade de massa antes e após extrusão das argamassas	197
Figura 84 - Resultados - ensaio de construtibilidade.....	198
Figura 85 - Largura das camadas (n=4 para a arg_HPMC e arg_MC_10_HPMC e n=3 para a arg_MC_30_HPMC)	201
Figura 86 - Altura das camadas (n=4 para a arg_HPMC e arg_MC_10_HPMC e n=3 para a arg_MC_30_HPMC)	202
Figura 87 - Resultados - taxas de deformação da primeira camada das argamassas ensaiadas.....	203
Figura 88 - Resultados da taxa de deformação da segunda camada.....	205
Figura 89 - Resultados - Taxa de deformação da terceira camada.....	206
Figura 90 - Imagens termográficas da primeira camada das argamassas ensaiadas	208
Figura 91 - Imagens termográficas das camadas sobrepostas das argamassas ensaiadas	210
Figura 92 - Imagens termográficas das seções das camadas extrudadas.....	212
Figura 93 – Médias dos corpos de prova em camadas ensaiados a resistência à tração na flexão aos 63 dias	216
Figura 94 – Média dos corpos de prova em camadas ensaiados a resistência à compressão aos 63 dias	217
Figura 95 – Média dos corpos de prova em camadas ensaiados à aderência entre camadas aos 165 dias.....	218
Figura 96 – Porosidade total e na faixa da interface da arg_HPMC aos 165 dias.....	220
Figura 97 - Porosidade total e na faixa da interface da arg_MC_10_HPMC aos 165 dias	221
Figura 98 - Porosidade total e na faixa da interface da arg_MC_30_HPMC aos 165 dias	222

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações cimento OPC Tipo I.....	62
Tabela 2 - Especificações do cimento CP II F 40	117
Tabela 3 - Granulometria do agregado miúdo.....	117
Tabela 4 - Ensaio e resultados do agregado miúdo.....	118
Tabela 5 - Especificações do metacaulim (MC).....	119
Tabela 6 - Especificações de (HPMC)	123
Tabela 7 – Proporção dos materiais para as pastas do Estudo A.....	125

Tabela 8 – Proporção dos materiais para as argamassas do Estudo A	125
Tabela 9 - Proporção dos materiais para as argamassas do Estudo B	126
Tabela 10 - Proporção dos materiais para as argamassas do Estudo C e D	126
Tabela 11 - Planejamento experimental do Estudo A	130
Tabela 12 - Especificações técnicas do sistema de impressão 3D utilizado nesta pesquisa	136
Tabela 13 - Planejamento experimental do Estudo B utilizado nesta pesquisa.....	142
Tabela 14 - Planejamento experimental do Estudo C	160
Tabela 15 – Especificações do Microtomógrafo para ensaio	163
Tabela 16 - Planejamento experimental do Estudo D adotado nesta pesquisa.....	164
Tabela 17 - Resultados consistência normal e início e fim de pega em pastas cimentícias	166
Tabela 18 - Relações água/cimentícios das argamassas.....	173
Tabela 19 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) da largura e altura da primeira camada das argamassas ensaiadas.....	182
Tabela 20 - Análise dos critérios de extrudabilidade da primeira camada das argamassas ensaiadas.....	183
Tabela 21 - Resultados do ensaio da janela de impressão.....	188
Tabela 22 - Coeficiente de variação (CV) da primeira camada das argamassas ensaiadas em ordem crescente	192
Tabela 23 - Relações água/cimentícios das argamassas ensaiadas.....	195
Tabela 24 - Construtibilidade (600 x 600 mm)	200
Tabela 25 - Resultados das taxas de deformação das camadas extrudadas.....	207

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultados de depósitos de patentes – INPI.....	54
Quadro 2 – Misturas aplicadas à impressão 3D	56
Quadro 3 – Agregados e traços da literatura científica utilizados para o desenvolvimento de misturas.....	64
Quadro 4 – Efeitos das adições aplicadas em materiais cimentícios de impressão 3D..	66
Quadro 5 - Definições da literatura científica sobre extrudabilidade.....	80
Quadro 6 - Critérios para verificação da qualidade de impressão em materiais cimentícios impressos.....	81
Quadro 7 – Análise da extrudabilidade	82
Quadro 8 - Procedimentos e resultados em estado fresco de misturas desenvolvidas aplicadas a impressão 3D	86
Quadro 9 - Definições apresentadas na literatura sobre construtibilidade	91
Quadro 10 – Análise dos ensaios em relação aos procedimentos e resultados obtidos - construtibilidade	92
Quadro 11 - Ensaio mecânicos no estado endurecido.....	100
Quadro 12 - Procedimento de mistura de materiais cimentícios.....	127

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	19
1.2	JUSTIFICATIVA	22
1.2.1	RELEVÂNCIA DO TEMA	25
1.2.2	LACUNA DO CONHECIMENTO E ASPECTOS DE INEDITISMO	25
1.3	HIPÓTESE DE PESQUISA	31
1.4	QUESTÃO DE PESQUISA	31
1.5	OBJETIVOS	31
1.5.1	OBJETIVO GERAL	31
1.5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
1.6	DELIMITAÇÃO DE PESQUISA	32
1.7	DEFINIÇÃO DOS PRINCIPAIS TERMOS	32
1.8	ESTRUTURA DA TESE	33
1.9	TRABALHOS E PARCERIAS DO GRUPO DE PESQUISA DA UEL	34
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	36
2.1	IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL	37
2.1.1	CONTEXTO HISTÓRICO	37
2.1.2	APLICAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO	45
2.2	MATERIAIS CIMENTÍCIOS APLICADOS A IMPRESSÃO 3D	55
2.2.1	Cimento Portland	60
2.2.2	AGREGADO	63
2.2.3	ADIÇÕES MINERAIS	65
2.2.4	ADITIVOS QUÍMICOS	71
2.3	ASPECTOS REOLÓGICOS	76
2.3.1	TAXA DE ESTRUTURAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS APLICADOS A IMPRESSÃO 3D (ATHIX)	78
2.4	EXTRUDABILIDADE E ENSAIOS	80
2.4	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	86
2.5	CONSTRUTIBILIDADE E ENSAIOS	91
2.6	UMIDADE SUPERFICIAL	103
2.6.1	Análise de temperatura e umidade por termografia infravermelha	108
3	MATERIAIS E MÉTODOS	113
3.1	MATERIAIS	116

3.1.1	DESENVOLVIMENTO DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS	124
3.1.2	MISTURA E MOLDAGEM	126
3.2	ESTUDO A	128
3.2.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	130
3.3	ESTUDO B.....	130
3.3.1	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	134
3.3.2	ANÁLISE DA EXTRUDABILIDADE - PRIMEIRA CAMADA.....	135
3.3.3	JANELA DE IMPRESSÃO	141
3.3.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	142
3.4	ESTUDO C.....	143
3.4.1	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	145
3.4.2	DENSIDADE DE MASSA	145
3.4.3	CONSTRUTIBILIDADE	146
3.4.3.1	ENSAIO DE SOBREPOSIÇÃO DE CAMADAS	146
3.4.3.2	TAXA DE DEFORMAÇÃO POR MEIO DA ANÁLISE DE IMAGEM.....	148
3.4.3.3	UMIDADE SUPERFICIAL POR TERMOGRAFIA	158
3.4.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	160
3.5	ESTUDO D	161
3.5.1	ENSAIO DE MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X (μ -CT).....	163
3.5.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	164
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	165
5.1	ESTUDO A	165
4.1.1	ENSAIO EM PASTAS – CONSISTÊNCIA NORMAL E INÍCIO E FIM DE PEGA.....	166
4.1.2	ENSAIO EM ARGAMASSAS - RETENÇÃO DE ÁGUA, TEOR DE AR INCORPORADO E DENSIDADE DE MASSA	169
4.1.3	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO ESTUDO A.....	171
5.2	ESTUDO B.....	172
4.2.1	TEMPOS DE MISTURAS, CONSISTÊNCIA E QUANTIDADE DE CAMADAS EXTRUDADAS	174
4.2.3	ANÁLISE DA EXTRUDABILIDADE – PRIMEIRA CAMADA	180
4.2.4	ENSAIO - JANELA DE IMPRESSÃO.....	184
4.2.5	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS ESTUDO B	193
4.3	ESTUDO C.....	195
4.3.1	CONSTRUTIBILIDADE EM ARGAMASSAS	198
4.3.2	ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DE CAMADAS POR MEIO DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....	203
4.3.3.	ANÁLISE DA UMIDADE SUPERFICIAL POR TERMOGRAFIA.....	207
4.3.4	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO ESTUDO C.....	213
4.4	ESTUDO D	215
4.4.1	RESULTADOS – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	215

4.4.2 RESULTADOS – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	217
4.4.3 RESULTADOS – ENSAIO DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS.....	218
4.4.4 RESULTADOS – MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X (μ CT).....	219
4.4.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO ESTUDO D.....	223
5 CONCLUSÕES.....	224
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	226
REFERÊNCIAS	228

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias que visam o aumento de produtividade e diminuição de impactos ambientais tem recebido atenção de pesquisadores em diferentes países, visto que tais tecnologias poderão promover avanços nos mais variados setores, incluindo o da construção civil.

As tecnologias aplicadas ao setor da construção civil, juntamente com uso de ferramentas que unem a fabricação por meio da programação digital, poderão proporcionar uma construção industrializada, sendo que, dentre elas, a impressão 3D é considerada como um exemplo de tecnologia que se tornou disruptiva por si só (PRENTICE, 2014). Pegna (1997) justifica essa disruptividade devido ao processo que envolve a construção de elementos pela adição de material de forma automatizada.

Por definição, a impressão 3D possibilita que objetos sólidos sejam ‘impressos’ a partir de um modelo digital, estabelecendo sucessivas camadas de material. As impressoras 3D foram inicialmente utilizadas em ambientes industriais para produzir e refinar protótipos, também conhecidos como prototipagem rápida (PAUL *et al.*, 2017).

Existem inúmeras vantagens do desenvolvimento de tecnologia 3D, tais como os menores custos, os processos de construção sustentáveis, o uso de matérias-primas com baixa energia incorporada, o número reduzido de acidentes de trabalho e a economia de tempo (HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016; MARCHON *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2021). Ainda, a construção digital também pode ser uma resposta para unidades habitacionais em quantidades elevadas, sugerindo que não é somente uma tecnologia que se destina a países economicamente desenvolvidos (BHATTACHERJEE *et al.*, 2021).

É diante das vantagens expostas que a impressão 3D aplicada na construção civil pode ser desenvolvida por meio de um processo ecologicamente correto pela inserção de matérias-primas recicladas, como exemplos tem-se os resíduos de construção e industriais, que possibilitam minimizar a geração de resíduos (SOUZA *et al.*, 2021). A inserção de resíduos industriais em materiais cimentícios vai ao encontro de estratégias sustentáveis visto que, para cada tonelada de cimento produzido, são emitidos 0,9 tonelada de CO₂ na atmosfera. Dessa forma, a produção de cimento é uma das maiores fontes

de emissão de CO₂, estando entre 5 a 7% de todo o CO₂ emitido no ambiente (BENHELAL *et al.*, 2013).

Em termos do desenvolvimento dos materiais aplicados à impressão 3D, a proporção de cimento para agregado é consideravelmente maior do que a dosagem do concreto convencional para atingir a capacidade de impressão necessária. Isso pode levar a um aumento considerável do custo, assim como forma de mitigação, são utilizadas diferentes adições: metacaulim, cinzas volantes, sílica ativa, filer calcário e escória de alto-forno como substitutos parciais do cimento (HOU *et al.*, 2020). Dentre essas adições, destaca-se o metacaulim, que devido a sua atividade pozolânica, pode melhorar a construtibilidade quando utilizado em materiais cimentícios aplicados a impressão 3D (CHEN *et al.*, 2020a).

No Brasil, ainda há poucas empresas dedicadas à extração e à fabricação do metacaulim, mas o mercado nacional já se posiciona entre os cinco maiores do mundo. Estima-se que 75% das empresas relacionadas à produção de cimento e concreto no Brasil utilizem o metacaulim. O potencial da adição mineral é devido à relação custo-benefício do metacaulim, que geralmente, é utilizado de forma reduzida quando comparado a outras pozolanas, o que o torna altamente competitivo (GALLO, 2012). Esta competitividade é decorrente do impacto sustentável, isto porque em relação à produção do metacaulim, para se produzir 1 kg de argila calcinada são emitidas 0.25 a 0.37 kg de CO₂, valores baixos quando comparados ao da produção de cimento, que é de cerca de 1kg (HUANG *et al.*, 2017).

Em relação a disponibilidade de metacaulim no País, as reservas brasileiras de caulim estão localizadas, quase na sua totalidade, na região norte, mais especificamente nos Estados do Pará, Amapá e Amazonas. Caracterizam-se por serem constituídas de depósitos secundários que ocorrem a partir da erosão e deposição dos depósitos primários em grandes bacias (BARATA, 2007; BARATA e ANGÉLICA, 2012).

O metacaulim é uma das pozolanas comumente usadas nas indústrias de cimento e concreto devido as suas características e pelo fato de estar entre os minerais mais abundantes. (KOCÁK, 2020). Dessa forma, para aquelas regiões em que a argila de caulim está disponível, a produção de metacaulim é uma opção interessante, uma vez que reduziria a quantidade de CO₂ emitida para a atmosfera e melhoraria o desempenho do material cimentício (KHATIB; BAALBAKI; ELKORDI, 2018).

Em relação ao desempenho de materiais cimentícios aplicados à impressão 3D, a adição de metacaulim (MC) promove melhorias na tixotropia, sendo considerada

benéfica para a construtibilidade (CHEN *et al.*, 2020b). Além de que, em proporção de substituição adequada à adição, promove o aumento da resistência à compressão e flexão e reduz a retração e a permeabilidade (HOU *et al.*, 2020).

Além dos requisitos do material cimentício, de acordo com Paul *et al.* (2017), há algumas preocupações sobre as propriedades de objetos impressos, isto porque o processo de fabricação é diferente do método convencional. De um lado, na construção tradicional, o elemento estrutural é definido por meio do lançamento do concreto em um molde, por outro lado, na impressão 3D, a extrusão em camadas é um dos fatores que definem a forma, o que torna as propriedades do concreto no estado fresco importantes.

Atualmente, inovações em processo de impressão e desenvolvimento de novos materiais estão em constante desenvolvimento, mas além dos requisitos adicionais definidos pela nova tecnologia, o material cimentício enfrenta problemas inerentes ao seu design de mistura, independente do procedimento (VAN DER PUTTEN *et al.*, 2019).

Dessa forma, conhecer as propriedades em estado fresco possibilitará o controle do material aplicado à impressão 3D e, com isso, permitirá superar dificuldades relacionadas à tecnologia, como a não existência de regulamentação no mercado brasileiro, de essencial importância por possibilitar ao consumidor segurança sobre o produto adquirido, e ao responsável técnico subsídios em sua responsabilização civil (FLORÊNCIO, 2017).

De acordo com Schutter *et al.* (2018), a transformação de materiais cimentícios em materiais impressos é um desafio, considerando que as tecnologias que utilizam fôrmas possuem abordagens diferentes quando comparadas à manufatura aditiva. O material cimentício deve apresentar ganho de resistência relativamente rápido e tensão de escoamento suficiente (KHALIL *et al.*, 2017; HOU *et al.*, 2020) para que as camadas inferiores não se deformem ao receber as cargas das camadas superiores (KHALIL *et al.*, 2017).

Assim, a evolução da resistência inicial denominada de taxa de estruturação (Athix) dos materiais cimentícios apresenta-se como uma perspectiva interessante para o desenvolvimento dos concretos empregados na impressão 3D, especificamente para o controle dos parâmetros necessários para a extrudabilidade do material antes, durante e após a impressão (RUBIN, 2021).

Em relação à construtibilidade, Van der Putten *et al.* (2019) relatam que o material cimentício impresso deve ter viscosidade suficiente e não entrar em pega

rapidamente, sendo obtido em sua pesquisa um resultado de 210 minutos, de forma a possibilitar a aderência entre as camadas. Além disso, o material ao ser depositado sofre perda de umidade superficial nas interfaces e nas extremidades e este aspecto pode afetar a durabilidade do elemento impresso.

Como forma de minimizar a perda de água em materiais cimentícios são utilizados aditivos retentores de água, tais como o aditivo hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) que promovem melhorias na hidratação cimentícia e nas propriedades mecânicas (MARLIERE *et al.*, 2012). Em sua pesquisa com material cimentício aplicado à impressão 3D com HPMC, Chen *et al.* (2020c) observaram retardo na hidratação cimentícia devido a adsorção de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e precipitação de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Diante das considerações acerca da aplicação da tecnologia de impressão 3D aplicada na construção civil somadas às problemáticas que o material cimentício enfrenta no seu design de mistura, esta pesquisa propõe desenvolver materiais cimentícios promissores para aplicação na impressão 3D com metacaulim (MC) e (HPMC), através da análise dos efeitos em diferentes porcentagens - 0, 5, 10 e 30% de (MC) em substituição da massa de cimento e sua relação com os aspectos de extrudabilidade, construtibilidade e propriedades mecânicas.

A seguir, apresenta-se a justificativa da pesquisa, pautada no desenvolvimento de materiais cimentícios aplicados a impressão 3D. Logo após, tem-se a relevância do tema, lacuna do conhecimento e o ineditismo do trabalho.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os materiais cimentícios desenvolvidos à base de cimento constituem um dos principais pilares para o sucesso da impressão 3D em edificações. O desenvolvimento de materiais cimentícios que tenham fluidez, capacidade de extrusão adequadas e possibilitem a construtibilidade é um desafio significativo para aplicação na indústria da construção e tem sido tema de pesquisas durante os últimos anos (KHAN; SANCHEZ; ZHOU, 2020).

No cenário brasileiro, observa-se a necessidade de investimento em pesquisas voltadas para a impressão 3D na construção civil. Tay *et al.* (2017), em trabalhos nas plataformas *Web of Science* e *Science Direct*, relativos à impressão 3D com materiais cimentícios, constataram que o Brasil ocupa o 13º lugar, em número de publicações, com um total de menos de 5 publicações em 20 anos.

Zuo *et al.* (2019) salientam que a utilização da tecnologia de impressão 3D em edificações em escala real é considerada um processo de fabricação automatizado, que enfrenta enormes desafios como, por exemplo, imprimir edifícios pode demandar erros devido aos modelos de projetos 3D e, com isso, ocasionar perdas por desconhecimento dos parâmetros de impressão.

Ao contrário do processo de construção convencional, as edificações feitas pela tecnologia de impressão 3D são desenvolvidas através de extrusão de camadas sobrepostas, sem a necessidade de utilização de fôrmas. Dessa maneira, faz-se necessário a investigação das propriedades reológicas e de endurecimento dos materiais cimentícios utilizados, uma vez que a fluidez, propriedades reológicas e tempo em aberto são considerados propriedades críticas para controlar a capacidade de bombeamento, extrudabilidade e construtibilidade do material cimentício (ZHANG *et al.*, 2019b).

Devido à ausência de formas, as camadas não são protegidas, resultando na evaporação da água nas superfícies de concreto. Esta perda precisa ser neutralizada pela água presente no interior da mistura de cimento. No entanto, se a água não for suficiente para cobrir todas as partículas da superfície, a pressão capilar irá se desenvolver devido à formação de meniscos de água nos poros e ocasionar fissuras (VAN DER PUTTEN *et al.*, 2019). Como forma de melhorar essa perda de água, são utilizados aditivos poliméricos e retentores nas misturas cimentícias, como os éteres de celulose (PATURAL *et al.*, 2011).

Para Poinot; Govin e Grosseau (2013), a retenção de água é uma propriedade que limita a absorção da água de amassamento pelo substrato e assim confere propriedades mecânicas e adesivas em materiais cimentícios. Os éteres de celulose, como hidroxietilmetilcelulose (HEMC) e (HPMC), são considerados exemplos de retentores de água (PATURAL *et al.*, 2011; POURCHEZ *et al.*, 2006).

Em materiais cimentícios desenvolvidos com HPMC, o mecanismo de retenção de água está relacionado pela capacidade de alterar os canais de migração, reduzindo a perda de água, provocando aumento de coesão (CHEN *et al.*, 2020d). E, ao se utilizar o HPMC com argila calcinada em materiais cimentícios para impressão 3D verificou-se melhora na construtibilidade e redução da consistência. (CHEN *et al.*, 2020c).

Já em relação ao processo de sobreposição do material, um dos principais obstáculos são as ligações fracas nas interfaces das camadas. Este fato é decorrente de alguns fatores, como os pontos vazios devido à fabricação das camadas, os intervalos de tempo entre as deposições e a mistura heterogênea do material cimentício (MARCHMENT;

SANJAYAN e XIA, 2019). De acordo com Sanjayan *et al.* (2018), um dos principais fatores que afetam a resistência entre camadas é a umidade na superfície. Se a superfície está seca, conseqüentemente o material cimentício não apresenta trabalhabilidade para o desenvolvimento da ligação. Dessa forma, a existência de umidade é necessária para promover a ligação entre camadas e garantir a trabalhabilidade do material cimentício.

Em relação ao panorama brasileiro, é notório que existem diversos desafios a serem sanados para a difusão da impressão 3D. De forma inicial, pode-se citar o desenvolvimento de materiais cimentícios a partir de materiais comerciais vendidos nacionalmente, tais como os tipos de cimento de forma a viabilizar a tecnologia em termos de produtividade e de custo.

Dentre os cimentos utilizados no desenvolvimento de materiais aplicados na impressão 3D, tem-se o cimento sulfoaluminoso que apresenta algumas características favoráveis à sua aplicação, a saber: o tempo de pega inicial, alta resistência nas primeiras idades e desenvolvimento contínuo da resistência ao longo do tempo. (JIANCHAO; FARIED; WENGANG, 2017). Porém, este cimento não é comercializado no Brasil, por isso seu uso é, de certa forma, inviabilizado.

Devido a não comercialização de alguns cimentos, torna-se importante estudar a substituição ou adequação dos cimentos comerciais a fim de se obter características que possibilitem a aplicação da impressão 3D. Uma das possibilidades de desenvolver cimentos com características semelhantes ao cimento sulfoaluminoso é por meio de adições, a exemplos cinza volante e metacaulim (KOCAK, 2020; HAN *et al.*, 2017).

O (MC) é usado como material pozolânico em material cimentício e concreto e exibe considerável influência no aumento das propriedades mecânicas em idades iniciais e em durabilidade. Em estado fresco, o uso de (MC), em substituição parcial ao cimento, pode reduzir a taxa de difusão de cloreto através da hidratação cimentícia (SIDDIQUE, 2009).

Os compostos químicos do (MC) são sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) e grande parte das suas partículas são menores que $16\mu\text{m}$. Com essas características físico-químicas, observa-se a redução na consistência, alterações na tixotropia e aumento no tempo de início de pega de concretos aplicados na impressão 3D (HOU *et al.*, 2020). De acordo com Chen *et al.* (2020a), a adição de (MC) com diferentes teores de calcinação em argamassas aumentou a consistência, melhorou a capacidade construtiva, no entanto, levou ao aumento de vazios na região de interface das camadas impressas.

Assim, observa-se a relevância de estudos aprofundados que abordem a tecnologia dos materiais cimentícios aplicados à impressão 3D com adição de (MC) e de (HPMC) e sua relação com os aspectos de extrudabilidade, construtibilidade e propriedades mecânicas.

1.2.1 Relevância do tema

Conforme observa-se na revisão bibliográfica desta tese, vários pesquisadores, investigam diferentes tipos de misturas a fim de obter um concreto imprimível, levando em consideração as vantagens do concreto autoadensável e do projetado, simultaneamente (VAN DER PUTTEN *et al.*, 2019). Tem-se que a seleção dos principais materiais utilizados para a tecnologia de impressão 3D tornou-se um desafio devido à sua influência no desempenho mecânico e no processo de impressão das estruturas (HOU *et al.*, 2020).

No entanto, antes que qualquer revolução se torne uma nova prática, há um período de estudo e otimização, e os pesquisadores se depararam com os requisitos conflitantes que o material deve atender o fluxo na tubulação, no bico extrusor e possibilitar a construtibilidade (VAN DER PUTTEN *et al.*, 2019).

Em termos reológicos, o uso de argilas como adição às misturas cimentícias promove diversas alterações, tais como o aumento de resistência inicial em estado fresco, diminuição da fluidez, superfícies com menores vincos e estabilidade da forma (VOIGT *et al.*, 2010). Sendo que os efeitos de diferentes porcentagens de argila calcinada (metacaulim) no comportamento do material no estado fresco e no desenvolvimento da resistência nas primeiras idades deve ser melhor explorado. (CHEN *et al.*, 2019).

Neste contexto, o estudo de diferentes porcentagens de (MC) e da adição de HPMC em materiais cimentícios aplicados à impressão 3D, especificamente nos aspectos de extrudabilidade e de construtibilidade, pode contribuir com o avanço por meio do desenvolvimento de materiais considerados promissores e sustentáveis.

1.2.2 Lacuna do conhecimento e aspectos de ineditismo

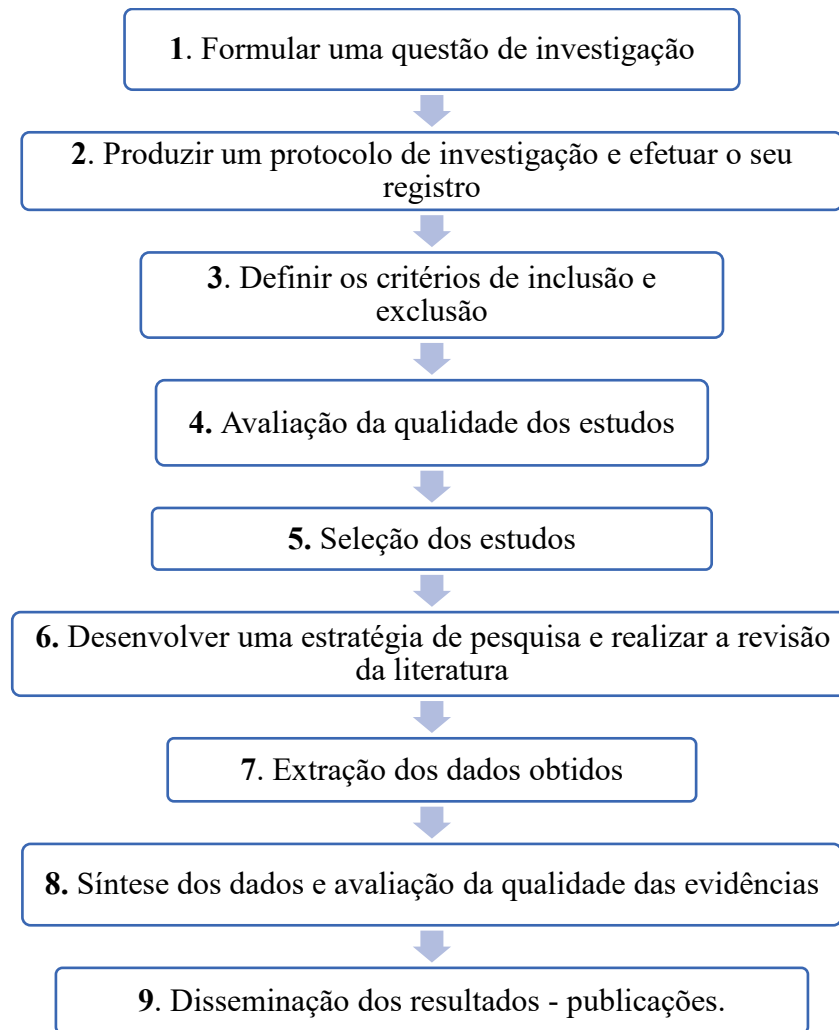
Para o desenvolvimento desta tese, buscou-se a lacuna do conhecimento através do método de revisão sistemática. De acordo com Donato e Donato (2019), a revisão sistemática

é reprodutível e tende a ser imparcial. Dessa forma, em contraste com a revisão tradicional ou narrativa, a sistemática responde a uma questão de investigação bem definida e é caracterizada por ser metodologicamente abrangente, transparente e replicável.

Assim, a aplicação da metodologia de revisão sistemática neste trabalho se baseou em responder a uma determinada questão de pesquisa, sendo que esta foi levantada através da leitura de bibliografias nacionais e internacionais, em que se constatou diferentes tipos de cimentos e adições para o desenvolvimento das misturas cimentícias aplicáveis à impressão 3D. Com isso, formulou-se a seguinte questão de pesquisa: Quais são os tipos e características químicas dos cimentos e adições considerados adequados para o desenvolvimento de materiais cimentícios aplicados à impressão 3D?

Após ter definido a questão de pesquisa, foi necessária a aplicação das etapas do método de revisão sistemática baseadas no artigo publicado de Donato e Donato (2019), conforme Figura 1.

Figura 1 – Etapas da revisão sistemática utilizada nesta pesquisa



Fonte: Adaptado de Donato e Donato (2019).

Através da Figura 1, é possível observar que a metodologia de revisão sistemática compreende 9 etapas. Após ter sido formulada a questão de pesquisa e, por consequência, atendido a Etapa 1 – Formular uma questão de investigação, deu-se sequência nas etapas descritas a seguir.

Para o atendimento da Etapa 2 – Produzir um protocolo de investigação e efetuar o seu registro, primeiramente foram definidas as bases de dados e, após isto, formulou-se os *queries* de buscas. A escolha das bases de dados foi definida de acordo com a área de Engenharia I e com o auxílio da plataforma Periódicos Capes. Para esta pesquisa, foram utilizadas três bases de dados: *Scopus*, *Compendex (Engineering Village)* e *Web of Science*. A quantidade de bases selecionadas foi devido a estas possibilitarem, após a obtenção dos

resultados, um comparativo dos dados obtidos pela análise do retorno quanto à possibilidade de responder à questão de pesquisa definida na Etapa 1.

De acordo com Paula (2014), o termo *query* refere-se a uma instrução lógica específica para realizar buscas em um repositório de código-fonte. Em geral, a *query* é formada automaticamente pelo serviço de busca, cabendo ao usuário apenas a tarefa de fornecer as informações de entrada (por exemplo, palavras-chave). Para esta pesquisa, foi necessário a definição da *query*, pois as plataformas de buscas selecionadas não definiram de forma automática devido ao fato de ser uma busca específica.

Para a definição do *query* desta pesquisa, foi necessária a leitura de artigos conceituados na área de impressão 3D com materiais cimentícios, para que o levantamento das palavras-chave relevantes de acordo com a questão de pesquisa. Observou-se a predominância, por exemplo, das seguintes palavras-chave: *Concrete printing*, *Additive manufacturing*, *3D print*, *3D printing*, *manufacturing techniques*, entre outras.

Após terem sido levantadas as palavras-chave, estudou-se cada plataforma de busca relacionando as suas especificações quanto aos critérios de entradas, tais como filtros relacionados ao período de buscas, busca relacionada à estrutura do artigo – se ocorreria somente em título, resumo ou no artigo em sua totalidade – e, por fim, nos tipos de booleanos possíveis de serem utilizados. Dessa forma, pode-se estabelecer quais seriam os critérios comuns a todas as plataformas.

Após esta etapa, foram realizadas 28 combinações de *queries*. O 27º *query* foi o que obteve resultados satisfatórios em termos de publicações que pudessem responder à questão de pesquisa estabelecida na Etapa 1. A extensa quantidade de combinações efetuadas deu-se pelos seguintes fatores: a pesquisa de impressão 3D é aplicada em diversos segmentos, tais como área da saúde (odontologia), polímeros e biocomponentes. Dessa forma, algumas alterações dos *queries* visaram a utilização de booleanos e palavras-chave que excluíssem resultados destas áreas. Além desse fator, foram observados como retorno vários artigos de simulação numérica que não possibilitavam a identificação do tipo de cimento empregado e, por consequência, não respondiam à questão de pesquisa.

Ao analisar os resultados obtidos em cada uma das plataformas, verificou-se discrepâncias e distinções quanto ao número dos resultados de cada uma e tipos de artigos encontrados. Dessa forma, foram indispensáveis novas alterações nas *queries*, uma vez que este fato pode ser desencadeado por problemas na formação da *query* ou escolha equivocada da plataforma de busca. Além disso, levou-se em consideração a necessidade de os artigos

terem em sua metodologia ensaios experimentais, pois, devido às leituras realizadas anteriormente, observou-se que artigos que utilizavam a metodologia de revisão bibliográfica não necessariamente trariam o retorno dos tipos de cimento utilizados em materiais cimentícios, mas sim a uma visão generalista dos aspectos dos materiais, maquinário e avanços na tecnologia de impressão 3D.

Por fim, estabeleceu-se a seguinte *query* de busca para as 3 plataformas: ((*3D print* concrete*) **AND** *cement* **AND** *experimental*), com os seguintes critérios:

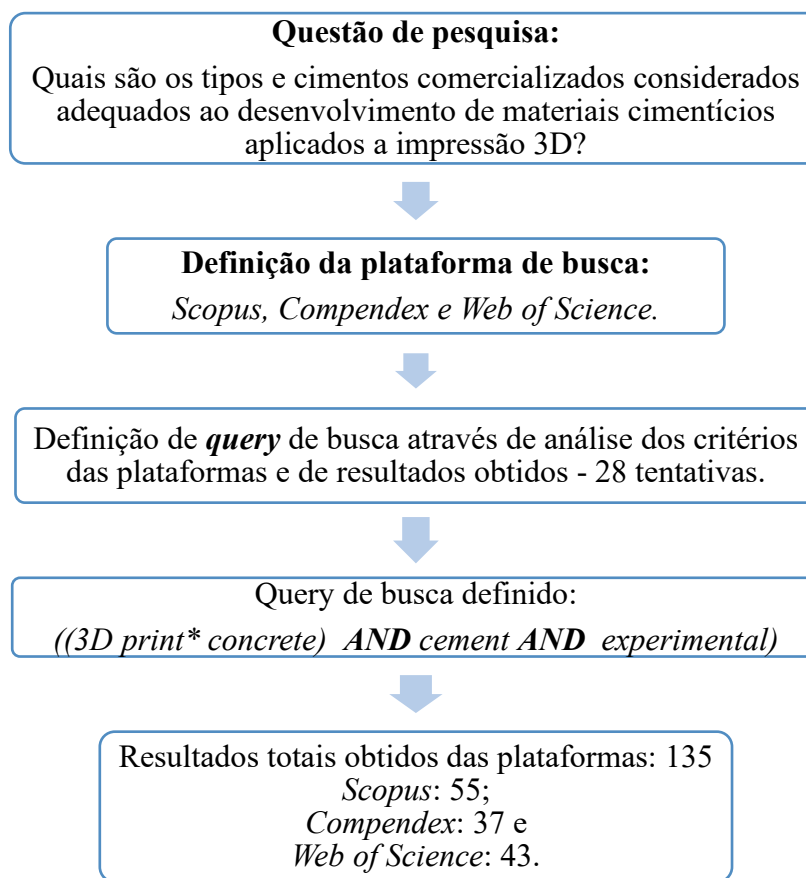
- sem a utilização de filtro relacionados ao período de busca. Isto porque é considerado recente o emprego da tecnologia de impressão 3D aplicada à construção civil (BUSWELL *et al.*, 2018);
- busca de pesquisa do tipo tópico, ou seja, as palavras contidas na *query* de busca deveriam estar presentes somente no título, resumo e nas palavras-chave dos artigos retornados pela plataforma como resultados.

Após esta atividade, deu-se sequência à Etapa 3 - Definir os critérios de inclusão e exclusão. Para esta etapa, foram realizadas a seleção dos artigos, excluindo os repetidos, aqueles que não estavam disponíveis para leitura, ou seja, não disponíveis em *open access*, ou fornecido pelo acesso no portal da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e, por fim, as publicações que fugiam da temática da pesquisa – através da análise pela leitura dos resumos. É importante ressaltar que a busca foi realizada até o dia 09 de abril de 2021, assim buscas em datas posteriores poderão obter diferentes resultados.

A etapa 4 - Desenvolver uma estratégia de pesquisa e realizar a revisão da literatura - foi atendida através da seguinte estratégia de leitura: leitura do resumo dos artigos, objetivos, metodologia e conclusões. Pode-se levantar os tipos de cimento e adições e compreender detalhes de forma mais específica sobre as pesquisas desenvolvidas.

Assim, com a aplicação da metodologia de revisão sistemática, obteve-se um resultado total de 135 publicações com base na somatória das três bases de dados. Na Figura 2 é possível observar as etapas e os resultados de cada uma das plataformas de busca que possibilitaram posteriormente formar um portfólio bibliográfico promissor e que pode responder à questão de pesquisa.

Figura 2 – Etapas de resultados da revisão sistemática utilizadas nesta pesquisa



Fonte: A autora.

A etapa 5 – Seleção dos estudos e a etapa 6 – Avaliação da qualidade dos estudos foram realizadas de forma paralela, isto porque ao se realizar a seleção das publicações observou-se a qualidade dos artigos obtidos em relação à sua estrutura científica, informação dos dados e local de publicação. Após análise dos artigos de cada uma das plataformas, observou-se que, dos 135 resultados encontrados, 56 eram artigos repetidos, 22 eram compilados de publicações e por conta disso foram excluídos, restando 57 publicações.

Através da Etapa 7 – Extração de dados, foi possível obter informações relacionadas ao tipo de cimento, características químicas, adições minerais, aditivos químicos e ensaios experimentais realizados nas publicações encontradas. Estas informações foram inseridas em uma planilha desenvolvida no programa Excel[®], de forma a possibilitar uma melhor visualização para análise dos resultados.

Após a Etapa 7 ser finalizada, foi possível realizar a síntese dos dados e avaliação da qualidade das evidências encontradas - Etapa 8. Dessa forma, observou-se que o estudo dos materiais cimentícios e a sua relação com os aspectos de construtibilidade (aderência e

sobreposição de camadas) é uma das lacunas a serem sanadas para o desenvolvimento das misturas promissoras a serem aplicadas na tecnologia de impressão 3D. Com isso, foram traçados os objetivos, hipótese e questão de pesquisa desta tese, apresentados posteriormente.

Por fim, a Etapa 9 – Disseminação dos resultados através de publicação, será atendida com a finalização desta tese e conseqüentemente o desenvolvimento de artigos com os resultados obtidos.

1.3 HIPÓTESE DE PESQUISA

Diferentes porcentagens de adição mineral (MC) em substituição na massa de cimento em materiais cimentícios desenvolvidas para impressão 3D interferem nos aspectos de extrudabilidade, construtibilidade e nas propriedades mecânicas.

1.4 QUESTÃO DE PESQUISA

De que forma as diferentes porcentagens de adição mineral (MC) em materiais cimentícios desenvolvidas para impressão 3D afetam os aspectos de extrudabilidade, construtibilidade e propriedades mecânicas?

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da adição mineral (MC) nas porcentagens de 0%, 5%, 10% e 30% em relação à substituição da massa de cimento e 0,3% de aditivo químico (HPMC) nos aspectos de extrudabilidade, construtibilidade e em propriedades mecânicas em materiais cimentícios desenvolvidas para impressão 3D.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Comparar materiais cimentícios (pastas e argamassas) com incorporação de diferentes porcentagens de (MC), 0,3% de (HPMC) em relação à consistência normal, início e fim de pega, retenção de água e densidade de massa.
- Quantificar a influência da incorporação de (MC) em substituição a massa de cimento e da adição de 0,3% de (HPMC) nos materiais cimentícios com relação aos aspectos de extrudabilidade, construtibilidade e propriedades mecânicas.
- Identificar por meio da termografia, a umidade superficial em diferentes materiais cimentícios e correlacioná-la com as propriedades mecânicas.

1.6 DELIMITAÇÃO DE PESQUISA

A pesquisa delimitou-se analisar materiais cimentícios em relação aos aspectos de extrudabilidade, construtibilidade e propriedades mecânicas com adição mineral de metacaulim (MC) nas porcentagens de 0%, 10% e 30% em substituição em massa do cimento e 0,3% de aditivo químico hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) em relação à massa de cimento por meio da extrusão em um protótipo de 1 m², traço em massa de 1:1,5 e parâmetros do protótipo pré-fixados de vazão de 2,46 L/min e velocidade de 50 mm/s.

1.7 DEFINIÇÃO DOS PRINCIPAIS TERMOS

1. Manufatura aditiva: processo de manufatura com adição de material comandado por meio digital que engloba diversos tipos de equipamentos e modelos, entre eles, a impressora 3D.
2. Impressão 3D: tecnologia de fabricação aditiva que utiliza modelo tridimensional para ser desenvolvida.
3. Construtibilidade: capacidade de resistência a deformação das camadas ao serem sobrepostas.

4. Concreto Impresso: tecnologia de Impressão 3D com o uso de materiais cimentícios (concreto e/ou material cimentício).
5. Janela de impressão: parâmetro definido para estabelecer o intervalo de tempo entre camadas a serem extrudadas no processo de impressão 3D.
6. Parâmetros da impressão 3D – parâmetros reológicos ou do processo para execução do material cimentícios pelo maquinário.

1.8 ESTRUTURA DA TESE

De forma a possibilitar a leitura e compreensão deste trabalho de pesquisa esta tese está estruturada em cinco capítulos:

O primeiro capítulo tem caráter introdutório e norteador da pesquisa, para isso, este foi dividido em subitens, tais como: introdução, justificativa, relevância do tema, lacuna do conhecimento e aspectos de ineditismo, hipótese de pesquisa, questão de pesquisa, objetivo geral e específicos e delimitação de pesquisa.

De forma sequencial, segundo capítulo diz respeito a revisão bibliográfica, que visa o aprofundamento teórico nas principais bibliografias nacionais e internacionais relacionadas a tecnologia de impressão 3D e seu contexto histórico, materiais e adições, extrudabilidade e parâmetros reológicos, construtibilidade, aderência e umidade entre camadas.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais e a metodologia desenvolvida da Campanha Experimental, sendo dividida em Estudos A, B, C e D. O Estudo A é relacionado aos ensaios de consistência normal, início e fim de pega e retenção de água em pastas cimentícias e argamassas e os Estudos B, C e D relacionados aos ensaios de extrudabilidade, construtibilidade e propriedades mecânicas de materiais cimentícios por meio de extrusão em impressora 3D de bancada e de sobreposição de camadas.

No quarto capítulo serão apresentados os resultados e discussões de modo a atender a metodologia prevista no terceiro capítulo. Neste, serão dispostos os resultados relacionados ao processo de extrusão em protótipo de 1 m² através do desenvolvimento de materiais cimentícios com adição de metacaulim (MC) e (HPMC) e sua relação nos aspectos de extrudabilidade, construtibilidade e propriedade mecânica.

De forma conclusiva, no quinto e último capítulo serão apresentadas as considerações finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

1.9 TRABALHOS E PARCERIAS DO GRUPO DE PESQUISA DA UEL

O grupo de pesquisa da UEL começou a trabalhar sobre o tema tecnologia de impressão 3D em materiais cimentícios por meio de trabalhos de conclusão de curso (TCC), tendo finalizado 4 trabalhos, os quais estão descritos na sequência:

- Trabalho de conclusão de curso da discente Ester Meira Ramos Amorim, com o título: “Avaliação no estado fresco de materiais cimentícios para impressão 3D com substituição em metacaulim”,
- Trabalho de conclusão de curso do discente Gustavo de Pinheiro Tavares Filla, com o título: “Influência da cinza volante nas propriedades físicas e reológicas das materiais cimentícios para impressão 3D”.
- Trabalho de conclusão de curso da discente Lauane Trinetto Costa, com o título: “Avaliação das propriedades em estado fresco de uma argamassa para impressão 3D com substituição do cimento Portland por metacaulim e adição de HPMC”.
- Dissertação de mestrado defendida em fevereiro de 2023, de autoria de Monique de Brito Filgueiras, com o título: “Avaliação das propriedades mecânicas de material cimentício produzido por impressão 3D com foco na aderência entre as camadas”.

Além dos trabalhos mencionados acima, o grupo produziu os seguintes artigos relacionados ao tema:

- Artigo publicado na revista *Matéria* (UFRJ), com o título: “Potencialidade de utilização de cinza volante (CV) e metacaulim (MC) em materiais cimentícios para impressão 3D: aspectos de construtibilidade”.
- Artigo publicado e com maior votação de sessão no evento ENSUS 2021 – IX Encontro de Sustentabilidade em Projeto, com o título: “Utilização de cinza volante (CV) para impressão 3D”.

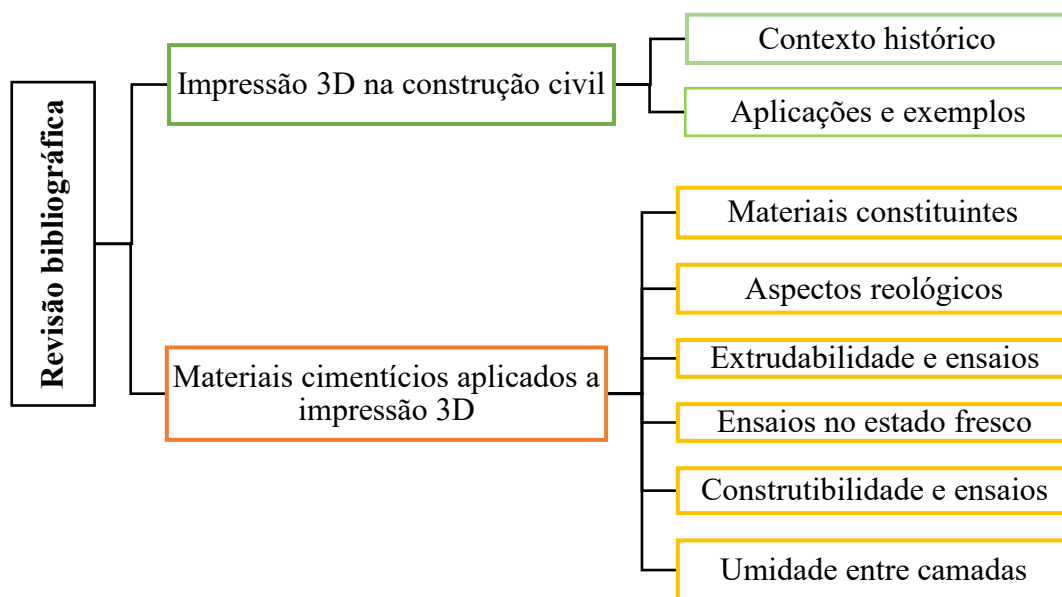
- Artigo publicado no evento ENSUS 2021 – IX Encontro de Sustentabilidade em Projeto, com o título: “Elementos de concretos produzidos por impressão 3D com foco na aderência entre camadas: uma revisão”.
- Artigo submetido na revista *Progress in Additive Manufacturing*, com o título: “*Development and validation of a 3D printing system for cementitious materials*” sob autoria de Maicon Douglas Leles da Silva, Lívia Fernanda Silva, Berenice Martins Toralles, Flávia Aparecida Reitz Cardoso, Marla Corso e Luciana Cristina Soto Herek Rezende.

Por fim, a pesquisa desenvolvida possibilitou a parceria entre o Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UEL (Universidade Estadual de Londrina) e o Programa de Pós Graduação em Tecnologias Limpas da Unicesumar (Universidade Cesumar) por meio do desenvolvimento dos ensaios experimentais e utilização do protótipo de impressão 3D em escala de bancada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta o estado da arte sobre os materiais cimentícios e a impressão 3D na construção civil. Para tanto, inicialmente, discorreu-se sobre o contexto histórico da impressão 3D em cenário internacional e nacional com aplicações e exemplos, posteriormente, abordou-se sobre os aspectos relacionados aos materiais cimentícios relacionado aos materiais constituintes, parâmetros reológicos, extrudabilidade, construtibilidade e aderência entre camadas e os respectivos ensaios em estado fresco e em estado endurecido. Na Figura 3 pode-se observar a ordem de estudo dos tópicos para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 3 – Fluxograma dos tópicos abordados na revisão bibliográfica desta pesquisa



Fonte: A autora.

2.1 IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1.1 Contexto Histórico

Arquitetura e construção são áreas altamente interdisciplinares, envolvendo diversas áreas de engenharia para produzir estruturas com diferentes níveis de escala e complexidade. O setor de construção é cada vez mais desafiado a otimizar seu desempenho em termos produtivos e eficiência, reduzindo custos e minimizando o impacto ambiental. Por outro lado, novas tecnologias em ascensão estão possibilitando melhorias radicais no setor de construção. (CRAVEIRO *et al.*, 2016).

Considerando a demanda global para reduzir as emissões de CO₂, torna-se necessário tecnologias inovadoras na construção para não apenas possibilitar um futuro sustentável, mas também para reduzir os custos de construção proporcionando vantagens competitivas (TAY *et al.*, 2017). De acordo com Qaidi *et al.* (2022) há uma necessidade urgente de desenvolver materiais apropriados que melhorem o desempenho de forma a reduzir as emissões de dióxido de carbono. Com a manufatura aditiva, a reutilização e reciclagem de resíduos de demolição da construção (RCDs) podem potencialmente guiar a uma implementação bem-sucedida da economia na indústria da construção (GHAFAR; CORKER; FAN, 2018).

Segundo Carvalho (2018), a construção digitalizada poderá ser uma alternativa que permeia tanto o desenvolvimento de novas técnicas construtivas quanto à redução da necessidade de mão de obra artesanal, dada a automatização do processo construtivo por meio de execução direta ou por montagem de elementos pré-fabricados. Para isso ser possível a inovação e a pesquisa desempenharão um papel fundamental na mudança sistêmica da indústria, onde a tecnologia de manufatura aditiva poderá ser suporte para a indústria da construção fazer a transição para um setor responsável e avançado (GHAFAR; CORKER; FAN, 2018).

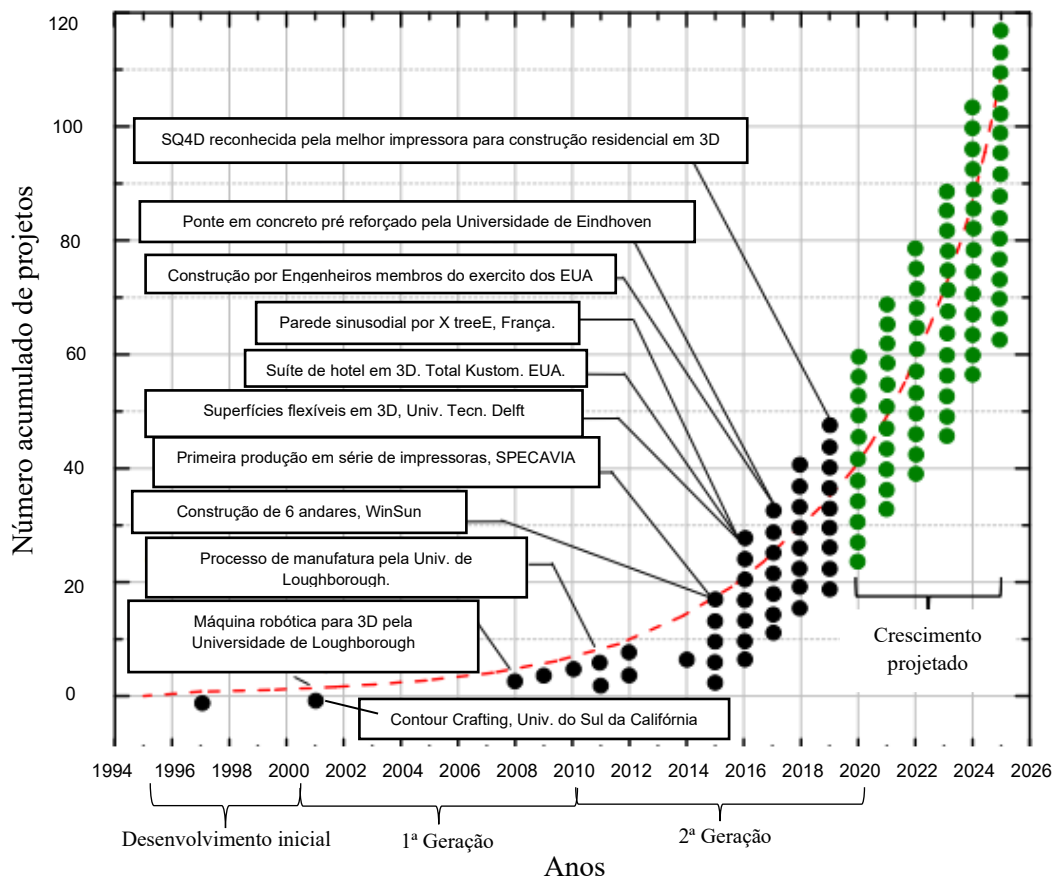
A manufatura aditiva na construção ainda gera um ceticismo de que sua aplicação acarretará à perda de empregos. Porém é previsto que empregos tradicionais de produção não serão perdidos, mas, de fato, substituídos por novos e qualificados. O advento dessas novas tecnologias permitirá, não só uma indústria com muito mais igualdade de gênero, mas

também mais segura, reduzindo drasticamente acidentes de trabalho e prolongamento do tempo de atividade dos trabalhadores. (KHAN; SANCHEZ; ZHOU, 2020).

As origens da impressão 3D na construção estão na automação e na robótica. Uma impressora 3D é um sistema móvel ou estacionário, consistindo em vários subsistemas ou componentes robóticos, com materiais que servem como a tinta da impressora (KHAN; SANCHEZ; ZHOU, 2020). A impressão 3D é considerada um tipo de manufatura aditiva, que pode ser definida como: “um processo de fabricação automatizado, composto de operações e subprocessos industriais, capazes de construir fisicamente objetos geométricos tridimensionais, camada por camada de um determinado material” (ASTM, 2015).

Os processos de fabricação aditiva em larga escala, baseados em cimento, geralmente chamados de impressão 3D de concreto, estão em desenvolvimento nos últimos 10 anos e pode se afirmar que mais de 30 grupos em todo o mundo estão atualmente envolvidos (BUSWELL *et al.*, 2018). Na Figura 4 é possível observar o crescimento das atividades relacionadas a manufatura aditiva e os grupos de pesquisa na impressão 3D no cenário mundial.

Figura 4 – Evolução dos projetos de impressão 3D a nível mundial



Fonte: Adaptado de Salman *et al.* (2021).

Observa-se através da Figura 4, uma progressão em termos de crescimento das pesquisas relacionadas a impressão 3D na construção civil. No ano de 1997, por exemplo havia apenas um projeto desenvolvido na área já em 2026 observa-se um crescimento projetado de até 120 projetos. (BUSWELL *et al.*, 2018).

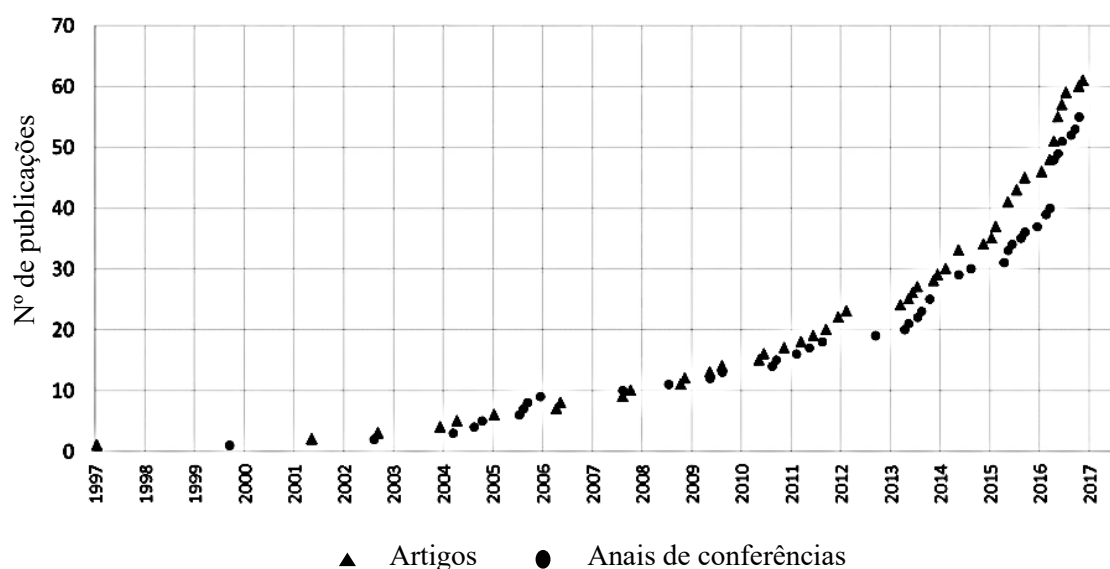
Em termos econômicos, Schutter *et al.* (2018), afirmam que o concreto fabricado digitalmente induzirá mudanças nas partes interessadas e na estrutura de custos, embora seja ambicioso apresentar quantitativamente a estrutura de custos, este sistema apresenta muitas oportunidades em potencial para aumentar a relação custo-benefício dos processos de construção. Para Kothman e Faber (2016) as fôrmas utilizadas na construção representam cerca de 40% do orçamento total para obras de concreto e estas podem ser evitadas durante o processo de construção.

E ainda, é provável que essa tecnologia revolucionária transforme drasticamente os modelos de negócios, o local de produção, reduza as cadeias de suprimentos e altere a

ordem econômica global, através de suas fabricações e de revitalização e inovação do mecanismo de economia dos EUA. (PETRICK e SIMPSON, 2015).

Tay *et al.* (2017) analisaram a evolução de pesquisas publicadas voltadas a impressão 3D na construção civil através do método de revisão sistemática no intervalo de 1997 a 2016 nas plataformas de pesquisa *Science Direct e Web of Science* (Figura 5).

Figura 5 – Publicações referentes à impressão 3D na construção civil (1997-2016)



Fonte: Adaptado de Tay *et al.* (2017)

Os autores observaram que de 2013 a 2016, houve um aumento significativo de estudos voltados a impressão 3D aplicada a construção civil e que a partir de 2009 as publicações de artigos em periódicos começaram a aumentar a uma taxa mais rápida do que os anais de conferências, que exemplifica uma iniciativa maior para trabalhos completos no assunto (TAY *et al.*, 2017).

A primeira impressora 3D foi criada em 1984, pelo norte-americano Charles Hull, que utilizou como tecnologia a estereolitografia para criar lâmpadas pela solidificação de resina (DUARTE, 2014). Estudos da impressão 3D aplicada na construção civil, iniciaram-se com o pesquisador Joseph Pagna, nos EUA, em 1997, com o artigo intitulado “Investigação exploratória de forma livre aplicada na construção” em que foi desenvolvida a pesquisa para se obter elementos manufaturados com uso de matéria primas comumente empregadas na construção civil, tais como cimento e areia (BUSWELL *et al.*, 2018;

PEGNA, 1997). E, com o engenheiro civil Enrico Dini, entre 2005 e 2007 iniciou-se experimentos voltados a impressão de edificações, tornando-o mundialmente famoso como "o homem que imprime casas" (SILVA *et al.*, 2018; D-SHAPE).

De forma paralela, o grupo de pesquisa do Sul da Califórnia, liderado pelo pesquisador Khoshnevis, desenvolveu uma tecnologia de fabricação em camadas com considerável potencial na construção automatizada de estruturas inteiras e de subcomponentes. Usando esse processo, uma casa pode ser construída automaticamente em uma única execução com conduítes para instalações elétricas, hidráulicas e de ar-condicionado (KHOSHNEVIS, 2004).

Importante ressaltar que a impressão 3D na construção civil abrange diferentes métodos de aplicação relacionados ao tipo do processo de extrusão, sendo que a escolha da extrusão pode promover diferentes características tanto na geometria do objeto a ser desenvolvido quanto nas propriedades do material nos estados fresco e endurecido (BUSWELL *et al.*, 2018).

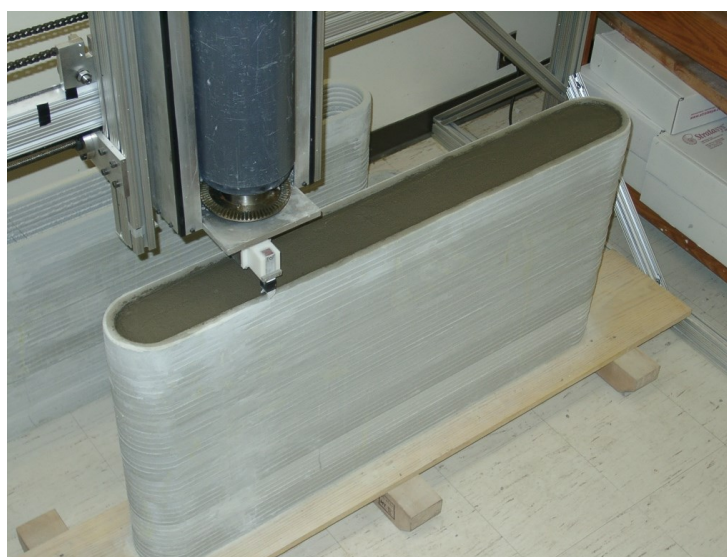
Em relação a característica geométrica das estruturas pode se dizer que as técnicas de impressão 3D comparadas com as tradicionais de construção dos edifícios, são consideradas como ecologicamente corretas, oferecendo possibilidades quase ilimitadas de complexidade geométrica (HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016). Pode-se citar 3 tipos de formas de extrusão, desenvolvidos e aplicadas a construção civil, sendo elas: *Contour Crafting*, *Concrete Printing*, e *D-Shape*. (MARIJNISSEN e ZEE, 2017; LIM *et al.*, 2012).

O método *Contour Crafting* ou denominado de *Freeform Building* desenvolvido pela Universidade do Sul da Califórnia, liderado pelo pesquisador Khoshnevis, é uma tecnologia que utiliza o controle do computador para explorar a capacidade de formação de superfícies planas e de formas livres precisas (KHOSHNEVIS; DUTTON, 1998).

A fabricação do elemento em camadas, através do método *Contour Crafting* tem um grande potencial na construção automatizada de estruturas inteiras, bem como subcomponentes, em que visa a extrusão de forma híbrida, combinando o processo de extrusão para formar as superfícies dos objetos e o processo de enchimento para construir o núcleo. (KHOSHNEVIS, 2004). Nesta tecnologia, o material cimentício é extrudado progressivamente camada por camada permitindo a fabricação de estruturas (HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016; QAIDI *et al.*, 2022).

De acordo com Lim (2012) o *Contour Crafting* caracteriza-se pela extrusão de filamentos de seção oca de material cimentício a partir de uma cabeça de extrusão, controlada por computador, capaz de movimentar-se tridimensionalmente. Este método permite um acabamento de superfície com qualidade através do acúmulo das camadas subsequentes. Foi desenvolvido de forma a combinar a alta velocidade e a deposição de camadas. Na Figura 6 pode ser observado um objeto desenvolvido em *Contour Crafting*.

Figura 6 – Método de extrusão pelo método *Contour Crafting*



Fonte: *Contour Crafting Corporation*.

Uma característica típica do processo de criação através da extrusão por *Contour Crafting*, é a capacidade de produzir peças de forma rápida quando comparadas aos métodos tradicionais com uso de ferramentas, como espátulas, por exemplo. Embora isso pareça ser conceitualmente simples, é fundamental para sucesso e para minimizar os custos associados à produção' (KHOSHNEVIS; DUTTON, 1998). Segundo Lim *et al.* (2012), o *Contour Crafting* produz elementos verticais e em grande parte sob efeitos de compressão e quando há presença de abertura, tais como portas ou janelas, um suporte é colocado e de forma sequencial é dada sequência na execução da parede.

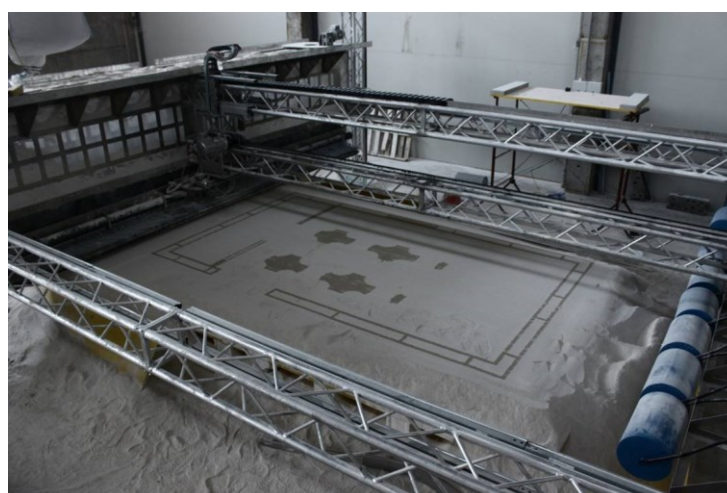
De acordo com Khoshnevis (2004), além do enorme potencial econômico, o *Contour Crafting* poderá proporcionar melhor qualidade de vida, segurança, e redução no impacto ambiental. Neste sentido, a técnica promete a construção de habitações de *design* personalizado e com baixo custo e com nível elevado de qualidade.

O próximo método a ser abordado é o *D-Shape* que consiste em um processo desenvolvido por Enrico Dini, em que se tem a deposição de uma camada de pó seco (mistura de agregados, resíduos, fibras, entre outros) de forma homogênea, e que, em seguida, a camada é compactada resultando numa superfície uniforme, posterior a este processo é injetado um aglutinante à base de resinas epóxi (DINI, 2009). De acordo com Lim *et al.* (2012) a penetração do ligante através de cada camada e a pressão que ocorre em torno do ponto de injeção são considerados parâmetros importantes no método *D-Shape*.

Cada camada de material utilizada para a construção é colocada na espessura desejada, compactada e, em seguida, os bicos montados em uma estrutura de pórtico depositam uma pasta que possibilite que a peça se torne sólida. Depois que a peça é concluída esta é escavada e retira-se o excesso de pó. O processo foi usado para criar peças arquitetônicas com 1,6 m (LIM *et al.*, 2012).

De acordo com o site da empresa *D-Shape* (s.d), criada por Dini, esta iniciou seu projeto em 2004, quando, durante uma demonstração de uma impressora 3D para outras empresas, surgiu a ideia de ampliar o processo. Atualmente a *D-Shape* abrange muitos setores, indo desde o setor ambiental, ao militar, arqueológico, marítimo, artístico e de construção. Na Figura 7 é possível observar o desenvolvimento inicial de um objeto de 2,40m x 4m.

Figura 7 – Impressão 3D no método *D-Shape*



Fonte: *D-Shape* (2010).

No método *Concrete Printing*, a impressão em concreto também se baseia na extrusão de material cimentício de cimento, no entanto, o processo foi desenvolvido para reter a liberdade tridimensional com uma resolução de menor deposição, o que permite

controle do formato geométrico (LIM *et al.*, 2012). Na Figura 8 pode-se observar um banco desenvolvido através do método (CP).

Figura 8 – Impressão 3D no método *Concrete Printing*



Fonte: Lim (2009).

Para o desenvolvimento do banco apresentado na Figura 8, foi necessário intercalar uma malha de reforço para apoiar a bancada do assento, e este coberto por camadas subsequentes. O processo de fabricação é semelhante aos processos convencionais, incluindo o design do componente em geometria sólida, a conversão da geometria sólida em programação pela máquina, a impressão do componente e, finalmente, o pós-processamento, que inclui a remoção da estrutura de suporte e qualquer acabamento superficial necessário (LIM *et al.*, 2012).

Nos métodos *Concrete Printing* e *D-Shape* são necessários suportes adicionais para criar saliências e outros recursos de forma livre, sendo o método *D-Shape* um processo à base de pó que utiliza material não consolidado para suporte. A desvantagem desse processo é a necessidade de dispositivo de deposição adicional e limpeza da estrutura no pós-processamento (LIM *et al.*, 2012).

Na Figura 9, pode se observar exemplos dos 3 tipos de processos executivos para a impressão 3D.

Figura 9 – Impressão 3D – Objetos impressos pelo método *Contour Crafting*, *D-Shape* e *Concrete Printing*

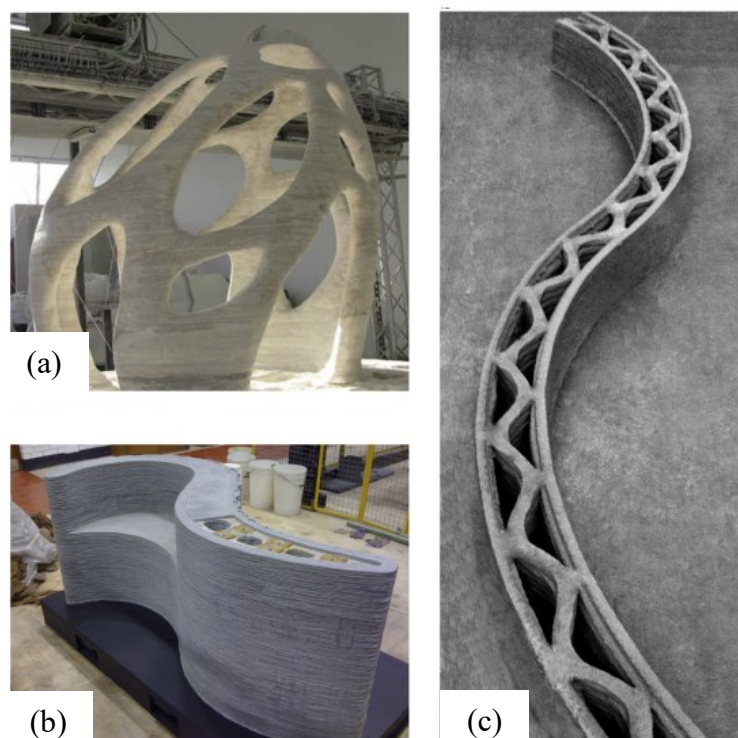


Figura 9. (a) Impressão do objeto em método *D-Shape*. **(b)** Impressão do objeto em *Concrete Printing*. **(c)** Impressão do objeto em *Contour Crafting*.

Fonte: Lim (2012).

Observa-se através da Figura 9 as diferenças entre os objetos desenvolvidos com os diferentes tipos de processo. Em se tratando de escala real foram desenvolvidos protótipos pela empresa chinesa *Winsun* pelo método *Contour Crafting* e pelo pesquisador Dini através do processo *D-Shape*, no qual consiste em deposição de camadas do material em pó e posteriormente o material é submetido ao processo de cura (CRAVEIRO *et al.*, 2016).

2.1.2 Aplicações da impressão 3D na construção

Em se tratando de aplicação da impressão 3D ao mercado, pode se verificar que diversas empresas estão investindo a tecnologia e promovendo o seu desenvolvimento. Dentre elas, a chinesa *Winsun*, foi a primeira empresa de impressão 3D a construir um prédio de 5 andares com uma impressora 3D de 6,6 m de altura, 10 m de largura e 40 m de comprimento. A *Winsun* tem como foco promover tecnologia no cenário arcaico de construção atual, principalmente, pelo fato de tal método manter a produtividade a um baixo

nível, além de depender das habilidades dos indivíduos que estão na construção, e, por fim, por produzir uma grande quantidade de resíduos, ruído e poeira (STARR, 2015).

Em seu site, a empresa se qualifica como de alta tecnologia com impacto no setor imobiliário chinês e que possui 225 patentes nacionais (WINSUN 3D, s. d.). Em 2014 a *Winsun* imprimiu dez casas em apenas 24 horas (Figura 10.a) com uma impressora 3D com 150 m de comprimento, 10 m de largura e 6 m de profundidade utilizando concreto reforçado com fibra de vidro especial. Em 2016, a *WinSun* apresentou o primeiro escritório impresso em 3D do mundo (Figura 10.b), com 250m² (GHAFFAR; CORKER; FAN, 2018).

Figura 10 – Edificações no método *Contour Crafting* da empresa chinesa Winsun.

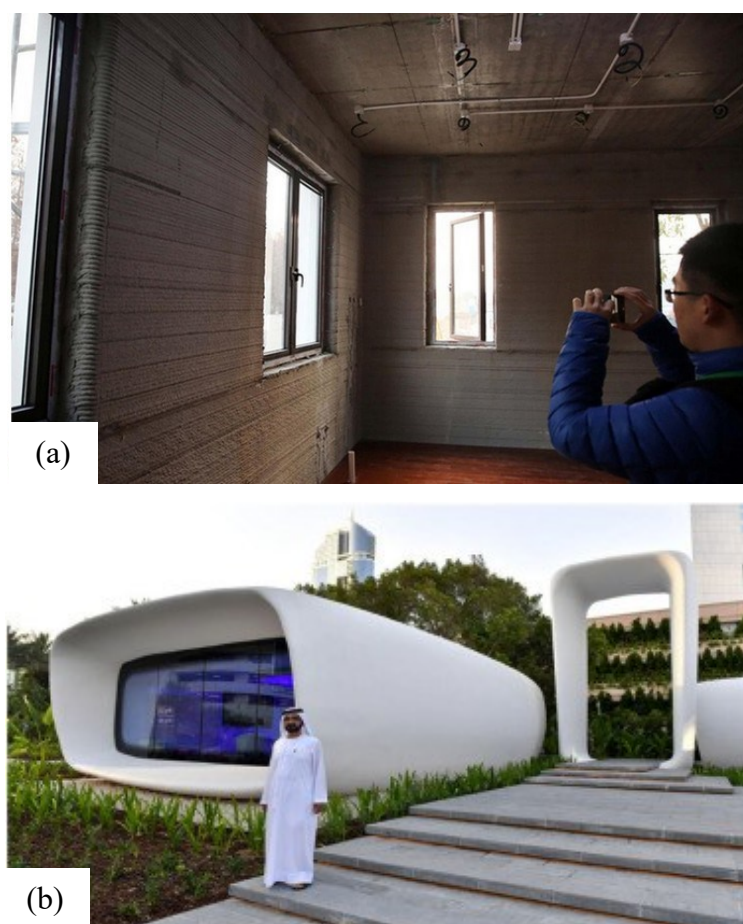


Figura 10. (a) Casa impressa pela *Winsun*. Fonte: CNET (2015). (b) Primeiro escritório impresso em 3D do mundo. Fonte: Ghaffar; Corker; Fan (2018).

Também nos EUA, a Cooperação *Contour Crafting*, pioneira na tecnologia de impressão 3D com utilização de material cimentício e localizada no Sul da Califórnia, ganhou um processo de seleção promovido pelo governo para construir quatro unidades de

moradias populares (Figura 11) para sem tetos em Los Angeles (CONTOUR CRAFTING, 2020).

Figura 11 – Projeto para moradias populares por meio do método *Contour Crafting*



Fonte: *Contour Crafting*, 2020.

A empresa russa Apis Cor, com sede em San Francisco desenvolveu uma impressora capaz de imprimir uma casa de 37 m² em apenas um dia. A casa contém um quarto, banheiro e corredor e está localizada em Moscou (Figura 12) (HOFFMAN, 2017).

Figura 12 – Edificação produzida pela empresa *ApisCor*



Fonte: *Apis Cor*, 2021.

O processo construtivo é iniciado pela inserção dos elementos e suas ligações com a rede hidráulica e elétrica, e posteriormente o desenvolvimento da impressão da edificação.

(APIS COR, s.d.). Através do projeto arquitetônico, a impressora desenvolve a etapa da fundação com a inserção de fibras de vidro para promover uma maior resistência na estrutura e após o término da fundação as paredes são extrudadas.

A *Apis Cor* possui o recorde mundial do *Guinness* por imprimir o maior edifício em 3D do mundo, localizado em Dubai, trata-se de um prédio administrativo de dois andares com 9,5 m de altura e 640 m² de área (Figura 13), além disso a empresa fornece cursos interativos para educação e capacitação voltados a impressão 3D (APIS COR, 2021).

Figura 13 – Edificação produzida pela empresa ApisCor



Figura 13. (a) Edificação em processo de execução localizada em Dubai. **Fonte:** Apis Cor. **(b)** Edificação concluída. **Fonte:** 3D natives.

Em 2018 a ICON, empresa de casas em impressão 3D foi a primeira empresa na América a garantir uma licença de construção e construir uma casa impressa, denominada de *Chicon House* (Figura 14). A casa se localiza em Austin, Texas nos EUA e atraiu investidores e clientes (ICON, 2019).

A *Chicon House* possui 32,5 m², 2 quartos, 1 banheiro e uma área de cozinha rodeada por varanda coberta. O tempo de impressão foi cerca de 47 horas com a impressora *Vulcan* de 1ª geração da empresa (ICON, 2021).

Figura 14 - Casa em impressão 3D da ICON localizada nos EUA



Fonte: ICON, 2019.

Atualmente, a ICON juntamente com a organização sem fins lucrativos *New Story* e a empresa mexicana de habitação social desenvolveram o total de 50 casas impressas para famílias em situação de extrema pobreza em Tabasco, México. As casas foram impressas em 24 horas com aproximadamente 46 m² quadrados e possui dois quartos, uma sala de estar, cozinha e banheiro (Figura 15) (ICON, 2021).

Figura 15 – Comunidade de casas impressas no México



Fonte: ICON, 2021.

Em 2019 a empresa americana *SQ4D* imprimiu a primeira casa para venda nos EUA com aproximadamente 140 m² (Figura 16.a e 16.b) com tecnologia *ARCS* (*Autonomous*

Robotic Construction System) patenteada. A *SQ4D* relata que a *ARCS* pode reduzir os custos de construção em até 40% e que permite que várias máquinas trabalhem juntas com pouca ou nenhuma assistência humana. Além desses fatores a impressão de casa pela *SQ4D* permite a personalização por parte do proprietário (*SQ4D*, 2021).

Figura 16 – Casa em impressão 3D da SQ4D, EUA

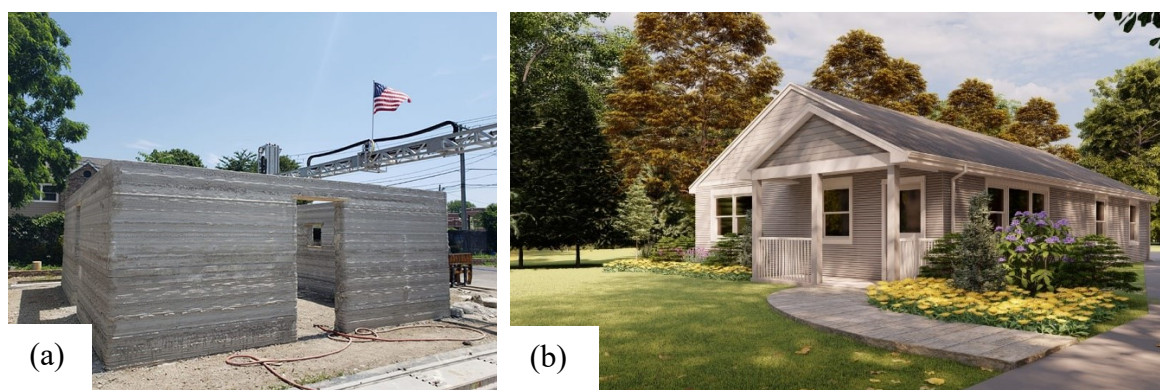


Figura 16. (a) Casa em processo de execução por impressão 3D pela *SQRD*. **Figura 16. (b)** Casa finalizada em impressão 3D para a venda pela *SQRD*. **Fonte:** *SQ4D*.

Na França, a *XtreeE* é uma plataforma de tecnologia de impressão 3D que permite a proprietários, arquitetos, engenheiros, designers de produtos, empresas de construção e de pré-fabricados projetar, fabricar elementos de construção e de infraestrutura otimizados de até 5 m de altura (*XtreeE*, 2021).

Na Holanda, em *EindHoven*, através do projeto *Milestone* da *3D PrintedHouse*, foram construídas cinco casas de concreto impressas em 3D de 95 m² em 2020 (Figura 17). O projeto possui diversos parceiros, sendo um deles o grupo de pesquisa liderado pelo professor Theo Salet da Universidade Tecnológica de *Eindhoven* com uma das maiores impressoras do concreto da Europa (*3D PRINTED HOUSE*, 2021).

Figura 17 – Casa impressa da 3D PrintedHouse, Holanda.



Fonte: 3D PRINTED HOUSE, 2021.

A empresa italiana *Wasp* que desenvolve maquinários, investe em pesquisa e em projetos integrados com utilização de materiais ecossustentáveis e sistemas inovadores. O objetivo da empresa é o de construir casas utilizando os materiais locais, reduzir custos, utilizar energias renováveis. A empresa relata a importância dos valores humanísticos por meio da troca de conhecimento numa perspectiva de igualdade de oportunidades e meritocracia (WASP, 2022).

Na Figura 18 é possível observar exemplos de construções projetadas pela *Wasp* combinando argila, areia e fibras.

Figura 18 - Construções impressas pela italiana *Wasp*



Figura 18. (a) Loja impressa da Dior composta por dois módulos circulares, localizada na praia de Jumeirah, em Dubai. **(b)** Habitat Tecla com construções sustentáveis de 50 m² executadas por várias impressoras 3D com 200 horas de impressão e 150 km de extensão, localizada em Ravenna, na Itália. **Fonte:** Wasp, 2022.

Em cenário brasileiro, a impressão 3D motivou a criação de startups, tais como a *InovaHouse 3D*, fundada em 2015 por estudantes da Universidade de Brasília (UNB) e liderada pela engenheira eletricista Juliana Martinelli desenvolveram a primeira impressora 3D para materiais cimentícios da América Latina (INOVAHOUSE 3D, 2015). E a paulistana *Urban 3D* fundada em 2015 por Anielle Guedes com o objetivo de oferecer em parceria com governos, prefeituras e empresas privadas, habitação sustentável com moradias de baixo custo. (CBIC, 2015).

No cenário construtivo a primeira casa impressa em 3D foi projetada e executada pela startup *3D Home Construction* em julho de 2020 (Figura 19), com 66,81 m² e tempo de execução de 48 horas, a casa possui dois quartos, sala, cozinha, banheiro, área de serviço e garagem e está localizada no município de Macaíba região metropolitana de Natal, Rio Grande do Norte. (3D HOME CONSTRUCTION, 2021).

O trabalho é fruto de uma pesquisa iniciada há três anos através de um projeto na Universidade Potiguar desenvolvido pelos engenheiros Civis Allynson Xavier e Iago Felipe Silva sob orientação do prof. Dr. André Felipe Dantas integrantes da startup *3D Home Construction* (UP, 2020).

Figura 19 – Primeira casa em impressão 3D do Brasil





(b)

Figura 19. (a) Vista frontal e responsáveis pelo desenvolvimento. **Fonte:** UP, 2020.
(b) Visão geral da casa impressa. **Fonte:** SustentArqui, 2020.

Atualmente a startup *3D Home Construction* faz parte da *Latina Group* com mais de 18 anos de experiência no setor industrial com fabricação de máquinas CNCs (*Computer Numeric Control*) (LATINA GROUP, 2021).

Em relação ao desenvolvimento de pesquisas e mercado da construção civil, a Universidade de São Paulo (USP), a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) assinaram em setembro de 2020 um acordo de cooperação técnica que prevê a concepção, elaboração de projeto, construção e operação, em regime multiusuários, do primeiro espaço cooperativo de inovação e construção digital de base industrial do Brasil (Hubic) (ABCP, 2020).

De acordo com HUBIC (2022), o Convênio de Cooperação Técnica visa o desenvolvimento e a criação de ambientes cooperativos de inovação especializados na promoção de soluções inovadoras de construção digital, em particular para a cadeia de valor do cimento, que sejam competitivas para países em desenvolvimento com ações que preparem o setor e a sociedade para a transição para uma economia digital e circular.

Em termos de pesquisas, a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) por meio do Grupo de Estudos em Materiais Sustentáveis para Construção (Gemasc) e do Centro de Tecnologia (CT), estão desenvolvendo as primeiras impressões com materiais cimentícios com reciclagem de resíduos industriais (lodo de esgoto e de tratamento de água e resíduos da queima de carvão), e geopolímeros, com objetivo contribuir para o desenvolvimento, caracterização e entendimento de materiais tradicionais e alternativos para a construção civil, reduzindo seu impacto ambiental (UFSM, 2022).

A preocupação com o impacto ambiental também tem sido foco de pesquisas com materiais cimentícios em impressão 3D desenvolvidas no Instituto Federal da Paraíba (IFPB) por meio de pesquisas que visam o desenvolvimento de materiais cimentícios com substituição do cimento e uso de agregados reciclados de construção (IFPB, 2022).

Em relação a patentes verificou-se por meio de uma pesquisa nas bases de dados do Brasil (Instituto Nacional de Propriedade Industrial - INPI) o número de patentes de invenção concedidas de cada país. A pesquisa foi finalizada até o dia 06 de novembro de 2022, na base de patentes em que os resultados obtidos foram por meio da inserção de palavras-chave ‘3D print concrete’ e os resultados são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Resultados de depósitos de patentes – INPI

Título	Depositante	País	Data do depósito
Impressão 3D de concreto com cordões dúcteis	NV Bekaert SA	União Européia	Março/2020.
Impressão de concreto 3D com estrutura de reforço flexível	NV Bekaert SA	União Européia	Março/2020.
Impressão 3D de concreto com cabos de ancoragem de poço	NV Bekaert SA	União Européia	Março/2020.
Composição adequada para impressão 3D	Plantics Holding B. V. (NL)	União Européia	Novembro/2020.
Pórtico móvel para manipulação de extrusora de impressora 3D que utiliza material cimentício	Sociedade Goiânia de Cultura (BR/GO)	Brasil	Agosto/2020.
Composição de aglutinante mineral para impressão 3D	Sika Technology AG (CH)	União Européia	Março/2020.
Cabeçote de impressão para impressão de estruturas tridimensionais feitas de concreto e método para o mesmo	B.T. Innovation GMBH (DE)	Alemanha	Outubro/2019.

Fonte: A autora.

Verifica-se no Quadro 1 que foram obtidos somente sete resultados com depositantes da União Européia, Alemanha e Brasil demonstrando a defasagem de requerimentos de patentes no cenário nacional.

2.2 MATERIAIS CIMENTÍCIOS APLICADOS A IMPRESSÃO 3D

Ao elaborar este capítulo de revisão bibliográfica observou-se diversos termos utilizados para se referir as misturas cimentícias aplicadas a impressão 3D, dentre eles, destaca-se: concreto 3D, material cimentício de impressão, microconcreto, tinta de impressão, misturas geopoliméricas, entre outros. Devido a variabilidade, optou-se por adotar o termo ‘mistura cimentícia’ para aquelas misturas que possuem em sua composição cimento e/ou adições, e que são consideradas como material aplicado a tecnologia.

O desenvolvimento de misturas cimentícias capazes de serem impressas em maquinário específico é considerado um dos fatores importantes para a tecnologia de impressão 3D (KHAN; SANCHEZ; ZHOU, 2020; HAMIDI; ASLANI, 2019). Isto se deve ao fato de que as exigências das misturas cimentícias são obtidas através dos seus materiais constituintes e de sua dosagem, diferentemente da construção tradicional em que algumas características podem ser atendidas com o uso de fôrmas (MARCHON *et al.*, 2018).

O material a ser desenvolvido deve ter características consideradas promissoras para a sua aplicação, sendo que a produção pode abranger diversos aspectos: melhoria de desempenho em relação a utilização, produção de novos métodos teóricos e experimentais, estudo do comportamento, análise da durabilidade e sustentabilidade (HAMIDI; ASLANI, 2019).

De acordo com Zhang *et al.* (2019a), a mistura cimentícia é como uma “tinta” onde pequenos filamentos podem ser facilmente extrudados através de um tubo, bomba e sistema com bicos. Assim, a seleção de matérias-primas e o desenvolvimento de materiais cimentícios devem torná-los bombeáveis, extrudáveis e construtivos. Estes fatores são considerados importantes para o desenvolvimento da tecnologia, pois vão além de exigências normativas, como por exemplo, classes de resistência e ensaios recomendados (ZHANG *et al.*, 2021; KHAN; SANCHEZ; ZHOU, 2020; HAMIDI; ASLANI, 2019).

De acordo com Le *et al.* (2021) as propriedades mais críticas dizem respeito a extrudabilidade e a construtibilidade. Sendo que ambas as propriedades são influenciadas pela trabalhabilidade e pelas proporções dos materiais utilizados na mistura cimentícia. Em um primeiro estágio, o material cimentício precisa ser fluido para ser facilmente bombeado para a impressão, no entanto, após sair da impressão o concreto deve se tornar rígido o suficiente, com escoamento e comportamento tixotrópico adequado (SCHUTTER *et al.*, 2018). Para

Guower e Wang (2017) a mistura deve manter fluidez favorável com pressão suficiente, ser construtiva e ter baixa retração (GUOWEI E WANG, 2017).

Assim, o processo de impressão do material cimentício requer um controle contínuo sendo a extrudabilidade (alta fluidez e baixa viscosidade) e a construtibilidade (baixa fluidez e alta viscosidade) características contraditórias que precisam ser atendidas durante o desenvolvimento dos materiais (MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2020; NERELLA; KRAUSE; MECHTCHERINE, 2020; ZHANG *et al.*, 2018; PANDA *et al.*, 2017a).

A maioria das misturas cimentícias desenvolvidas utilizam o cimento Portland como o principal aglomerante, com adição de 20 a 30% de material pozolânico suplementar, tais como: cinzas volantes (CV), sílica ativa (SA), escória de alto-forno granulada moída (ES). Como a produção de cimento está associada a altas demandas de energia e emissões de CO₂, nos últimos anos pesquisas que enfocam o desenvolvimento de misturas sustentáveis têm crescido consideravelmente (PANDA; TAN, 2018a; PANDA; UNLUER; TAN, 2018). Por outro lado, pesquisas sobre o desenvolvimento de materiais cimentícios aplicados a impressão 3D com argila calcinada e calcário ainda estão em estágio inicial, sendo que poucas tentativas foram feitas para explorar a extrudabilidade com estes materiais (CHEN *et al.*, 2020a).

Para desenvolver materiais sustentáveis e econômicos, resíduos ou recicláveis são amplamente utilizados como matéria-prima para a produção de materiais aplicados a impressão 3D. Estes materiais são denominados de geopoliméricos em que no seu processo de fabricação geralmente não se utiliza cimento (ALBAR *et al.*, 2020). De acordo com Qaidi, *et al.* (2022) os geopolímeros têm se mostrado uma alternativa promissora aos materiais à base de cimento para indústria da construção, o que pode ajudar a torná-la mais sustentável.

O geopolímero é considerado um aglutinante sustentável em comparação ao cimento pois são desenvolvidos com materiais aluminossilicatos que contêm uma quantidade considerável de alumínio (Al) e silício (Si) na forma amorfa, sendo a escória (ES) e as cinzas volantes (CV) uma das principais fontes (BONG *et al.*, 2021; GUO; YANG; XIONG, 2020).

No Quadro 2 são apresentadas as proporções dos materiais cimentícios desenvolvidos em pesquisas aplicadas em impressão 3D e suas respectivas referências.

Quadro 2 – Misturas aplicadas à impressão 3D

Misturas	Materiais*	Qtde de materiais	Traços**	a/cimentício	Ref.
Cimentícias com adições	(OPC) (AC) Areia	575 kg/m ³ 246 kg/m ³ 1206 kg/m ³	1:1,47	0,35	(Rahul <i>et al.</i> , 2020).

Cimentícias com adições	(CEM I)	40%			(Chen <i>et al.</i> , 2020a).
	(AAC)	20%			
	(AMC)	10%	1:1,5	0,30	
	(FC)	0%			
	(OPC)	0,85			(Ma <i>et al.</i> , 2020).
	(CSA)	0,15			
(SA)	0,15	1:1,5	0,35		
(SPO)	0,10				
(AC)	1,24%				
Areia	1,5				
Geo-poliméricos	(OPC)	290 kg/m ³			(Paul <i>et al.</i> , 2018).
	(CV)	278 kg/m ³	1:1,7	0,50	
	(SA)	145 kg/m ³			
	Areia	1211 kg/m ³			
	(OPC)	20%			(Panda e Tan, 2018b)
	(CV)	77,5%	1:1,35	0,45	
(MSA)	2,5%				
(OPC)	600 kg/m ³			(Kazemian <i>et al.</i> , 2017)	
(NA)	0,77 kg/m ³	1:2,3	0,43		
Areia	1379 kg/m ³				
Geo-poliméricos	(CV)	363,6 kg/m ³			(Bong <i>et al.</i> , 2021).
	(FEA)	363,6 kg/m ³	1:1,5	0,36	
	Areia	1090,7 kg/m ³			
	(CV)	400 g			(Guo; Yang e Xiong, 2020).
	(FEA)	50 g	1:1,25	0,30	
	(SA)	50g			
	Areia	750 g			
(CV)	90%			(Panda; Unluer e Tan, 2018).	
(FEA)	10% e 0%	1:1,5	0,46		
(SA)	0% e 10%				
(FEA)	360g			(Zhang <i>et al.</i> , 2018).	
(ESA)	40g	-	0,35		
(CV)	27,85%			(Panda <i>et al.</i> , 2017a).	
(FEA)	1,68%	1:1,5	0,12		
(SA)	3,36%				
Areia	49,55%				
(CV)	27,85%	1:1,5	-	(Ranjbar <i>et al.</i> , 2021)	
Areia	49,55%				

* Materiais utilizados para o desenvolvimento dos materiais cimentícios.

** Selecionados somente as misturas consideradas promissoras de cada pesquisa analisada.

Legenda: (AC) – Argila calcinada com calcário,
(AAC) – Argila com 90% de (MC),
(AMC) – Argila com 40-60% de (MC),
(NA) – nanoargilas,
(CEM I) – Cimento Portland I,
(CSA) – Cimento sulfoaluminoso,
(CV) – Cinzas volantes,

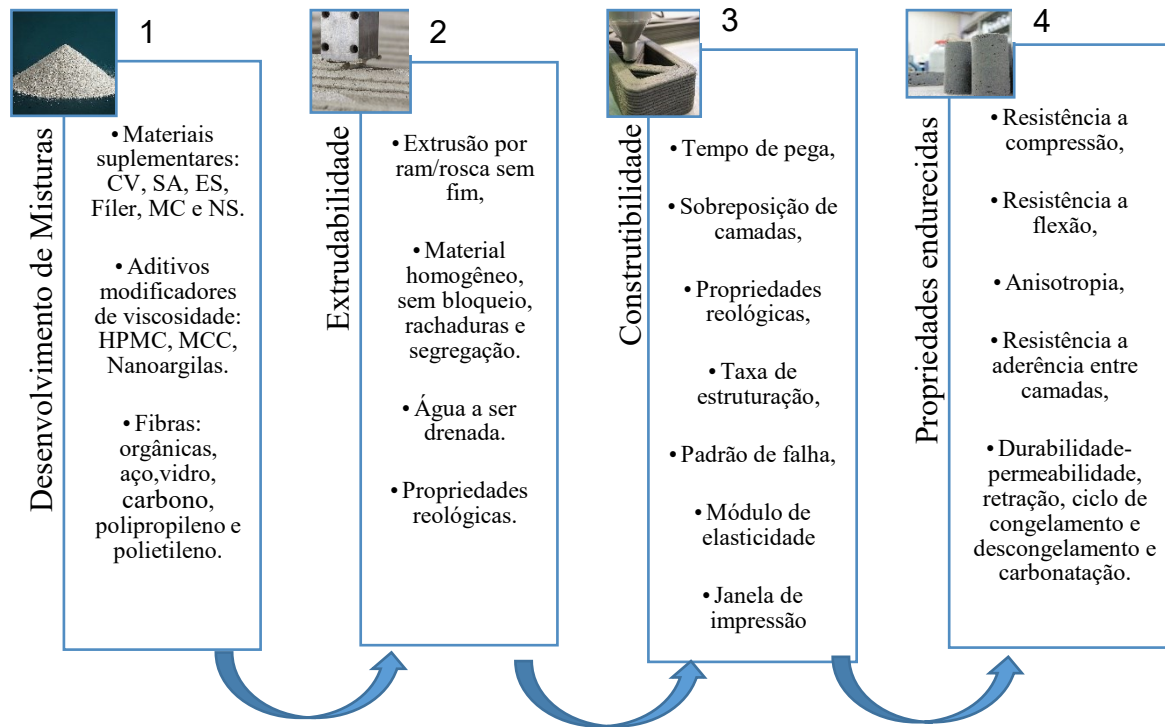
(FEA) – Escória granulada de alto forno,
(ESA) – escória de aço,
(SA) – Sílica ativa,
(SPO) – Sílica em pó,
(MSA) – Microssílica,
(OPC) – Cimento Portland Comum,
(FC) – Fíler calcário.

Fonte: A autora.

Verifica-se através do Quadro 2 que há diversos tipos de misturas cimentícias sendo desenvolvidas em pesquisas voltadas para a impressão 3D sendo que a variabilidade das adições escolhidas depende dos objetivos a serem estudados e dos critérios de extrudabilidade e construtibilidade a serem atendidos. Quanto aos traços estes variam de 1:1,25 a 1:1,7 e a relação água/cimentício de 0,30 a 0,35 para misturas com cimento e de 0,12 a 0,46 para materiais geopoliméricos.

Em relação ao processo de produção do material cimentício aplicado a impressão 3D este é desenvolvido através de 6 etapas: mistura do material cimentício, bombeamento, extrusão, deposição da camada, conformação e o endurecimento (HOU, 2020). De acordo com Qaidi (2022) para garantir a impressão ideal, deve ser alcançado um equilíbrio entre vários tipos de características frescas, que podem ser ajustadas modificando as proporções da mistura de geopolímeros principalmente por tentativa e erro. Na Figura 20 é possível observar as principais etapas do processo de impressão 3D e suas respectivas características.

Figura 20 – Etapas do processo de impressão 3D utilizando materiais cimentícios



Fonte: Adaptado de Hou (2020); Nerella; Krause e Mechtcherine (2020); Lu *et al.* (2019).

Através da Figura 20 é possível visualizar que o processo de impressão 3D compreende as seguintes etapas:

Etapa 1 – Desenvolvimento das misturas – seleção de materiais, adições e aditivos para a sua produção.

Etapa 2 – Extrudabilidade - materiais podem ser extrudados por dois sistemas: ram ou de rosca. De acordo com Hou (2020) no sistema ram os materiais cimentícios são empurrados por um pistão e possuem menores valores de viscosidade quando comparados aos materiais extrudados pelo sistema de rosca, em que uma rosca sem fim provoca a extrusão do material e consequentemente interfere nas suas propriedades reológicas, além disso, neste sistema o material cimentício pode ser alimentado continuamente não havendo interrupções.

Etapa 3 – Construtibilidade – sobreposição de camadas sendo que esta é possibilitada através do tempo de pega, propriedades reológicas, taxa de estruturação, módulo de elasticidade e janela de impressão.

Etapa 4 – Propriedades no estado endurecido – os materiais são avaliados quanto as propriedades mecânicas, aderência entre camadas e durabilidade.

As 4 etapas do processo de impressão 3D são realizadas de forma sequencial e possuem relação entre si, principalmente em se tratando das propriedades reológicas dos materiais cimentícios, pois estas podem interferir de forma simultânea tanto a extrudabilidade quanto a construtibilidade.

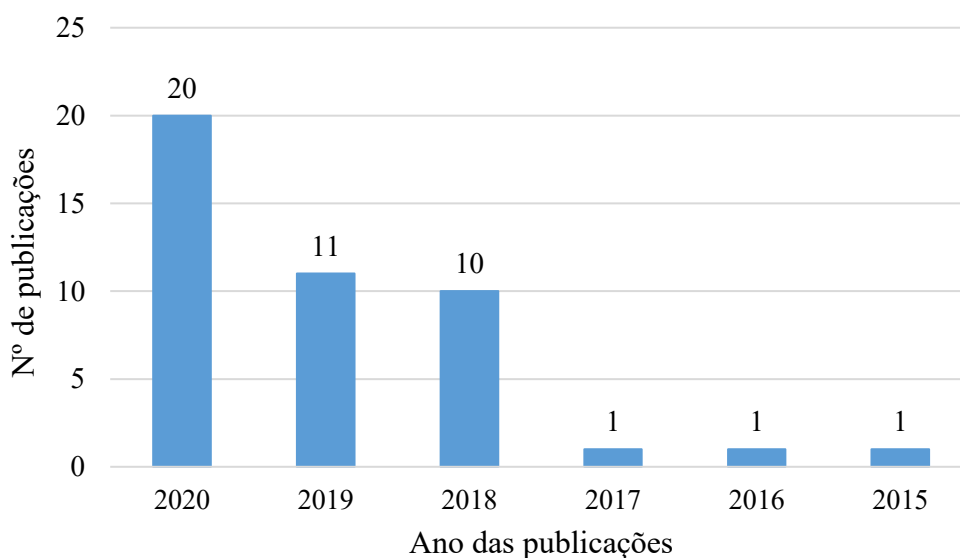
2.2.1 Cimento Portland

Para definição do tipo de cimento desta pesquisa buscou - se na literatura científica pelo método de revisão sistemática detalhado no item 1.2.2 - Lacuna do conhecimento e aspectos de ineditismo, quais eram os cimentos utilizados no desenvolvimento dos materiais aplicados em impressão 3D.

Assim, os 57 artigos pré-selecionados anteriormente foram organizados com o auxílio do software ‘Microsoft Office Excel’ e analisados quanto ao retorno dos tipos de cimento. Observou-se que 3 publicações não utilizaram cimento como material da mistura e sim madeira, polímero e pó de cálcio e 10 não citaram o material, resultando em 44 artigos.

Por fim, dos 44 artigos foram extraídas informações quanto aos autores, ano de publicação, periódico da publicação e tipos de cimento. Na Figura 21 é possível observar os resultados quanto as bibliografias analisadas em termos de quantidade e anos.

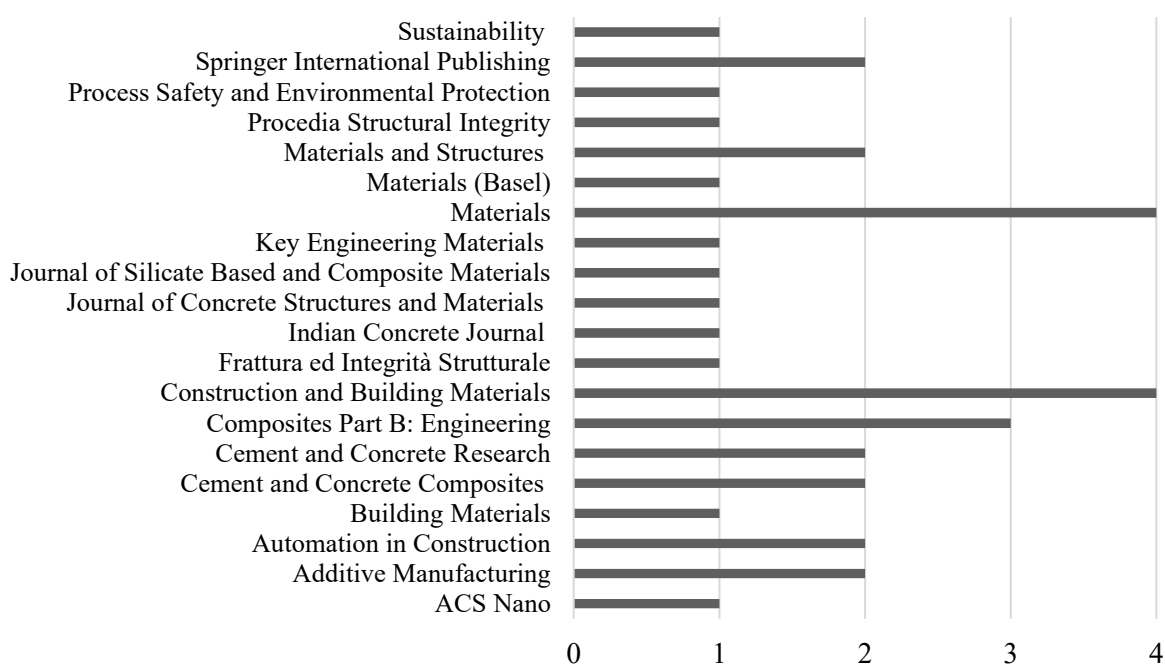
Figura 21 – Número de publicações de pesquisas com materiais cimentícios aplicados a impressão 3D



Fonte: A autora.

Verifica-se pela Figura 21 que a maior parte das publicações foram nos anos de 2018, 2019 e 2020, sendo o ano de 2020 com a maior quantidade de artigos publicados representando aproximadamente 46% do número de publicações total. Além disso, a análise demonstra que as pesquisas foram publicadas recentemente não excedendo um intervalo dos últimos 5 anos. Na Figura 22 pode se observar o número de publicações e suas respectivas revistas.

Figura 22 –Publicações e revistas com pesquisas sobre o desenvolvimento de materiais cimentícios aplicados a impressão 3D

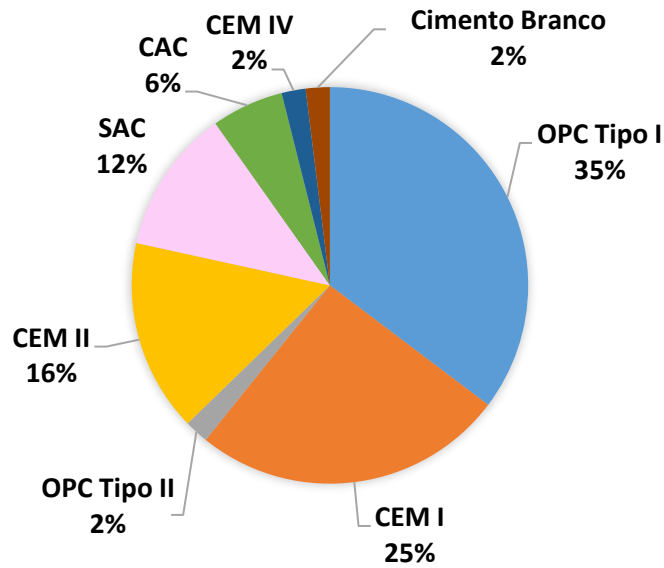


Fonte: A autora.

Em relação as revistas das publicações analisadas, nota-se pela Figura 22 que as 3 revistas que constam o maior número de publicações e seus fatores de impacto são a *Construction and Building Materials* (6.141), *Materials e Composites (3.623) Part B: Engineering* (9.078).

Em se tratando dos 44 artigos que foram analisados, observou-se que foram utilizados 51 tipos cimentos, isto se deve ao fato de que algumas pesquisas utilizaram mais que um cimento no desenvolvimento dos materiais aplicados a impressão 3D. Na Figura 23 é possível observar os cimentos e seu percentual de utilização.

Figura 23 – Percentual dos cimentos utilizados para impressão 3D



Fonte: A autora.

Observou-se que o cimento mais utilizado é o *Ordinary Portland Cement I* (OPC Tipo I) (35%), seguido por *Portland Cement I* (CEM I) (25%) e *Portland Cement II* (CEM II) (16%). Rubin (2021) em sua tese, utilizou da metodologia de revisão sistemática para levantar dados relacionados aos tipos de cimento utilizados e após análise de 66 referências observou que 68% das pesquisas adotavam o OPC Tipo I seguido por 17,1% do cimento CEM I. De acordo com a C-150M (ASTM, 2021) o cimento OPC Tipo I é descrito como um cimento para uso geral, quando as propriedades especiais especificadas para qualquer outro tipo não são necessárias. Na tabela 1 é possível observar as especificações do OPC Tipo I.

Tabela 1 – Especificações cimento OPC Tipo I

Parâmetros	
Tempo de início de pega (min)	≥ 30
MgO (%)	$\leq 2,05$
Resíduo insolúvel (%)	$\leq 2,32$
SO ₃ (%)	$\leq 2,8$
Resistência a compressão (MPa)	
3 dias	≥ 23
7 dias	≥ 33
28 dias	≥ 43

Composição química (%)	
CaO	66,67
SiO ₂	18,91
Fe ₂ O ₃	4,94
Al ₂ O ₃	4,51
SO ₃	2,5
MgO	0,87
K ₂ O	0,43
Na ₂ O	0,12
Perda de ignição	1,05

Fonte: Adaptado de Kondraivendhan e Bhattacharjee (2015); Karuppanasamy e Pillai (2017).

Assim, buscou-se um cimento comercializado nacionalmente que tivesse características próximas ao OPC Tipo I. Observou-se que o cimento Portland CPV possui valores aproximados em termos de resistência a compressão e é o cimento que apresenta menores porcentagens de MgO, resíduo insolúvel e SO₃.

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018) o cimento Portland CP V possui de 90 a 100% de clínquer + sulfato de cálcio em sua composição, quando comparado aos demais cimentos, maior finura, com resíduo na peneira 75µm ≤ 6% e alta resistência inicial ≥ a 14 MPa em 1 dia. Estas características físico-químicas possibilitam que o CPV seja o cimento que possui maior ganho de resistência inicial. Em se tratando de materiais cimentícios para impressão 3D, o uso de CPV é viável pois é o cimento que possibilita o maior ganho de resistência em estado fresco e em poucas idades (Athix).

2.2.2 Agregado

Em materiais cimentícios aplicados a impressão 3D, os agregados podem alterar as propriedades reológicas quando comparado com a pasta de cimento, sendo observado aumento da tensão de escoamento e da viscosidade plástica com a sua adição, especialmente quando possui tamanhos de partículas maiores. Além desses fatores, os agregados podem reduzir a retração na matriz cimentícia, tornando a sua proporção um fator relevante a ser considerado (HOU *et al.*, 2020; BAI *et al.*, 2021).

Le *et al.* (2012) relataram que a distribuição do tamanho de partícula de uma mistura cimentícia aplicada a impressão 3D tem um efeito significativo na sua capacidade de extrusão sendo necessário que a mistura tenha uma trabalhabilidade suficiente para possibilitar a passagem através do bico extrusor sem bloqueios, podendo as partículas de areia causarem entupimento (KHALIL *et al.*, 2017).

Para Lim *et al.* (2012) o processo de extrusão é fortemente influenciado por diversos quesitos, tais como design, dimensão do agregado, sendo limitada a dimensão do bico de extrusão (LIM *et al.*, 2012). Le *et al.* (2012b) relataram que a distribuição do tamanho de partícula de uma mistura tem um efeito significativo na capacidade de extrusão. Portanto, pode-se dizer que a capacidade de extrusão ideal da mistura pode ser atribuída à graduação de areias.

Como qualquer nova tecnologia, a impressão 3D apresenta algumas limitações relacionadas aos tipos de bombeamento, sendo que esta requer o uso de bomba de deslocamento positivo, sendo a bomba helicoidal comumente utilizada. Uma vez que a maioria das bombas helicoidais não permitem o uso de agregados graúdos, o teor de aglutinante é mais alto em misturas imprimíveis (MOHAN *et al.*, 2021).

Jianchao; Faried e Wengang (2017), afirmam que para uma extrudabilidade adequada o tamanho máximo do agregado não pode exceder 5 mm. Bos *et al.* (2016) observou que para uma extrusão adequada do material cimentício na velocidade de 100 mm/s, as partículas do agregado deveriam ter o diâmetro máximo de 1mm.

Na literatura científica encontram-se pesquisas com utilização de agregado com granulometrias variadas a depender do objetivo do estudo e da adequação do comportamento do material cimentício a impressora 3D podendo variar de 0,13 a 8mm, por exemplo (MA *et al.*, 2020, KRUGER; ZERANKA; ZIJL, 2019, MECHTCHERINE *et al.*, 2019).

Alguns valores encontrados em pesquisas relacionados ao tamanho do agregado utilizado e as proporções adotadas são demonstrados no Quadro 3.

Quadro 3 – Agregados e traços da literatura científica utilizados para o desenvolvimento de misturas

Dimensão do agregado	Proporção	Referências
0,01 a 1 mm	1:1,87	(Rahul <i>et al.</i> , 2018)
0,13 a 0,5mm	1:1,7	(Ma; Li e Wang, 2018)

0,06 a 0,6 mm	1:2,14	(Sharanova; Tovpinets e Dmitrieva, 2019)
< 0,6 mm	1:1	(Liu <i>et al.</i> , 2021)
< 0,9 mm	1:1	(Tao <i>et al.</i> , 2021)
< 1,18 mm	1:1	(Hojati <i>et al.</i> , 2022)
0,06 a 2 mm	1:3,2	(Nerella; Krause e Mechtcherine, 2020)
0,06 a 2 mm	1:3,2	(Nerella <i>et al.</i> , 2018)
< 2mm	1:2	(Rubin, 2021)
< 2mm	1:1	(Mohan <i>et al.</i> , 2021)
< 2 mm	1:1,35	(Panda e Tan, 2018b)
< 2 mm	1:1,5	(Khalil <i>et al.</i> , 2017)
<2,36mm	1:2,3	(Kazemian <i>et al.</i> , 2019)
< 4,75 mm	1:1	(Han <i>et al.</i> , 2022)
< 4,75 mm	1:2	(Kruger; Zeranka e Zijl, 2019)
2,36 a 4,75 mm	1: 2,62	(Bai <i>et al.</i> , 2021)
< 8mm	1:2,5	(Mechtcherine <i>et al.</i> , 2019)

Fonte: A autora.

É possível notar através do Quadro 3, diferentes dimensões de partículas de agregados (0,06 a 8 mm) e de proporções de areia (1 a 3,2). Essas diferenças podem ser ocasionadas devido aos materiais cimentícios serem desenvolvidos e ensaiados em maquinários diferentes, tornando-os ajustados a estes.

2.2.3 Adições Minerais

Adições minerais alternativas parece ser um fator importante para possibilitar o desenvolvimento de materiais cimentícios sustentáveis. De acordo com Hojati *et al.* (2022) dadas as considerações ambientais e de custo, o cimento Portland (PC) pode ser parcialmente substituído por materiais cimentícios suplementares, para produzir ligantes geradores de baixo CO₂ e ainda, a incorporação de adições minerais em materiais cimentícios é necessária para que se caminhe em direção à sustentabilidade.

A incorporação de adições em materiais cimentícios aplicados a impressão 3D pode ter consequências significativas para suas propriedades tais como: alteração na microestrutura tornando-a menos porosa, melhorias na durabilidade e em minimização de custo (BHATTACHERJEE, 2021; MA; LI; WANG, 2018).

Além destes fatores o uso de subprodutos e de resíduos, tais como cavacos de madeira e rejeitos de mineração podem tornar os materiais cimentícios aplicados a impressão menos densos sendo esta uma característica interessante para a construtibilidade pois evita intensas deformações ao se sobrepor camadas (WINTER; HENKE; ALKE, 2016).

Substituir parcialmente o cimento por adições pode ser uma maneira adequada de tornar os materiais cimentícios sustentáveis, visto que a indústria cimenteira é responsável por 7% da emissão global de CO₂ (DONG *et al.*, 2015). Recentemente, alguns pesquisadores estudam adições adequadas para diminuir o consumo de cimento em materiais aplicados a impressão 3D (CHEN *et al.*, 2019). No Quadro 4 constam diversos estudos realizados com diferentes tipos de adições e seus efeitos em materiais aplicados a impressão 3D.

Quadro 4 – Efeitos das adições aplicadas em materiais cimentícios de impressão 3D

Tipos	Efeitos	Referências
(MC)	Houve aumento de 46% na tensão de escoamento nas misturas desenvolvidas com o maior teor de (MC) - 90% em argila calcinada. Melhorou a construtibilidade com a sobreposição de 21 camadas para a mistura com 90% de (MC) em argila calcinada enquanto a mistura com 50% de (MC) obteve sobreposição de 9 camadas. Reduziu a janela de impressão em 50 minutos para as misturas impressas na velocidade de 47mm/s e com 90% de (MC) em argila calcinada. Aumentou a adsorção de água devido a dimensão do grão com alta área superficial. Aumentou a quantidade de vazios encontrados na zona de interface em mais de 100% quando comparada a mistura com teor de 50% de (MC) em argila calcinada.	(Chen <i>et al.</i> , 2020a)
	Diminuiu o tempo de início de pega de 147 min para 52 min nas amostras com teores de 90% de metacaulim (MC) em argila calcinada. Aumentou em 57% a pressão no processo de extrusão na velocidade de 0,25 mm/s e em 50 min	(Chen <i>et al.</i> , 2019)

	e de forma comparativa com a amostra com 50% de (MC) em argila calcinada. Aumentou a resistência à compressão em 28 dias de 15 MPa para 45 MPa para a mistura com 90% de (MC) em argila calcinada.	
	Aumentou o tempo de pega nas misturas e promoveu menores valores de resistência à compressão na porcentagem de 20% em substituição a massa de cimento.	(Hojati <i>et al.</i> , 2022)
(CV)	Reduziu a força de atrito entre as partículas em substituição de cimento.	(Panda e Tan, 2018b)
	Reduziu a retração quando combinadas com baixa relação água/aglomerante.	(Le <i>et al.</i> , 2012)
(FEA)	Melhorou as propriedades mecânicas quando utilizada em substituição de 25% no agregado miúdo. Diminuiu a fluidez e a consistência devido à superfície áspera e de forma angular.	(Dai <i>et al.</i> , 2021)
	Aumentou a resistência a compressão nas idades iniciais e contribuiu para o desenvolvimento de uma microestrutura homogênea quanto utilizado de forma combinada com cinza volante e sílica ativa.	(Panda; Unluer e Tan, 2018)
(SA)	Melhorou a coesão no estado fresco, aumentou a resistência mecânica e a impermeabilidade no estado endurecido.	(Mehta e Monteiro, 2013); (Ramezaniapour, 2013).
	Melhorou de forma significativa a taxa de estruturação (Athix) com adição de 2,5%.	(Panda e Tan, 2018b).
	Reduziu as deformações nas camadas e aumentou em 7% a resistência a compressão quando comparado a amostra de referência sem adição de (SA).	(Kazemian <i>et al.</i> , 2017)
(FC)	Melhorou a capacidade de impressão de misturas quando combinado com a adição de cinza volante (CV).	Alghamdi; Nair e Neithalath, 2019)
	Melhorou a capacidade de impressão de misturas ativadas por álcalis.	(Rahul <i>et al.</i> , 2020)
	Melhorou a construtibilidade das misturas.	(Bos <i>et al.</i> , 2020)

	Para misturas com maior teor de aglutinante a adição de (FC) não influenciou na resistência à compressão.	
(NS)	Reduziu a consistência e o tempo de pega, aumentou a tensão de escoamento e a viscosidade plástica devido ao efeito acelerador. Refinou a estrutura dos poros, aumentou a resistência e a durabilidade.	(Hou <i>et al.</i> , 2020)
	Acelerou o tempo de início de pega para 40 minutos na amostra com 6% de (NS) em adição a massa de cimento CEM I 52,5 e quando comparado com a amostra de referência sem (NS) que obteve como resultado 85 minutos. Aumentou a tensão de escoamento de 100 Pa para 700 Pa na adição de 6% em relação a massa de cimento CEM I 52,5. Acelerou a hidratação devido a formação de hidróxido de cálcio (CH) nas misturas e consumo de silicato tricálcico (C ₃ S). Melhorou a construtibilidade e promoveu diminuição da anisotropia dos poros.	(Sikora <i>et al.</i> , 2021)
(NA)	Aumentou a taxa de estruturação (Athix) quando combinadas com éter de policarboxilato (0,2 e 0,3%).	(Moeini; Hosseinpour e Yahia, 2020)
	Reduziu a consistência e aumentou consideravelmente a viscosidade e a coesão.	(Kazemian <i>et al.</i> , 2017)
	Melhorou a qualidade de impressão resultando em uma superfície mais lisa sem ranhuras aparentes.	(Hojati <i>et al.</i> , 2022).

Fonte: A autora.

Conforme pode ser observado no Quadro 4, as adições interferem tanto no estado fresco quanto no estado endurecido de materiais cimentícios aplicados a impressão 3D. É importante ressaltar que o filer calcário (FC) e as argilas destacam-se como candidatos ideais de matéria-prima pois são abundantes em todo o mundo (SCRIVENER *et al.*, 2017).

Considerado um material de natureza pozolânica, o metacaulim (MC) é um silicato de alumínio anidro formado pela calcinação da argila caulim a uma temperatura de 600–900 °C. Caulim é uma rocha granulada branca e fina, com caulinita como constituintes minerais

dominantes ricos em silicato de alumínio (LIU *et al.*, 2022; RAHEEM; ABDULWAHAB; KAREEM, 2021).

Durante o processo de calcinação as argilas perdem os íons hidroxila, transformando-se em metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$) de estrutura predominantemente não cristalina e com elevada finura. Devido à calcinação, a estrutura em camadas da fase cristalina da caulinita é destruída, apresentando uma estrutura molecular desordenada, com isso os átomos de silício e de alumínio são convertidos em substâncias ativas com atividade pozolânica. Além disso, devido ao metacaulim (MC) ter em sua composição sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) e partículas menores que $16\mu m$, este promove alterações reológicas nos materiais cimentícios (LIU *et al.*, 2022; HOU 2020; ROCHA *et al.*, 2017; MEDINA, 2011).

Rocha (2005) investigou as propriedades físicas e químicas em três tipos de MC de alta reatividade e obteve resultados de área superficial de 170000, 220000 e 230000 cm^2/g . E que os teores de alumina, sílica e óxido de ferro, somados, superaram o percentual de 90%. O autor concluiu que os três MC são considerados de alta reatividade sendo este considerado um material nominalmente amorfo (vítreo ou não-cristalino) e são indicados para uso em produtos à base de cimento Portland.

Rojo-López *et al.* (2022) analisou o desempenho de concreto autoadensável com composição de pasta desenvolvida com fíler calcário e metacaulim substituindo cimento nas porcentagens de 75% de cimento e 25% de fíler calcário e em 60% cimento, 25% fíler calcário e 15% metacaulim. Os autores concluíram que a viscosidade diminuiu em 43,3% quando o cimento foi substituído por fíler calcário e aumentou 73,1% quando o cimento foi substituído por 15% de metacaulim e fíler de calcário. Os autores concluíram que o uso de materiais alternativos, particularmente o metacaulim, provou ser uma opção interessante para melhorar o desempenho sustentável do concreto.

Wild; Kathib e Jones (1996) estudaram a adição de (MC) em concretos na porcentagem de 0 a 30%. Os autores observaram mudança na resistência com o tempo de cura de até 90 dias, sendo que o uso da adição considerado como ‘efeito fíler’, de aceleração na hidratação cimentícia e reação pozolânica. Com os resultados foi possível estabelecer um nível ótimo de substituição de cimento Portland de 20% em massa e contribuição da resistência observada posteriormente aos 14 dias.

Chen *et al.* (2020a) que investigaram as influências de dois tipos de argilas calcinadas com 50% e 95% de (MC). A argila com 50% de (MC) foi utilizada nas porcentagens de 20%, 30% e 40% em relação a massa de cimento e a com 95% de (MC) nas

porcentagens de 10% e 20%. Os autores observaram que o aumento da porcentagem de (MC) na mistura melhorou consideravelmente a construtibilidade e reduziu a janela de impressão e por outro lado levou a formação de vazios na região de interface da amostra enfraquecendo a resistência à compressão em 7 dias.

Bohuchval *et al.* (2020) estudaram os efeitos do (MC) nas porcentagens de 20, 12 e 6% e de cinza volante na porcentagem de 22% em substituição à massa de cimento CEM I 52,5 N em misturas desenvolvidas na proporção de 1:2. Os pesquisadores observaram decréscimo na consistência (de 209 para 199 mm) com o aumento da porcentagem de MC (de 6 para 12%), aumento da tensão de escoamento (de 845 Pa para 1704 Pa) e de demanda de água. Estes resultados foram justificados devido à elevada área superficial do (MC) (14100 cm²/g) e os teores de silicato e de aluminato em sua composição química tornando as superfícies pozolânicas reativas.

De acordo com Cassagnabere *et al.* (2013), a natureza, o teor de impurezas e a porosidade superficial do (MC) são os principais parâmetros que afetam a demanda de água e as propriedades de fluxo nas argamassas desenvolvidas com (MC).

Kaushik *et al.* (2022) estudaram os efeitos de nanoargilas com adição de 0, 3 e 6 kg/m³ em misturas cimentícias desenvolvidas com 641 kg/m³ de CEM I 52.5 N, 96 kg/m³ de CV e 2,1 kg/m³ fibras basálticas aplicadas na impressão 3D. Os autores observaram redução da consistência (de 255 mm para 210 mm), conforme o aumento da quantidade de nanoargilas nas misturas e aumento na tensão de escoamento da argamassa (de 946 Pa para 1558 Pa). Os pesquisadores justificaram este comportamento devido a sua elevada área superficial e ao tamanho da partícula de nanoargila, que é menor quando comparada a cinza volante e ao cimento.

Chen *et al.* (2019) investigaram os efeitos de diferentes argilas calcinadas em materiais cimentícios, a primeira contendo de 40 a 50% de (MC), e a segunda com aproximadamente 90%, as substituições foram de 25%, 50%, 75% e 100%. Os pesquisadores concluíram que o aumento do teor de (MC) na argila calcinada intensifica significativamente a tensão de escoamento e de estruturação, diminui o tempo de pega inicial e melhora a resistência a compressão.

Kocak (2020) estudou os efeitos de MC em substituição a massa de cimento CEM II 42,5 R nas porcentagens de 0, 5, 10 e 15 e 20% e obteve os resultados de 215, 185, 175, 170 e 170 min para o início de pega e de 265, 255, 225, 215 e 210 min para o fim de pega de. O autor concluiu que a substituição de (MC) promove menores tempos de início e fim

de pega devido ao efeito acelerador na hidratação cimentícia causado pela reação pozolânica do MC com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e da calcita (CaCO_3).

Chen *et al.* (2019) estudaram argamassas na proporção de 1:1,5 desenvolvidas com adição de (MC) com diferentes graus de calcinação (40 a 50% e 90%) nas proporções de 0%, 100%, 75% e 50% em relação a massa de cimento CEM I 52,5 R, filler calcário em 0%, 25% e 50% e aditivo modificador de viscosidade em 0,6%. Os autores concluíram que o aumento dos teores de (MC) em argila calcinada acelerou o início de pega em até 206 minutos quando comparada a referência.

Vicentini; Camara e Tashima (2016) estudaram a substituição de (MC) em concretos de alto desempenho (CAD) nas porcentagens de 5,10, 15 e 20% como substituição a massa de cimento e concluíram que o teor de substituição de 10% obteve os melhores desempenhos nas propriedades mecânicas quando comparado a referência. Chen *et al.* (2020b) pesquisaram sobre os efeitos reológicos e de construtibilidade com a utilização de até 3% de (MC) combinado com cimento sulfoaluminoso (SAC) e concluíram que o uso de (MC) proporcionou melhorias na tixotropia e na construtibilidade.

Verifica-se na literatura científica, o uso do (MC) de forma combinada com outras adições. Em pesquisa com desenvolvimento de materiais cimentícios aplicados a impressão 3D com adição de sílica (SA) observou-se um aumento da capacidade de impressão em termos de tensão de escoamento e construtibilidade, os autores sugeriram que a utilização de (MC) incorporado na mistura poderia melhorar ainda mais as propriedades no estado fresco (PANDA e TAN, 2018b).

Dessa forma, conclui-se que projetar e formular materiais de impressão 3D eficazes requer compreender a relação entre a dosagem da mistura, a seleção de adições minerais e aditivos químicos e a resposta do material em relação ao tempo, ou seja, suas características do fluxo e propriedades reológicas sob a influência do processo de impressão (KHAN; SANCHEZ; ZHOU, 2020).

2.2.4 Aditivos Químicos

De acordo com Rubin (2021) como as misturas cimentícias voltadas a aplicação 3D possuem comumente partículas finas em sua distribuição granulométrica a incorporação de aditivos superplastificantes torna-se imprescindível. Para Chen *et al.* (2020c) a tecnologia de impressão 3D com materiais cimentícios deve atender a requisitos reológicos

contraditórios: alta fluidez durante o bombeamento e extrusão, e alta estabilidade e viscosidade em repouso para atender a construtibilidade, tornando necessária a utilização de agentes modificadores de viscosidade (AMV) e argila calcinada.

De acordo com Lu *et al.* (2019) para garantir o processo de extrusão contínua e evitar o entupimento, superplastificantes devem ser adicionados para melhorar a fluidez e o bombeamento e possibilitar após o material extrudado ter resistência suficiente para suportar seu peso e das camadas a serem sobrepostas.

Li; Wang e Guowei (2018) em suas pesquisas sobre análise do desempenho mecânico dos componentes impressos, observaram que a incorporação de um teor de 1,5% de aditivo modificador de viscosidade (AMV) promoveu aumento na resistência à flexão em 25% e reduziu efetivamente a deformação do material sob seu próprio peso, propriedade considerada crítica para a impressão 3D. Kazemian *et al.* (2017) utilizaram aditivo modificador de viscosidade (AMV) e observaram aumento na viscosidade plástica e na coesão das misturas.

Considerado como um tipo de aditivo modificador de viscosidade (AMV) o aditivo hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) promove retenção de água, auxilia na trabalhabilidade e no tempo em aberto em materiais cimentícios (MC QUÍMICA, 2021). O HPMC é considerado um éter de celulose, obtido por meio da celulose. A celulose é um polissacarídeo não solúvel em água devido a fortes ligações de hidrogênio. Para a obtenção de éteres de celulose ocorre a substituição de grupos hidroxila por grupos funcionais, conferindo ao HPMC solubilidade em água através da diminuição da cristalinidade da molécula. (PATURAL *et al.*, 2011).

A substituição por grupos funcionais ocasiona diferentes pesos moleculares nos éteres de celulose. Patural *et al.* (2011) estudaram os efeitos na consistência e de retenção de água em argamassas com HPMC com diferentes pesos moleculares e concluíram que na porcentagem de 0,27% em relação massa da mistura seca (cimento CEM I 52,5 R, areia e carbonato de cálcio) o aumento do peso molecular do HPMC (225 kDa para 910 kDa) levou ao aumento na consistência (0,6 para 71,5) Pa sn e de retenção de água (96,8% a 98,9%).

Ma *et al.* (2018) estudaram os efeitos em pastas desenvolvidas com cimento Portland comum 42,5 e com adição de 0 a 0,20% de HPMC em relação a massa de cimento e observaram aumento de viscosidade de aproximadamente 0,25 a 2,25 Pa.s. Os autores concluíram que o aumento da viscosidade está relacionado a adsorção de várias partículas de cimento pela molécula de HPMC, por meio da combinação entre Ca^{2+} e grupos éter (R-

O–R). E ainda, os grupos éteres e hidroxilas podem polarizar as moléculas de água e formar pontes de hidrogênio fixando desta forma a água dentro do HPMC.

Pourchez *et al.* (2006) estudaram dois tipos de HPMC com diferentes pesos moleculares (350 e 1010 kDa) adicionados em argamassas na porcentagem de 0,27% em relação a massa seca (cimento CEM I 52,5 R, areia e carbonato de cálcio) e observaram que o aumento dos pesos moleculares provocou maiores valores de retenção de água (96,4% e 98,6%). Os autores concluíram que o aumento do peso molecular relacionado ao grupo hidroxipropil presentes nas moléculas de HPMC possuem menores impactos sobre o processo de hidratação cimentícia.

Chen *et al.* (2020 d) estudaram os efeitos na retenção de água e viscosidade em argamassas com adição de HPMC em diferentes proporções em relação a massa de cimento (0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.3 e 0.5) e concluíram que o aumento da porcentagem de HPMC provocou aumento nos resultados de retenção de água e de viscosidade. Sendo que a argamassa com 0,3% de HPMC obteve-se resultados de 95% e de 6 N.mm.min respectivamente. E ainda, os autores observaram que em relação aos agregados o HPMC promoveu uma distribuição de forma regular em argamassas e no intervalo de 10–20 μm .

Chen *et al.* (2018) estudaram os efeitos de diferentes aditivos (HPMC), redutor de água e carbonato de lítio (Li_2CO_3) combinados com cimento sulfoaluminoso para desenvolvimento de materiais para impressão 3D e concluíram que o (HPMC) e o (Li_2CO_3) minimizaram a deformação das camadas e que as porcentagens ideais foram de 0,3% (HPMC), 0,3% de (WRA) e 0,01% de (Li_2CO_3) em relação a massa de cimento.

De acordo com Hojati *et al.* (2022) o aditivo redutor de água é essencial para possibilitar o transporte e extrusão de materiais cimentícios impressos em 3D. Ao analisarem quatro níveis de dosagem de aditivos redutores em relação a massa de cimento (0%, 0,1%, 0,3% e 0,5%) verificaram aumento na resistência a compressão aos 28 dias até a porcentagem de 0,3%, sendo que maiores porcentagens aumentaram o fluxo das pastas e com isso poderiam promover colapso durante a impressão.

Zhu *et al.* (2021) estudaram os efeitos do uso de diferentes porcentagens de (HPMC) em misturas cimentícias e sua relação com a construtibilidade, os resultados mostraram que a mistura contendo 0,06% de hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) em relação a massa de cimento e a/c de 0,27 apresentou a maior tensão de escoamento e resistência inicial, sendo considerada promissora. O efeito de aumento da viscosidade pelo hidroxipropilmetilcelulose

(HPMC) é justificado pelo fato de que o aditivo promove interação entre as partículas de cimento.

A influência de diferentes combinações de (HPMC) e superplastificante foi estudada por Rahul; Sharma e Santhanam (2020) que observaram que o (HPMC) causou aumento da tensão de escoamento nos materiais cimentícios aplicados a impressão 3D. Este comportamento pode ser associado a formação de géis hidrocoloidais. A formação do gel bloqueia os poros dentro do esqueleto granular e torna o material mais resistente ao escoamento.

Chen *et al.* (2020c) relata que o uso de (HPMC) pode competir com superplastificante em relação ao efeito de adsorção no cimento ou outras partículas finas, afetando a dispersão do superplastificante. Além disso, os efeitos competitivos entre o (HPMC) e o superplastificante em uma suspensão podem aumentar a tensão de escoamento e a viscosidade aparente, o que resulta em um aumento significativo da pressão na extrusão.

Ma *et al.* (2018) investigaram pastas com adição combinada de HPMC e superplastificante de policarboxilato e observaram efeito negativo na fluidez, sendo este efeito justificado pelo (HPMC) combinar com Ca^{2+} em solução porosa, resultando em aglomeração, podendo consumir e invalidar o superplastificante, além de promover adsorção competitiva.

Chen *et al.* (2020c) descreve que em microescala efeitos de floculação e retenção de água ocorrem com a adição de modificadores de viscosidade com base celulósica sendo que a retenção de água de suspensões sólidas desempenha um papel importante na formação de camadas de lubrificação para bombeamento de concreto e impressão.

Li *et al.* (2022b) relata que concretos submetidos ao bombeamento sofrem alterações no estado fresco em relação a diminuição da viscosidade e aumento da tensão de escoamento devido à alta pressão e taxa de cisalhamento. E que, a hidratação cimentícia acelerada e a tixotropia são os principais mecanismos que influenciam as mudanças reológicas.

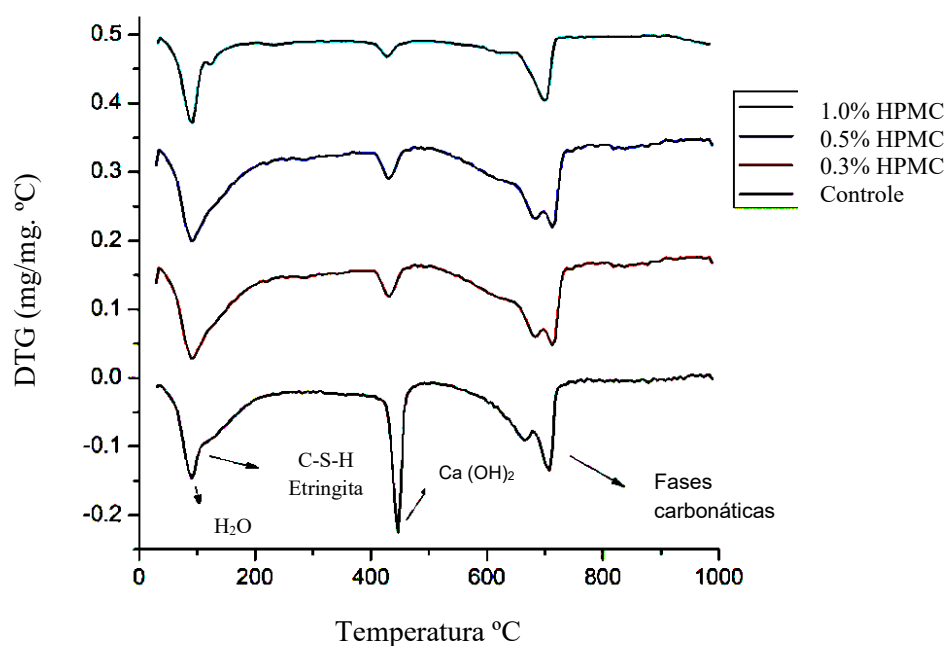
Chen *et al.* (2020d) estudaram o efeito do HPMC na retenção de água em materiais cimentícios e observaram que o aumento do teor de HPMC provocou aumento da capacidade de retenção de água do material cimentício sendo este mecanismo relacionado à capacidade do HPMC de alterar a migração de água e os canais de migração no material cimentício, reduzindo a migração e a perda de água e aumentando a coesão.

De acordo com o Ma *et al.* (2018) o efeito reológico em pastas com HPMC está relacionado a dois aspectos: várias partículas de cimento podem adsorver em uma molécula

de HPMC através da combinação entre Ca^{2+} superficial e grupos éteres (R–O–R) e de que grupos éteres e hidroxilas podem polarizar moléculas de água para formar ligações de hidrogênio, fixando moléculas de água dentro da estrutura molecular da HPMC, e as ligações de hidrogênio podem reticular várias moléculas de HPMC referidas como 'combinação de água livre', resultando em aumento da viscosidade.

Em relação a hidratação cimentícia, Chen *et al.* (2020d) observaram retardo na hidratação cimentícia com o aumento de porcentagem de HPMC em relação a massa de cimento, os pesquisadores justificaram este efeito devido a adsorção na superfície das partículas de cimento e influência na formação dos produtos de hidratação. Na Figura 24 é possível observar os resultados.

Figura 24 - Resultados de análise térmica diferencial na formação de produtos de hidratação cimentícia em diferentes porcentagens de HPMC



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2020d).

Na Figura 24, verifica-se que os picos referentes aos produtos de hidratação diminuem com a adição de éter de celulose (HPMC), e que no estágio inicial de hidratação do cimento, o (HPMC) desempenha a função de retentor de água justificado pelo efeito de adsorção na superfície das partículas de cimento (CHEN *et al.*, 2020d).

Pourchez; Grosseau e Rout (2010) estudaram a influência dos éteres de celulose nos processos de hidratação do trissilicato de cálcio (C_3S). Os autores observaram que houve precipitação de portlandita $Ca(OH)_2$ e uma diminuição significativa da quantidade inicial dos núcleos de C-S-H além de modificação na taxa de crescimento. Concluiu-se que o comportamento de adsorção do éter de celulose é dependente de sua estrutura química, e que a adsorção é a responsável pelo efeito retardador.

Liu *et al.* (2021) desenvolveram espumas de concreto para aplicação em impressão 3D na proporção de 1:1 de cimento e areia, relação a/c de 0,35, agente espumante na proporção de 1:300 e HPMC nas proporções de 0%, 0.12%, 0.2% e 0.3% em relação a massa de cimento. Os pesquisadores observaram que a utilização de HPMC promoveu estabilidade, redução na taxa de escoamento e na densidade e aumento da tensão de escoamento e viscosidade plástica. A estabilização foi justificada pelo fato da adição de HPMC promover redução na tensão superficial nas bolhas e pela formação de filme na superfície (ZHANG; GAO; YU, 2020).

Verifica-se que a utilização de aditivos nas misturas cimentícias podem promover alterações nos aspectos reológicos tais como tensão de escoamento e aumento de viscosidade, tornando necessário para a tecnologia de impressão 3D a compreensão destes conceitos.

2.3 ASPECTOS REOLÓGICOS

A mistura cimentícia deve enfrentar alguns desafios impostos pela tecnologia, tais como as alterações nas propriedades no estado fresco causada por fatores reológicos que podem impedir o material de atender ao formato final. Estes fatores permitem expressar, em termos de requisitos reológicos, o significado de “construtibilidade” ou “capacidade de impressão” (ROUSSEL, 2018).

Em materiais cimentícios aplicados a impressão 3D a reologia é afetada pela mistura, incluindo o volume de aglutinantes, sua composição e características dos agregados (distribuição da dimensão de partícula e sua forma). As misturas podem ser uma ferramenta eficaz para adaptar a reologia, sendo que é necessário buscar um equilíbrio entre a fluidez

durante o processo de impressão e a taxa de estruturação imediatamente após a deposição do material (MARCHON *et al.*, 2018).

A reologia, uma ciência que estuda o fluxo e a deformação de materiais, descreve a relação entre a tensão, taxa de cisalhamento e o tempo (LONG *et al.*, 2019). De acordo com Austin *et al.* (1999) a reologia pode ser definida como a ciência da deformação e do fluxo da matéria e é capaz de explicar as relações existentes entre tensão, deformação e tempo.

No contexto de materiais imprimíveis, reologia se refere a avaliação da tensão de escoamento, viscosidade plástica e tixotropia do material para que este atinja os níveis desejados de extrudabilidade, construtibilidade e resistência à segregação (LONG *et al.*, 2019). Assim, pode se dizer que também está relacionada às propriedades de fluxo antes de ocorrer a deposição (AUSTIN; GOODIER; ROBINS, 1999).

A tensão de escoamento é definida como a tensão de cisalhamento necessária para iniciar o fluxo sendo que esta pode ser considerado como o parâmetro reológico chave, determinando a estabilidade de uma camada em relação ao seu próprio peso e o das camadas superiores. Além disso, o peso cumulativo das camadas superiores é aumentado durante o processo de impressão, sendo que o limite de elasticidade da camada no estado fresco deve evoluir de acordo (MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2020).

A reologia do material cimentício aplicado a impressão 3D deve atender aos requisitos de capacidade de fluxo no processo de impressão, ao mesmo tempo em que garanta a construtibilidade e mantenha a forma após a sua deposição. Simultaneamente, a reação química deve ser lenta para evitar o bloqueio da extrusão, enquanto aumenta com uma taxa relativamente rápida após a deposição para sustentar o próprio peso, bem como aquelas das camadas sequenciais (RANJBAR *et al.*, 2021).

A literatura científica aborda que os fluidos se classificam em não-newtonianos e newtonianos. Os fluidos newtonianos são fluidos onde a relação entre tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento é constante, ou seja, sua viscosidade é única. Já os fluidos não-newtonianos podem ser classificados como Binghamiano, pseudoplásticos e dilatantes. Os materiais cimentícios e concretos são classificados como fluidos não newtonianos. O comportamento destes é definido pela relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento (SÉRGIO FILHO *et al.*; 2020).

Os materiais cimentícios imprimíveis, se comportam aproximadamente como viscoplásticos de acordo com o modelo proposto por Bingham. Assim, pode-se dizer que estes

materiais fluem apenas quando submetidos a tensões superiores ao valor de limite crítico denominado de tensão de escoamento. (ROUSSEL, 2018). No caso dos fluidos não-newtonianos essa relação entre tensão e taxa de cisalhamento não é constante, apresentando uma viscosidade variável (SÉRGIO FILHO *et al.*; 2020).

Austin; Goodier e Robins (1999) relatam que para o modelo dos materiais viscoplásticos proposto por Bingham, a relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de cisalhamento (γ), é dada pela (Equação 1):

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \text{ (Equação 1)}$$

Onde τ_0 é a tensão de escoamento e a relação linear entre τ e γ caracteriza-se pela viscosidade plástica μ . A resistência ao fluxo de um material cimentício bombeado é influenciada por ambos τ_0 e μ . Em materiais cimentícios a viscosidade diminui quando se aumenta a taxa de cisalhamento e, uma tensão de cisalhamento mínima deve ser aplicada para fluir. Este fenômeno depende do método de mistura e do tempo (AUSTIN; GOODIER; ROBINS, 1999).

2.3.1 Taxa de estruturação em materiais cimentícios aplicados a impressão 3D (Athix)

Para o desenvolvimento de misturas promissoras a serem aplicadas a impressão 3D deve se ter controle sobre a taxa de estruturação (Athix) sendo que esta representa a evolução da tensão de escoamento ao longo do tempo (WANGLER *et al.* 2016; ROUSSEL, 2006).

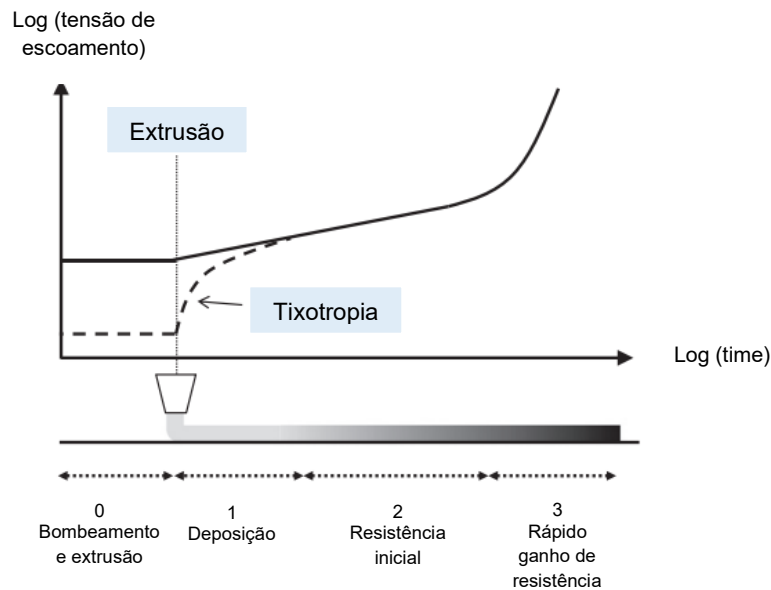
A taxa de estruturação (Athix), começou a ser investigada inicialmente para o aprimoramento de concretos autoadensáveis e se apresenta como uma perspectiva interessante para o controle dos parâmetros do processo de extrusão do material. Sendo que para compreender os fenômenos da (Athix) os mecanismos envolvidos no ganho de resistência e suas consequências práticas sobre os parâmetros de tensão de escoamento e tixotropia precisam ser entendidos (RUBIN, 2021).

Para Schutter *et al.* (2018) e Roussel *et al.* (2018) é importante que o material a ser extrudado tenha uma tensão de escoamento significativa (200 Pa) e um comportamento tixotrópico adequado e que, adições como argilas podem auxiliar o material a atingir um nível de comportamento tixotrópico sem prejudicar a fluidez em estado fresco.

Entende-se por fluidos tixotrópicos, dispersões que quando em repouso são capazes de construir um sistema intermolecular de forças, tendo como consequência, o aumento de sua viscosidade. Para que esse mesmo material seja extrudável, é necessário que uma energia externa ou tensão de cisalhamento seja aplicada de maneira constante (RUBIN, 2021).

A Figura 25 apresenta o mecanismo de evolução da tensão de escoamento relatada em escala log-log e sua relação com as propriedades de materiais imprimíveis.

Figura 25 - Tixotropia em materiais cimentícios impressos



Fonte: Adaptado de MARCHON *et al.*, 2018.

Na Figura 25 é possível observar o efeito da tixotropia no processo de impressão 3D. A direção da deposição do material é representada se deslocando da esquerda para a direita, sendo o material no estado fresco localizado no estágio 1 e o concreto endurecido no estágio 3. O estágio 0 representa o período durante o qual há alta taxa de cisalhamento na mistura através do processo de bombeamento e de extrusão. A partir da deposição no estágio 1, os concretos demonstram uma evolução na taxa de estruturação em repouso. A linha tracejada mostra a construção estrutural em presença de agentes tixotrópicos, que podem ser aditivos químicos (VMA) e adições tais como argilas, sendo estes considerados eficazes para serem utilizados em materiais cimentícios aplicados a impressão 3D (MARCHON *et al.*, 2018).

Hasse *et al.* (2020) estudaram o efeito de quatro aditivos modificadores de viscosidade (VMAs) em materiais cimentícios na proporção de 1: 1,66 com diferentes

porcentagens de adição de argila bentonita, com 0,3 e 0,6% em relação a massa de cimento, em materiais aplicados a impressão 3D e concluíram que os (VMAs) apresentam potencial para alterar a extrudabilidade e a construtibilidade e que os materiais que continham argila bentonítica apresentaram aumento da taxas de estruturação até 62% superiores em relação à mistura de referência demonstrando melhores desempenhos.

2.4 EXTRUDABILIDADE E ENSAIOS

A extrudabilidade tem sido estudada por diversos pesquisadores, que adotam uma definição para o material, em função das suas principais características. O Quadro 5 apresenta as principais definições encontradas na revisão da literatura.

Quadro 5 - Definições da literatura científica sobre extrudabilidade


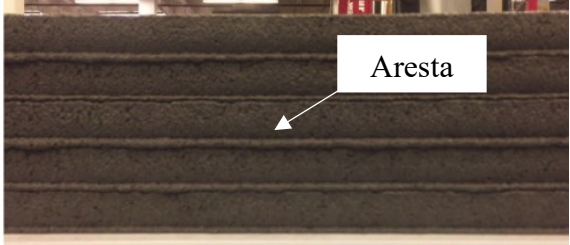

Definição de extrudabilidade	Referências
Capacidade do concreto de passar sob pressão através do bico de contração sem segregação e produzindo um filamento contínuo. A extrusão de concreto através do bico é uma parte essencial do processo de impressão em concreto 3D.	(Rehman e Kim, 2021).
Capacidade do material ser extrudado suavemente como um filamento contínuo saindo do bico de impressão com fluxo desimpedido.	(Zhang <i>et al.</i> , 2021)
Distância máxima sobre a qual uma camada pode ser extrudada sem qualquer falha.	(Rahul <i>et al.</i> , 2019)
Capacidade de um material ser extrudado com consumo mínimo de energia, sendo dependente de sua composição e de parâmetros de taxa de impressão e geometria de saída do bico.	(Nerella <i>et al.</i> , 2018)
Definida pela trabalhabilidade permitindo que o material saia do bico da impressora.	(Khalil <i>et al.</i> , 2017)
Definido por três critérios que devem ser atendidos: camadas contínuas, arestas visíveis e conformidade.	(Kazemian <i>et al.</i> , 2017)
Capacidade de transportar o concreto no estado fresco por um bico extrusor e de forma contínua.	(Le <i>et al.</i> , 2012.b)

Fonte: A autora.

Conforme pode ser observado no Quadro 5 há diversas definições apresentadas na literatura. A metodologia de Kazemian *et al.* (2017) denominada de ‘Qualidade de Impressão’ abrange três critérios para avaliar o material cimentício como promissor em

termos de extrudabilidade e será a adotada para esta pesquisa. O Quadro 6 apresenta os critérios de forma detalhada.

Quadro 6 - Critérios para verificação da qualidade de impressão em materiais cimentícios impressos

Critério da metodologia	Imagens
<p><u>1º critério – Descontinuidade da camada</u></p> <p>A camada impressa deve estar livre de defeitos, sendo necessário que apresente visualmente continuidade e coesão. Verifica-se que problemas na mistura cimentícia podem afetar a extrudabilidade e por consequência produzir camadas descontínuas.</p>	
<p><u>2º critério – Arestas visíveis</u></p> <p>As arestas deverão ser visíveis e quadradas de forma a demonstrar que se manteve o formato do bico extrusor.</p>	
<p><u>3º critério - Conformidade</u></p> <p>O conceito de consistência dimensional se refere as mudanças na largura da camada ao longo do comprimento dentro de variações aceitáveis. Para sua análise são realizadas cinco medições ao longo de cada camada impressa e em quatro amostras para cada mistura. A garantia das dimensões das camadas impressas deve estar dentro de uma faixa aceitável, ou seja, dentro de 10% de erro, para mais ou para menos, em relação as medidas estabelecidas inicialmente.</p>	

Fonte: Adaptado de Kazemian *et al.* (2017).

A qualidade de impressão de uma mistura será considerada "aceitável" apenas se os três critérios são satisfeitos por todas as quatro amostras. Uma abordagem de tentativa e erro será adotada para este propósito, visto que atualmente não há diretriz ou procedimento sugerido para projetar e testar misturas de impressão (KAZEMIAN *et al.*, 2017).

Segundo Guowei e Wang (2017), o design e a preparação da mistura cimentícia para impressão 3D se concentra em otimizar a compatibilidade e coordenação de extrusão do material cimentício com a impressora. Para Albar *et al.* (2020) o sistema de extrusão da impressora é uma parte importante da tecnologia.

Para Nerella *et al.* (2018) um método de teste ideal para caracterizar a extrudabilidade deve possuir os seguintes atributos: ser quantitativo, em linha e contínuo com alto potencial para automação completa, capaz de quantificar a taxa de extrusão do material independente de geometria. O quadro 7 apresenta alguns ensaios apresentados na literatura para análise de extrudabilidade.

Quadro 7 – Análise da extrudabilidade

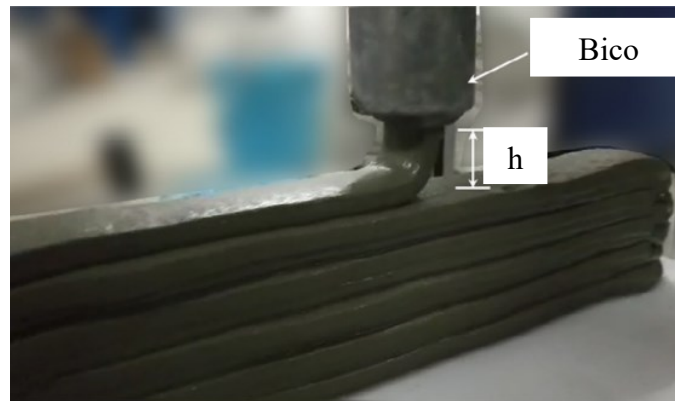
Procedimento	Resultados	Referências
Amostras com comprimento de 390 cm com largura de 35 mm e altura de 10 mm sobrepostas em cinco camadas.	A mistura foi considerada ótima quando não foi observado bloqueio na extrusora e não teve rupturas nas camadas. Mistura promissora com sobreposição de cinco camadas (19500 mm) sem bloqueio durante o processo de impressão.	(Bong <i>et al.</i> , 2021).
Seguiu método qualitativo proposto por Le <i>et al.</i> (2012b). Impressão de 5 camadas únicas de material cimentício (não empilháveis) com 400mm de comprimento, seção transversal de 55mm (l) e 23mm (h) e análise visual do comportamento físico do material, durante o processo de impressão e análise por Kazemian, <i>et al.</i> (2017).	Não houve obstruções na saída do bico e todas as camadas foram impressas sem apresentar ruptura ao longo do comprimento, fissuras ou ainda, segregação ou exsudação do material.	(Rubin, 2021)
Através de extrusora ram pela consideração da taxa de escoamento na extrusora e inspeção visual.	Observadas segregações ao longo das camadas, bolhas de ar da superfície e fissuras no material impresso. Diminuição do teor de areia levou a uma melhor extrudabilidade. A mistura com viscosidade plástica de 1,7 Pa. s resultou em uma qualidade de superfície com fissuras mínimas.	(Moeini; Hosseinpour e Yahia, 2020)

Camadas extrudadas com 2000 mm de comprimento e oito seções de retorno de 250 mm de comprimento. Extrusão ideal com base na maior distância que a camada pode ser extrudada sem sofrer ruptura, sem exsudação e sem bloqueio do bocal.	Todas as misturas frescas foram continuamente extrudadas sem interrupção, segregação e bloqueio, indicando capacidade de extrusão aceitável.	(Ma; Li e Wang, 2018).
Camadas com largura de 38,1 mm extrudadas com intervalo tolerável de 10% de erro na largura. Análise por descontinuidade na camada impressa devido à rigidez excessiva da mistura. Cinco medições feitas ao longo de cada camada impressa para avaliar a conformidade da dimensão e, para cada mistura quatro amostras.	Os resultados indicam que todas as misturas, exceto uma, possuem alta estabilidade de forma quando há um intervalo de tempo de 19 minutos entre as camadas.	(Kazemian <i>et al.</i> , 2017).
Camadas de 9 mm de largura e 300 mm de comprimento avaliadas de acordo com o aparecimento ou não de rupturas.	As misturas com teor de aglutinante de 25 e 30% foram insuficientes. Um a dois por cento de superplastificante foi adicionado para melhorar a extrudabilidade.	(Le <i>et al.</i> , 2012.b)

Fonte: A autora.

Conforme pode ser observado no Quadro 7 de acordo com a extrusão do material é possível identificar misturas promissoras para serem aplicadas a tecnologia. Além destes fatores é importante ressaltar que no processo de impressão há uma relação de equilíbrio estabelecida através da taxa de extrusão e da velocidade de impressão, sendo que a taxa é controlada pela velocidade de rotação da mistura e pela velocidade de movimento do bico extrusor. Além disso, a altura entre o bico extrusor e a superfície de impressão (h) é considerado um fator crítico relacionado ao processo de impressão sendo sua medida correspondente à largura do bico (Figura 26). Estes quesitos são considerados fundamentais para o sucesso da impressão (MA; LI; WANG, 2018).

Figura 26 - Extrudabilidade em material cimentício impresso



Fonte: Adaptado de Ma; Li e Wang (2018)

Yang *et al.* (2023) pesquisou a geometria dos bicos extrusores e a capacidade de impressão, os autores relataram que taxa de extrusão elevada e tensões de compressão próximas ao bico extrusor podem causar deformação localizada e espessuras inconsistentes das camadas. E que, camadas submetidas a velocidades de impressão altas resultam em tensão de tração nas camadas tornando a propensas a rachaduras.

Wolfs *et al.* (2018) relatam que o processo de impressão é influenciado pelos parâmetros relacionados ao material, ambiental (umidade, temperatura e planicidade) e da máquina (posição e velocidade do bico). De acordo com os autores, à medida que a altura do bico extrusor, a viscosidade e a velocidade aumentam, a camada extrudada pode enrolar, resultando em uma superfície não plana. Para solucionar este efeito os autores desenvolveram um método que permite o ajuste em tempo real do processo de impressão. O caminho de impressão foi ajustado à deformação vertical das camadas anteriores do objeto extrudado. Assim, falhas durante a impressão foram evitadas.

De acordo com Nerella *et al.* (2018) se a taxa de fluxo da camada extrudada não for sincronizada com a velocidade da impressão, a estrutura impressa não será contínua ou coesa conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Continuidade e coesão na extrudabilidade



Fonte: Adaptado de Nerella *et al.* (2018).

Tay; Li e Tan (2019) estudaram os efeitos dos parâmetros de vazão e velocidade em misturas cimentícias desenvolvidas nas proporções de 1:1, com cimento OPC 42.5, sílica ativa, cinza volante e areia. Os pesquisadores, por um lado, concluíram que a velocidade e a vazão têm um efeito significativo nas dimensões das camadas. Assim, misturas impressas com maiores vazões e baixas velocidades podem melhorar a resistência mecânica, porém piorar a qualidade das superfícies das camadas. Por outro lado, baixas vazões e altas velocidades de impressão podem promover descontinuidades nas camadas.

Chen *et al.* (2020c) observaram que os parâmetros do sistema de impressão podem interferir na qualidade das camadas impressas, promovendo rupturas superficiais. Isto porque o aumento da porcentagem de HPMC levou ao aumento da tensão de escoamento e de pressão. Assim, foram necessários ajustes nos parâmetros, sendo que para misturas desenvolvidas com 0,14 e 0,24% de HPMC, a vazão foi de 1,45 L/min e a velocidade de 45mm/s e para mistura com 0,48% de HPMC, a vazão foi de 0,65 L/min e a velocidade de 20 mm/s.

Além dos parâmetros de impressão, o formato do bico extrusor pode alterar o resultado do objeto sólido 3D impresso. Paul et al. (2018) estudaram diferentes misturas impressas com bicos retangulares (10 x 20 mm) e circulares com diâmetro de 8 mm e concluíram que o bico circular pode criar espaços vazios entre as camadas impressas diferentemente o com bico retangular ou quadrado. E que os bicos circulares são adequados para impressão de objeto complexo com diferentes ângulos de rotação.

Por fim, conclui-se que os critérios relacionados a extrudabilidade são necessários visto que o material cimentício de impressão 3D é um material "feito sob medida", entregue pelo sistema de bombeamento e extrudado através do bico de uma impressora sendo

necessário manter sua forma estável sob a carga gravitacional de camadas de concreto impressas sem o suporte de fôrma (ZHANG *et al.*, 2021).

De acordo com Nerella *et al.* (2018) pela impressão 3D ser uma nova tecnologia não há métodos experimentais padronizados para a caracterização dos materiais utilizados no processo. Pode se dizer que muitos parâmetros no estado fresco influenciam a extrudabilidade dos materiais cimentícios, como por exemplo a análise de consistência e de reologia (ALBAR *et al.*, 2020).

2.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

De forma geral, verifica-se que ensaios voltados a caracterização do material no estado fresco são necessários para a correlação dos resultados experimentais obtidos com a capacidade de extrusão e posteriormente de sobreposição. Assim, buscou-se na literatura os ensaios de caracterização realizados por pesquisadores e seus respectivos resultados (Quadro 8).

Quadro 8 - Procedimentos e resultados em estado fresco de misturas desenvolvidas aplicadas a impressão 3D

Ensaio	Procedimento	Resultados	Referências
Início e fim de pega	ASTM C403/ C403M – 16 - método de ensaio padrão por resistência à penetração. Mistura com composição de 0,85 de OPC 52,5, 0,85 de areia, 0,15 de cimento sulfoaluminoso, 0,0105 de fibra de celulose e 0,028 de superplastificante.	Início: 90 min Fim: 120 min	(Ma <i>et al.</i> , 2020).
	Teste com Vicat BS 480-2 (EN, 2006). Mistura com 60% de (CV), 25% de (FEA), 15% de (SA), 100% de areia e proporção de 2:1 de Na ₂ SiO ₃ :NaOH.	Início: 33 min	(Albar <i>et al.</i> , 2020)
	C403/C403M (ASTM, 2008) - Resistência a penetração. Mistura com proporção de 1:2,3, 0,11% de (AMV), 0,05% de policarboxilato e 3% de CaCl ₂ .	Início:163 min.	(Kazemian <i>et al.</i> , 2017).

Início e fim de pega	<p>Teste com Vicat - NF 480-2 (EN, 2006).</p> <p>Misturas: (Ref.) com 100% de cimento Portland e (M93/7) com cimento sulfoaluminoso em 7% de substituição.</p>	<p>Ref.</p> <p>Início: 180min.</p> <p>Final: 265min.</p> <p>M93/7</p> <p>Início:110 min.</p> <p>Final: 150min.</p>	(Khalil <i>et al.</i> , 2017)
Reologia	<p>NBR 13278 (ABNT, 2016) – tensão de escoamento por Squeeze Flow em diferentes idades (0, 15 e 30min).</p> <p>Amostra de referência (ref.) desenvolvida nas proporções de 1:2, 0,1 de (SA), 0,3 de (FC), 0,0095 de aditivo dispersante e mistura (T2AC) desenvolvida na proporção de 1:2 com 0,1 de (SA), 0,3 de (FC), 0,014 de aditivo dispersante e 0,02 de acelerador de hidratação.</p> <p>Tensão de escoamento - Schleibinger Viskomat XL.</p>	<p>Ref.</p> <p>0 min:19,7 kPa</p> <p>15 min:42,7 kPa</p> <p>30min:72,74kPa</p> <p>T2AC</p> <p>0min:7,78 kPa</p> <p>15min: 9,68 kPa</p> <p>30min:12,66kPa</p> <p>Ref.</p> <p>3603, 53 Pa</p> <p>T2AC</p> <p>2835,84Pa</p>	(Rubin, 2021)
	<p>Tensão de escoamento, determinada por extrusora ram com pistão conectado a uma célula de carga de 10 kN em 3 misturas desenvolvidos com diferentes proporções de (MC) argila calcinada:</p> <p>LCC: mistura com 40% de CEM I 52,5R, 40% de argila calcinada com 50% de (MC) e 20% de filer calcário.</p> <p>MCC: mistura com 40% de CEM I 52,5R, 30% de argila calcinada com 50% de (MC), 10% de argila calcinada com 95% de (MC) e 20% de filer calcário.</p> <p>HCC: mistura com 40% de CEM I 52,5R, 20% de argila calcinada com 50% de (MC), 20% de argila calcinada com 95% de (MC) e 20% de filer calcário.</p>	<p>Aumento de argila calcinada resultou em maior tensão de escoamento na mistura.</p> <p>LCC: 7,5 kPa</p> <p>MCC:7,5 kPa</p> <p>HCC: 10 kPa</p>	(Chen <i>et al.</i> , 2020a)
	<p>Tensão de cisalhamento e viscosidade aparente em reômetro KinexusLab (Malvern Instruments</p>	<p>41,56 Pa</p> <p>16,46 Pa. s</p>	(Albar <i>et al.</i> , 2020)

	<p>Ltd.) equipado com o software Space (Malvern Panalytical Ltd) medições realizadas imediatamente após a mistura.</p> <p>Mistura com 60% de (CV), 25% de (FEA), 15% de (SA), 100% de areia e proporção de 2:1 de Na₂SiO₃:NaOH.</p>		
Reologia	<p>Tensão de escoamento por teste de penetração por Vicat em diferentes idades (15, 20, 25, 30 e 45) min.</p> <p>Misturas: (Ref.) com 100% de cimento Portland e (M93/7) com cimento sulfoaluminoso em 7% de substituição.</p>	<p>Ref. (2618, 2730, 3133, 5917 e 38217) Pa.</p> <p>MP3/7 (47771, 95541, 95541, 95541, e 95541) Pa.</p>	(Khalil <i>et al.</i> , 2017)
Consistência	<p>NBR 13276 (ABNT, 2016) - Mesa de consistência em diferentes idades (0, 15 e 30min).</p> <p>Misturas: Amostra de referência (ref.) desenvolvida na proporção de 1:2, 0,1 de (SA), 0,3 de (FC), 0,0095 de aditivo dispersante e mistura (T2AC) desenvolvida na proporção de 1:2 com 0,1 de (SA), 0,3 de (FC), 0,014 de aditivo dispersante e 0,02 de acelerador de hidratação.</p>	<p>Ref. 234mm 219mm 198 mm</p> <p>T2AC 237mm 218mm 193mm</p>	(Rubin, 2021)
	<p>Determinada por equação através de dados obtidos por extrusora ram com pistão conectado a uma célula de carga de 10 kN em 3 misturas desenvolvidos com diferentes proporções de argila (LCC, MCC e HCC).</p> <p>Verificar dados detalhados da mistura no item reologia deste Quadro.</p>	<p>Aumento de argila calcinada resultou em maiores valores de consistência: LCC: 25 kPas MCC:30 kPas HCC:39 kPas</p>	(Chen <i>et al.</i> , 2020a)

Consistência	BS 1015-3 (EN,1999) e IS 4031-7(1988) – consistência avaliadas em 3 idades (0, 5 e 15min). Mistura com 60% de (CV), 25% de (FEA), 15% de (SA), 100% de areia e proporção de 2:1 de Na ₂ SiO ₃ :NaOH.	0min: 28% 5 min: 29% 15 min.: 29%	(Albar <i>et al.</i> , 2020)
	GB/T 14902 (2012) – Slump em diferentes idades (10 a 90 min). JGJ/T283 (2012) - Funil V GB/T 2419 (2005) - Mesa de abatimento em diferentes idades (10 a 90 min). Mistura R30 desenvolvida nas proporções de 0,7 de cimento, 0,84 de areia, 0,36 de rejeitos de cobre, 0,2 de (CV), 0,1 de (SA), 0,0029 de superplastificante e 1,2 kg/m ³ de fibra de polipropileno.	10min: 88 mm 90min: 55 mm 22,5s 10 min: 205 mm 90min: 185 mm	(Ma; Li e Wang 2018).
	C1437 (ASTM, 2015) - Mesa de consistência. Mistura com 1:2,3, 0,11% de (AMV), 0,05% de policarboxilato e 3% de CaCl ₂ .	107% a 28% no tempo de 8min e de 90min.	(Kazemian <i>et al.</i> , 2017).

Fonte: A autora.

Conforme pode ser observado no Quadro 8 há diferentes ensaios que possibilitam a análise no estado fresco dos materiais cimentícios aplicados a impressão 3D, tais como: início e fim de pega e parâmetros reológicos. Considerados fundamentais, a tensão de escoamento e a viscosidade plástica podem ser determinados por ensaio de reometria possibilitando caracterizar a mistura como trabalhável, característica essencial para extrusão e deposição de materiais cimentícios aplicados a impressão 3D (MARCHON *et al.*, 2018).

A análise da consistência dos materiais cimentícios permite o seu controle reológico sendo um fator determinante para garantir a qualidade da impressão através da extrudabilidade, qualidade de superfície e conformidade de dimensão. O ensaio de

consistência pode ser realizado através da mesa de abatimento (Figura 28.a) conforme NBR 13276 (ABNT, 2016) e por squeeze flow (Figura 28.b) conforme NBR 15839 (ABNT, 2010).

Figura 28 – Ensaio de mesa de abatimento e squeeze flow

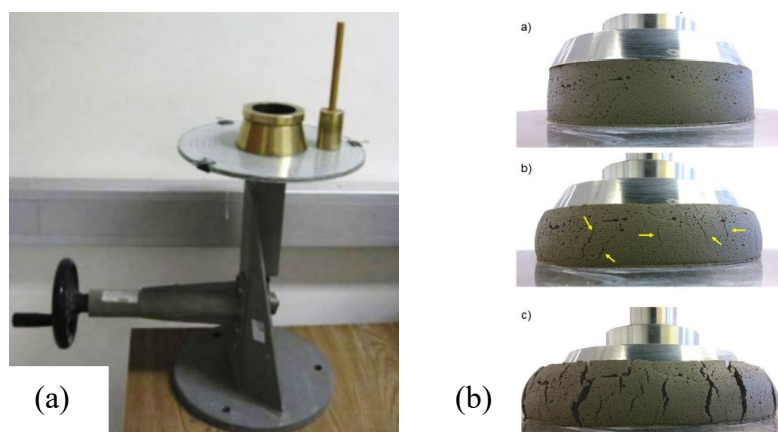


Figura 28. (a) Aparelho e acessórios para mesa de abatimento. **(b)** Ensaio de squeeze flow. **Fonte:** Senff *et al.* (2009) e Rubin (2021).

O ensaio de squeeze flow segue as recomendações da NBR 15839 (ABNT, 2010) em que o acessório contendo placas é acoplado em uma prensa com célula de carga de 1 kN com velocidade constante de 0,1mm/s, com deslocamento máximo induzido de 15mm, e taxa de aquisição de dados de 10 pontos por segundo. Através deste ensaio é possível realizar as leituras de tensão e de deformação de materiais cimentícios, pois o procedimento consiste na compressão da amostra cilíndrica não confinada entre duas placas (Figura 28.b). Através dos dados obtidos de tensão e a deformação das amostras é possível avaliar o comportamento reológico do material em situações distintas, partindo de uma condição estacionária até um elevado nível de deformação (RUBIN, 2021).

Verifica-se que o processo de impressão 3D com material cimentício depende das características do material que poderão alterar a extrusão e a sobreposição de camadas, denominada de construtibilidade. De acordo com Moeini; Hosseinpour e Yahia (2020), além da capacidade de extrusão, um processo de impressão 3D de concreto bem-sucedido depende da capacidade de cada camada de sustentar o seu próprio peso e o peso cumulativo das camadas superiores sendo esta característica denominada de construtibilidade.

2.5 CONSTRUTIBILIDADE E ENSAIOS

A capacidade de sobreposição de camadas denominada de construtibilidade é definida de diversas formas na literatura científica conforme observado no Quadro 9.

Quadro 9 - Definições apresentadas na literatura sobre construtibilidade

Definição de construtibilidade	Referências
Capacidade de um material cimentício extrudado de reter sua geometria (forma e tamanho) sob cargas sustentadas e crescentes no estado fresco ou estado transitório.	(Nerella; Krause e Mechtcherine, 2020)
Capacidade que requer pega rápida e material rígido capaz de manter a forma após ser impresso e suportar a carga proveniente de camadas sobrepostas.	(Baz; Aouad e Remond, 2020)
Capacidade do material de unir camadas e que estas fiquem dispostas de maneira correta, estáveis e rígidas o suficiente para lidar com a sobreposição sem colapsar.	(Khalil <i>et al.</i> , 2017)
Estabilidade de forma definida através da capacidade de resistir a deformações durante a sobreposição de camadas e resistir ao peso próprio, peso das camadas seguintes e a pressão de extrusão.	(Kazemian <i>et al.</i> , 2017)
Camadas impressas que devem se deformar minimamente ao receber o peso das camadas subsequentes.	(Le <i>et al.</i> , 2012)
Resistência do material úmido depositado a se deformar sob ação de cargas.	(Lim <i>et al.</i> , 2012)

Fonte: A autora.

Como pode ser observado a construtibilidade possui diversas definições apresentadas na literatura científica sendo um quesito de considerável importância para a tecnologia pois devido à ausência das formas convencionais é necessário garantir a estabilidade da forma das camadas impressas (MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2020). Para esta pesquisa será considerada a definição proposta por Khalil *et al.* (2017) relacionada a máxima capacidade de sobreposição de camadas.

Assim como a extrudabilidade, a construtibilidade possui diferentes métodos para a sua análise. O Quadro 10 apresenta os procedimentos e os resultados obtidos encontrados na literatura.

Quadro 10 – Análise dos ensaios em relação aos procedimentos e resultados obtidos - construtibilidade

Ensaio	Procedimento	Resultados	Referências
Sobreposição de camadas	Testada imprimindo manualmente várias camadas de material até a falha da estrutura impressa. O dispositivo manual usado foi uma pistola de silicone, em que em uma extremidade se exerce uma pressão manual e na outra o material é extrudado por um bocal com 1 cm de diâmetro.	A mistura cimentícia com adição de cimento sulfoaluminoso permitiu uma pega mais rápida do material e melhor capacidade de sobreposição com um total de 30 camadas.	(Khalil <i>et al.</i> , 2017)
	Avaliada por meio da impressão de uma coluna medindo 200 mm × 300 mm de seção transversal. Com largura e altura de cada camada de 35 mm e 10 mm, respectivamente.	94 camadas sobrepostas com altura de 940 mm sem qualquer deformação perceptível nas camadas inferiores.	(Bong <i>et al.</i> , 2021)
	Dois métodos foram utilizados para avaliar a construtibilidade de diferentes misturas. Método 1- Teste com material extrudado após 20 minutos. Sobreposição de 21 camadas com bico de (40x13,5) mm. Camada com 900 mm de comprimento, 40 mm de largura e 13,5 mm de altura. Intervalo de tempo entre duas camadas definido como 30s. Método 2 - bico circular com 15mm de diâmetro. Comprimento de cada camada de 4.200 mm. Intervalo de tempo entre duas camadas subsequentes de 57s.	21 camadas sobrepostas, misturas com maior quantidade de metacaulim (MC) de 95% em argila calcinada possibilitou maior acúmulo de camadas. 18 camadas sobrepostas para a mistura com maior quantidade de metacaulim (MC) de 95% em argila calcinada.	(Chen <i>et al.</i> , 2020a)

Janela de impressão	Camadas impressas (250x30) mm em linhas paralelas a cada 10 min e analisadas até a ruptura do filamento.	Início: 70 min Final: 80 min.	(Ma; Li e Wang 2018).
	Camadas impressas (250 x 24) mm em intervalos de 5 min até a ruptura do filamento.	Início: 20 min	(Albar <i>et al.</i> , 2020)
	Limites de tempo estabelecidos, sendo um relacionado ao limite de impressão em que a qualidade da camada impressa é afetada pela perda de trabalhabilidade não podendo ser extrudada.	Início: 8 min Final: 90 min.	(Kazemian <i>et al.</i> , 2017).
Conformidade geométrica	Seis camadas geopoliméricas são sobrepostas e examinadas visualmente.	Início: 60 min	(Albar <i>et al.</i> , 2020)
	Mediu-se a variação das alturas das camadas através de imagens feitas pelas laterais após a sobreposição. Obtido índice da estabilidade através da razão entre altura das camadas deformadas pela altura da camada (35mm).	Materiais cimentícios com 0,5% de adição de pó de nanoargila e com maiores valores de tensão de escoamento demonstraram maior estabilidade e menores deformações.	(Moeini; Hosseinpoor e Yahia, 2020)

Fonte: A autora.

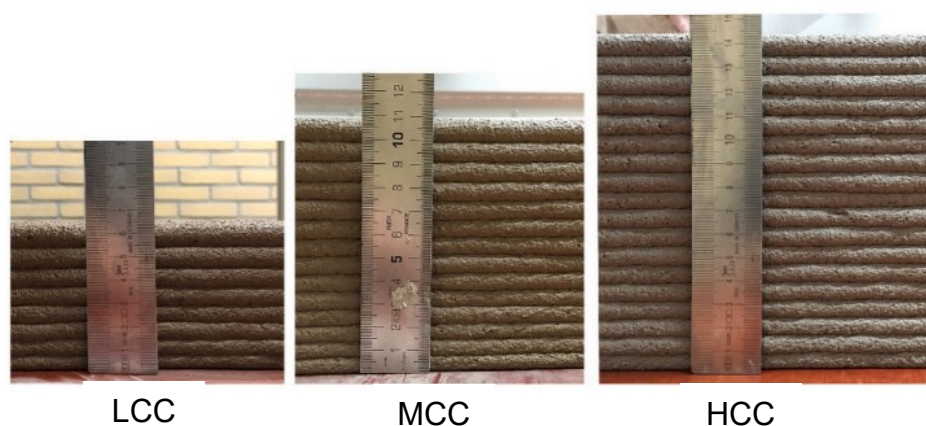
Conforme pode ser observado no Quadro 10 os ensaios que possibilitam a análise da construtibilidade dizem respeito a capacidade de sobreposição de camadas, janela de impressão e conformidade geométrica. Para esta pesquisa será determinada a janela de impressão por meio dos critérios estabelecidos por Ma e Wang (2017).

A sobreposição de camadas é denominada como a capacidade do material extrudado de resistir às deformações durante as sobreposições de camadas posteriores sendo considerada como uma propriedade crítica pois o peso próprio, da camada seguinte e a pressão da extrusão exercem influência significativa (KAZEMIAN *et al.*, 2017).

Chen *et al.* (2020a) analisaram a capacidade de sobreposição de camadas em materiais cimentícios desenvolvidos com diferentes teores de metacaulim (MC) e observaram que com o aumento do teor de metacaulim (MC), a sobreposição das camadas

foi visivelmente melhorada (Figura 29), enquanto a janela de impressão foi reduzida. Uma possível razão para a redução da janela de impressão foi que a utilização de (MC) na mistura pode contribuir para o aumento da flocculação de partículas e da adsorção de água devido ao tamanho de grão fino e elevada área de superfície específica.

Figura 29 - Sobreposição de camadas com diferentes teores de argila



Legenda: LCC – mistura com 40% de cimento CEM I 52,5R e 40% de argila calcinada com teor de 50% de (MC), MCC – mistura com 40% de cimento CEM I 52,5 R, 30% de argila calcinada com 50% de (MC) e 10% de argila calcinada com teor de 95% de (MC), HCC – mistura com 40% de cimento CEM I 52,5 R, 20% de argila calcinada com teor de 50% de (MC) e 20% de argila calcinada com 95% de (MC).

Fonte: Chen *et al.* (2020a).

Beigh *et al.* (2019) estudaram pastas cimentícias com diferentes teores de argila e concluíram que a adição de diferentes argilas calcinadas pode aumentar a taxa de estruturação (Athix) da mistura em repouso quando comparadas a referência. O aumento da (Athix) possibilita misturas cimentícias com melhor construtibilidade.

Para Nerella; Krause e Mechtcherine (2020) a construtibilidade com base no desempenho reológico e mecânico do material não é aplicado em todos os estudos e deve ser prioridade para o emprego da tecnologia, sendo que a utilização de reômetros ou simulação numérica são métodos interessantes. Os pesquisadores estudaram mistura desenvolvida com microsílca e cinza volante (CV) (Figura 30).

Figura 30 – Parede construída com camadas sobrepostas



Fonte: Nerella; Krause e Mechtcherine (2020)

De acordo com os pesquisadores, o ensaio de construtibilidade visa sobrepor camadas em um determinado intervalo de tempo (janela de impressão). Para a parede da Figura 30, por exemplo, foi determinado uma janela de impressão de 2 minutos entre camadas de 700 mm de comprimento, sendo que intervalos de tempo maiores podem reduzir a resistência entre as camadas. (NERELLA; KRAUSE; MECHTCHERINE, 2020).

Meurer e Classen (2021) afirmam que o intervalo de tempo da deposição das camadas subsequentes tem um efeito crucial nas propriedades mecânicas do material, levando a uma severa redução na resistência e energia de fratura por tempos de intervalo mais longos, sendo atribuído este comportamento a desidratação da área da interface que impede a adesão das camadas subsequentes. Os autores observaram com os resultados um comportamento anisotrópico do concreto para cargas de flexão, tração, cisalhamento e compressão.

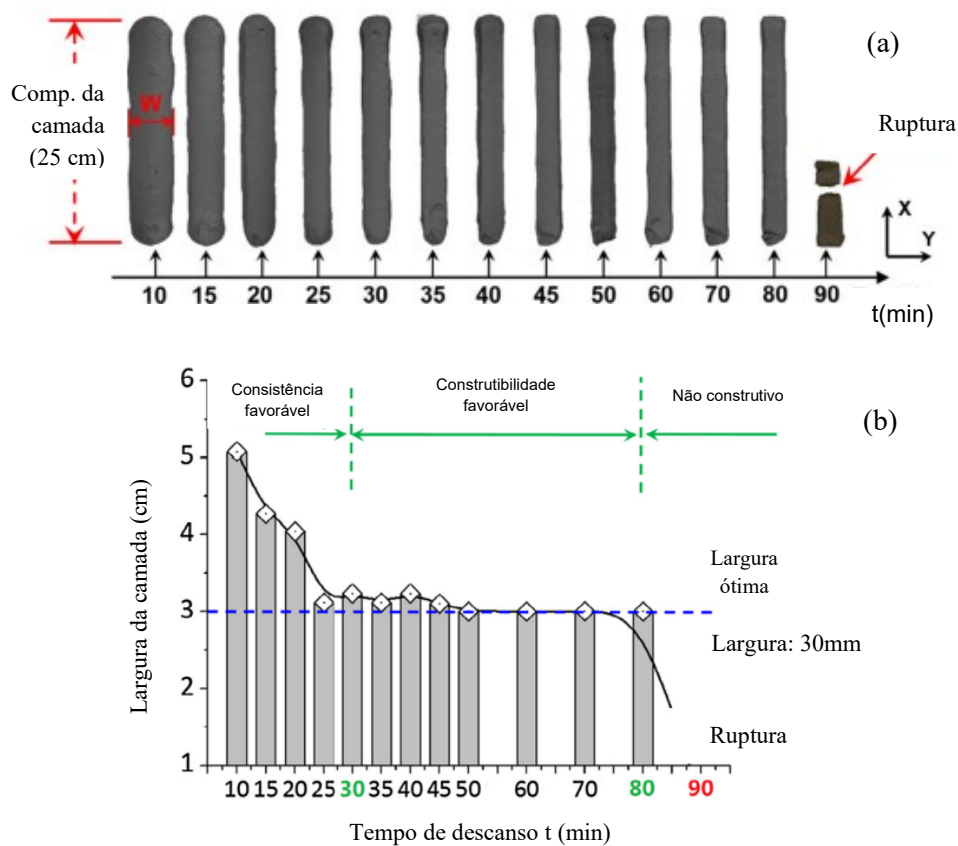
A janela de impressão identifica qual o intervalo de tempo durante o qual a material cimentício mantém uma boa trabalhabilidade para a impressão. Conforme pesquisa de Ma; Li e Wang (2018) camadas de 25 cm são extrudadas em duas linhas paralelas e a continuidade é investigada nos seguintes tempos de repouso (0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80 e 90) min. A janela de impressão é finalizada quando ocorre a ruptura da camada. Assim, é definida como a janela de impressão o período em que as misturas frescas demonstram capacidade de extrusão aceitável. Lim *et al.* (2012) consideram como período em que as propriedades de bombeamento, capacidade de impressão e construtibilidade são consistentes dentro de tolerâncias aceitáveis de forma a possibilitar o bombeamento e a extrusão.

A janela de impressão de um material cimentício tem relação com o tempo de pega, geralmente medido com um aparelho Vicat. No entanto, este equipamento é projetado para determinar o início e fim de pega e não necessariamente é capaz de caracterizar as alterações ocorridas na consistência ao longo do tempo em materiais cimentícios aplicados a impressão 3D (LE *et al.*, 2012).

De acordo com Guo; Yang e Xiong (2020) o tempo de pega, o tempo de extrusão e a velocidade do maquinário podem melhorar a construtibilidade de materiais cimentícios desenvolvidas para impressão 3D, e por consequência, promover maiores alturas de sobreposição.

Nesta pesquisa, a janela de impressão é identificada como o intervalo de tempo durante o qual a material cimentício mantém uma extrudabilidade sem ruptura e uma evolução considerável da tensão de escoamento. Caso se tenha interrupção nas camadas, é assumido que a Janela de Impressão está finalizada. A Figura 31.a apresenta a extrusão de camadas em diferentes tempos e a análise em termos de construtibilidade (Figura 31.b).

Figura 31 - Extrusão de camadas em diferentes tempos – janela de impressão



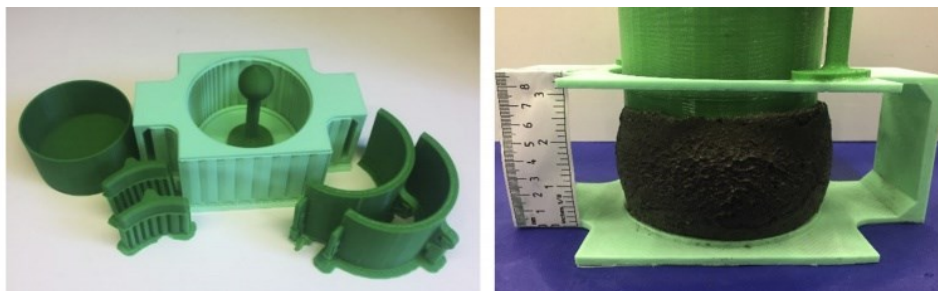
Fonte: Adaptado de Ma; Li e Wang (2018).

Observa-se através da Figura 31.a que o tempo do ensaio se inicia em 10 min sendo que após este tempo a camada é extrudada e apresenta uma interrupção a partir do tempo de 90 min, indicando o fim da extrudabilidade. Portanto, a janela de impressão é recomendada até 70 min, indicando que materiais cimentícios com um tempo de descanso inferior a 70 min podem executar uma capacidade de extrusão aceitável. Além disso a largura da camada altera significativamente quando o tempo de descanso é inferior a 30 min, sendo considerada largura ideal quando se tem larguras das camadas iguais as dimensões do bico extrusor.

Além dos ensaios de sobreposição de camadas e de janela de impressão, a estabilidade da forma, denominada neste estudo de conformidade geométrica é uma propriedade crítica da impressão, pois se refere à capacidade do material de resistir às deformações durante a sobreposição (KAZEMIAN *et al.*, 2017).

O ensaio de estabilidade de cilindro é uma das formas desenvolvidas para avaliação da estabilidade de forma de diferentes misturas. O aparelho de teste inclui uma estrutura, dois invólucros de semicilindro (com juntas verticais vedadas), uma haste de compactação, duas guias de carregamento para aplicação uniforme de carga para espécime de concreto fresco (KAZEMIAN *et al.*, 2017). Na Figura 32 pode se observar o aparelho.

Figura 32 - Aparelho de teste de cilindro



Fonte: Kazemian *et al.* (2017).

Os procedimentos para o ensaio de teste de cilindro seguem os passos descritos abaixo:

1. Os semicilindros são fixados no lugar e travados, e uma camada de material cimentício de 40 mm é colocada,
2. Usando a haste de compactação, a camada é comprimida 15 vezes de forma uniforme e em torno da camada.

3. O mesmo procedimento é repetido para a segunda camada e o material cimentício em excesso é removido da parte superior, resultando em uma altura total de 80 mm.

4. Os dois semicilindros são destravados e removidos com cuidado. Qualquer possível mudança na altura como resultado do peso próprio é medida e registrada.

5. Uma carga de 5,5 kg é aplicada e a deformação resultante no cilindro de material cimentício fresco é medida.

De acordo com Moeini; Hosseinpoor e Yahia (2020) pesquisas voltadas a impressão 3D com materiais cimentícios devem ser direcionadas para atingir um equilíbrio entre a rigidez e a extrusão para se obter estabilidade e extrudabilidade adequadas. Isto porque imediatamente após a deposição, as camadas devem garantir estabilidade de forma aceitável para evitar qualquer deformação na altura e na largura das camadas (SANJAYAN *et al.*, 2018).

A resistência a aderência entre camadas, compressão e flexão dos materiais cimentícios aplicados a impressão 3D são propriedades a serem avaliadas no estado endurecido. A conformidade geométrica é uma das características que pode afetar a aderência entre as camadas dada em função da zona de contato entre elas (Figura 33).

Figura 33 -Ligação entre camadas



Fonte: Chen *et al.* (2020a)

A fraca aderência provoca a ruptura do material e afeta o comportamento mecânico e a durabilidade. Os fatores que auxiliam no rompimento das camadas é a retração

ocasionada pelo excesso de água superficial no processo de extrusão e a rápida evaporação que promove a redução da resistência a aderência (MA *et al.*, 2020).

Panda *et al.* (2017b) relata que para se compreender o a aderência, é essencial medir a força de ligação na interface entre as camadas e que esta pode ser influenciada pelos parâmetros de impressão 3D. Os autores analisaram a mistura geopoliméricas desenvolvida com cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa, areia e silicato de potássio líquido impressa em diferentes tempos (5, 10, 15 e 20 minutos), velocidade (70, 90 e 110 mm/s) e altura do bico extrusor (0, 2 e 4 mm). Os autores concluíram que o maior intervalo de tempo entre as camadas, menor velocidade de impressão e altura do bico extrusor reduziram a resistência entre as camadas.

Padilha (2020) afirma que o intervalo de tempo influência nas propriedades mecânicas, porém nem sempre ocorre de maneira significativa e proporcional ao aumento do intervalo. A anisotropia, é observada de modo geral, quando as camadas se encontram perpendiculares ao plano horizontal em que foram impressas, sendo submetidas à um carregamento, apresentando menores resistências.

Le *et al.* (2012.a), relata que em relação a aderência entre camadas, a baixa fluidez, ocasionada por fator a/c, é capaz de formar vazios entre as camadas tomando a ligação fraca entre as camadas sendo este considerado um aspecto negativo para o desempenho mecânico do material.

Para Ibrahim; Zijl e Babafemi (2023) a aderência entre as camadas depositadas é afetada pelos parâmetros do processo de impressão e pela falta de mistura entre as camadas sobrepostas. Atualmente, não existem normativas específicas para essas análises. O Quadro 11 apresenta os ensaios e os resultados no estado endurecido.

Quadro 11 - Ensaio mecânicos no estado endurecido

Parâmetros	Ensaio	Resultados	Referências
Resistência a tração na flexão	<p>Conforme NBR 13279 (ABNT, 2005), corpos de prova prismáticos, com 4x4x16cm, com duas camadas sobrepostas. Nas idades de 7 e 28 dias. Utilizada prensa Shimadzu, modelo UH-2000 KN, e taxa de aplicação de carga de 50±10N/s para o ensaio de tração na flexão.</p> <p>Misturas: Amostra de referência (ref.) desenvolvida na proporção de 1:2, 0,1 de (SA), 0,3 de (FC), 0,0095 de aditivo dispensante e mistura (T2AC) desenvolvida na proporção de 1:2 com 0,1 de (SA), 0,3 de (FC), 0,014 de aditivo dispensante e 0,02 de acelerador de hidratação.</p>	<p>Aos 7 dias:</p> <p>Ref. 12,04 MPa T2AC 8,08 MPa</p> <p>Aos 28 dias:</p> <p>Ref. 14,85 MPa T2AC 14,12 MPa</p>	(Rubin, 2021)
	<p>BS 196-1 (EN, 2016) três amostras para cada mistura avaliadas após 7 dias em máquina universal (Instron 5960) com célula de carga de 150kN a uma taxa de carregamento constante de 1 mm/min, com a direção de carregamento perpendicular a camada extrudada.</p> <p>Mistura ref. desenvolvida com 0,7 de cimento, 1,2 de areia, 0,2 de (CV), 0,1 de (SA), 0,0029 de superplastificante e 1,2 kg/m³ de fibra de polipropileno.</p> <p>R30 desenvolvida nas proporções de 0,7 de cimento, 0,84 de areia, 0,36 de rejeitos de cobre, 0,2 de (CV), 0,1 de (SA), 0,0029 de superplastificante e 1,2 kg/m³ de fibra de polipropileno.</p>	<p>Ref. 7,8 MPa</p> <p>R30 5,4 MPa</p>	(Ma; Li e Wang 2018).

Resistência a tração na flexão	<p>Conforme T 1761 (GB, 1999) e J70 (JG, 2009) - Ensaio realizado no sentido transversal a sobreposição das camadas do corpo de prova.</p> <p>Misturas na proporção de 1:1 de cimento comum, areia (>5mm) e 0,01% de aditivo acelerador hidróxido de lítio.</p>	<p>Em 2h 2,4 MPa</p> <p>28 dias 8,3 MPa</p>	(Jianchao; Faried e Wengang, 2017).
Resistência a compressão	<p>Conforme NBR 13279 (ABNT, 2005), com a confecção e moldagem de corpos de prova prismáticos, com dimensões de 4x4x16cm, em duas camadas. Nas idades de 7 e 28 dias. Utilizada prensa Shimadzu, modelo UH-2000 KN, e taxa de aplicação de carga de 500±10N/s para o ensaio de resistência à compressão. Para detalhamento da mistura verificar item Resistência a tração na flexão deste Quadro.</p>	<p>Aos 7 dias:</p> <p>Ref. 71,9 Mpa T2AC 75,43 Mpa</p> <p>Aos 28 dias:</p> <p>Ref. 86,98 Mpa T2AC 89,82 MPa</p>	(Rubin, 2021)
	<p>Conduzido sob uma taxa de carregamento de 2,4 kN/s de acordo com as especificações da NEN 196-1(EN, 2016) na idade de 7 dias.</p> <p>Prismas impressos com 800 mm de comprimento, 42mm de altura e 50mm de altura com sobreposição de 4 camadas. Amostras serradas antes de realizar o teste.</p> <p>LCC: mistura com 40% de CEM I 52,5R, 40% de argila calcinada com 50% de (MC) e 20% de filer calcário.</p> <p>HCC: mistura com 40% de CEM I 52,5R, 20% de argila calcinada com 50% de (MC), 20% de argila calcinada com 95% de (MC) e 20% de filer calcário.</p>	<p>LCC 49MPa</p> <p>HCC 39MPa</p> <p>Formação de vazios devido ao aumento de porcentagem de (MC) promoveu aumento de vazios e por consequência diminuiu a resistência.</p>	(Chen <i>et al.</i> , 2020a)

Resistência a compressão	<p>Ensaio de acordo com BS 196-1 (EN, 2016). Três amostras para cada mistura avaliadas após em 3, 14 e 28 dias em máquina de teste universal (Instron 5960, Reino Unido) equipada com célula de carga de 150kN a uma taxa de carregamento constante de 1 mm/min, com a direção de carregamento perpendicular a camada extrudada.</p> <p>Para detalhamento das misturas verificar item Resistência a tração na flexão deste Quadro.</p>	<p>Ref. e R30</p> <p>3 dias: 30 e 37MPa</p> <p>14 dias: 37 e 41 MPa</p> <p>28 dias: 44 e 48 MPa</p>	(Ma; Li e Wang 2018).
	<p>Ensaio realizado em prensa em corpo de prova no sentido transversal as camadas.</p> <p>Misturas na proporção de 1:1 de cimento comum, areia (>5mm) e 0,01% de aditivo acelerador hidróxido de lítio.</p>	<p>Em 2h 13,5 MPa</p> <p>28 dias 58,6 MPa</p>	(Jianchao; Faried e Wengang, 2017).
Resistência a tração entre camadas	<p>Consiste na aplicação de uma carga sobre a amostra de (40x40x40) mm³ com duas camadas sobrepostas até que as camadas sejam separadas.</p> <p>Inserido uma configuração de teste de deformação controlada em circuito fechado para avaliar a resistência à tração e a energia de fratura nas interfaces impressas.</p>	<p>Diminuição na resistência à tração conforme o aumento da janela de impressão, com atenuação a partir de 10 minutos.</p> <p>Maior resultado obtido de aproximadamente 2 MPa, sem janela de impressão e de 1 MPa, com janela de 10 minutos.</p>	(Meurer e Classer, 2021)
	<p>Consiste na aplicação de uma carga sobre a amostra de (50x50x50) mm³ com duas camadas sobrepostas até que as camadas sejam separadas aos 28 dias. Corpos de prova submetidos a tração uniaxial a uma taxa de 500 N/s.</p>	<p>Resultados de aproximadamente 1 MPa para concretos sem e com 40 minutos de janela de impressão e resultado de 0,10 MPa para concretos com 20 minutos de janela de impressão.</p>	(Padilha, 2020)

Resistência a aderência a tração entre camadas	Consiste na aplicação de uma carga sobre a amostra de (50x25x30) mm ³ com duas camadas sobrepostas até que as camadas sejam separadas. Para induzir a ruptura das amostras na interface das camadas, são abertos chanfros nas extremidades.	Resultados de 0,65 MPa para a janela de impressão de 10 e 30 minutos. E resultado de 0,34 MPa para a janela de 20 minutos.	(Sanjayan <i>et al.</i> , 2018)
--	--	--	---------------------------------

Fonte: A autora.

Além das formas de análise das propriedades mecânicas, é importante ressaltar que estas podem sofrer influencia ocasionada pela perda da umidade presente nos materiais cimentícios extrudados. Sanjayan *et al.* (2018) demonstrou que a resistência entre camadas depende das condições de umidade da superfície e do substrato. As condições de umidade da superfície, por sua vez, dependem de vários fatores: processo de impressão, taxa de evaporação, taxa de exsudação das misturas, nível de umidade da superfície durante o processo de extrusão e taxa de secagem.

2.6 UMIDADE SUPERFICIAL

Uma das principais descobertas de materiais cimentícios aplicados a impressão 3D é o fato de que a umidade superficial desempenha um papel importante entre camadas, sendo que a água livre na superfície pode diminuir a sua resistência (MARCHMENT *et al.*, 2017; ROUSSEL *et al.*, 2018). Austin; Goodier e Robins (1999) relatou que o bombeamento e a extrusão induzem à formação de uma "camada de lubrificação", onde constam apenas partículas finas e água. Portanto, quando a mistura sai da extrusora, o teor de umidade na superfície das camadas impressas é o máximo, sendo que uma maior resistência pode ser obtida quando a superfície está em condição de seca saturada.

As condições de umidade da superfície dependem de múltiplos fatores: processo de impressão, taxa de evaporação, taxa de hidratação das misturas, nível de umidade expelido para a superfície durante o processo de extrusão (MA *et al.*, 2020). Para Marchment *et al.* (2017) os fatores vão desde a condição do equipamento, como por exemplo a pressão, tamanho da extrusora, condições do material extrudado, tais como, composição e exsudação.

Dessa forma mais pesquisas devem ser conduzidas a fim de entender claramente as relações do teor de umidade superficial em diferentes tempos (MARCHMENT *et al.*, 2017).

Van der Putten *et al.* (2019) analisaram a evolução da massa de fluido absorvida m_{abs} , que diz respeito a absorção por unidade de área (g/cm^2) de umidade na superfície da camada impressa nos tempos (0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, e 90) min. Na superfície de cada camada extrudada foi colocada uma tira de papel absorvente, pressionada suavemente e medida a sua mudança de massa. O papel utilizado foi o mata-borrão aurora ref.10, com densidade de área de $125 g/m^2$ cortado nas dimensões ($7,5 cm \times 2,5 cm$). Sendo que para cada idade obteve-se 3 leituras.

A massa de fluido absorvido por unidade de área (g/cm^2) da tira de papel é obtida através das seguintes etapas experimentais:

1. A tira de papel é pesada m_{seca} (g) com uma precisão de 0,001 g, colocada na camada extrudada em tempo pré-determinado e pressionada por meio de um peso de plástico que exerce uma pressão uniforme de $77,5 \pm 0,1 Pa$ por 60 s.
2. A tira de papel é pesada para obtenção da massa após possível absorção m_{sat} (g).
3. A massa do fluido absorvido m_{abs} (g) em um determinado momento é obtida pela Equação 2.

$$m_{abs} (g) = m_{sat} - m_{seca} \text{ (Equação 2)}$$

4. A superfície exata da tira de papel A_{sup} (cm^2) é obtida por cálculo reverso conhecendo a densidade de área do papel e o peso seco inicial da tira.
5. A massa do fluido superficial absorvido k pode ser calculada com base na Equação (3).

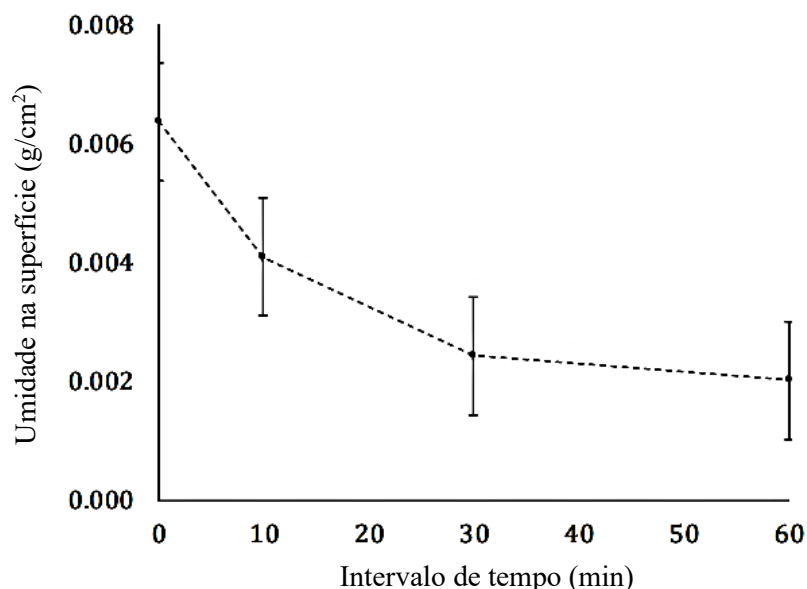
$$k (g/cm^2) = (m_{abs}) / (A_{sup}) \text{ (Equação 3)}$$

6. A massa máxima da área de água absorvida k_{max} (g/cm^2) é obtida por pulverização de água nas tiras de papel até a saturação completa. É usado como um valor de referência que não pode ser excedido por aqueles resultantes do procedimento de teste acima.

Em se tratando de resultados, Van der Putten *et al.* (2019) observaram que para misturas desenvolvidas na proporção de 1:1,5 com cimento CEM I 52,5 N e 0,15% de

superplastificante em relação a massa de cimento, houve diminuição da umidade da superfície (g/cm^2) em relação ao tempo (Figura 34).

Figura 34 – Análise da perda de umidade nas camadas impressas em diferentes tempos

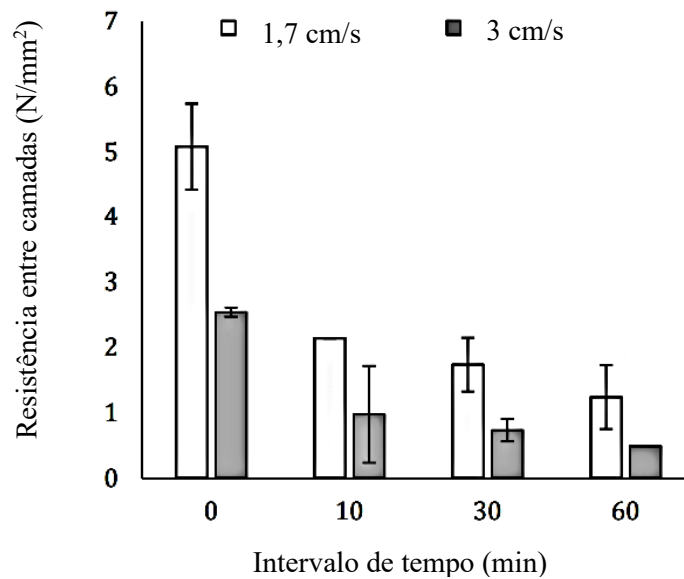


Fonte: Adaptado de Van der Putten *et al.* (2019).

Conforme pode ser observado na Figura 34, no tempo de 0 min tem-se uma umidade de superfície de $0,007 \text{ g}/\text{cm}^2$ e no tempo de 60 minutos de $0,002 \text{ g}/\text{cm}^2$ representando uma queda significativa de $0,005 \text{ g}/\text{cm}^2$. De acordo com os autores a maior evaporação de água é observada durante os primeiros 10 min, com variação de $0,00229 \text{ g}/\text{cm}^2$ e que esta diminuição irá induzir a menor aderência entre camadas sobrepostas (Figura 35).

Na Figura 35 é possível observar os resultados obtidos em amostras impressas em velocidades diferentes ($1,7 \text{ cm}/\text{s}$ e $3,0 \text{ cm}/\text{s}$) ensaiadas em termos de resistência entre as camadas e em diferentes tempos.

Figura 35 - Resultados da resistência entre camadas em diferentes velocidades



Fonte: Adaptado de Van der Putten *et al.* (2019).

Verifica-se na Figura 35 uma queda de resistência em todas as amostras impressas em velocidade de 3,0 cm/s quando comparadas as impressas com velocidade de 1,7 cm/s, de acordo com os autores este fato se deve a ocorrência de maior número de vazios nas amostras impressas com maior velocidade que por consequência diminuíram a resistência.

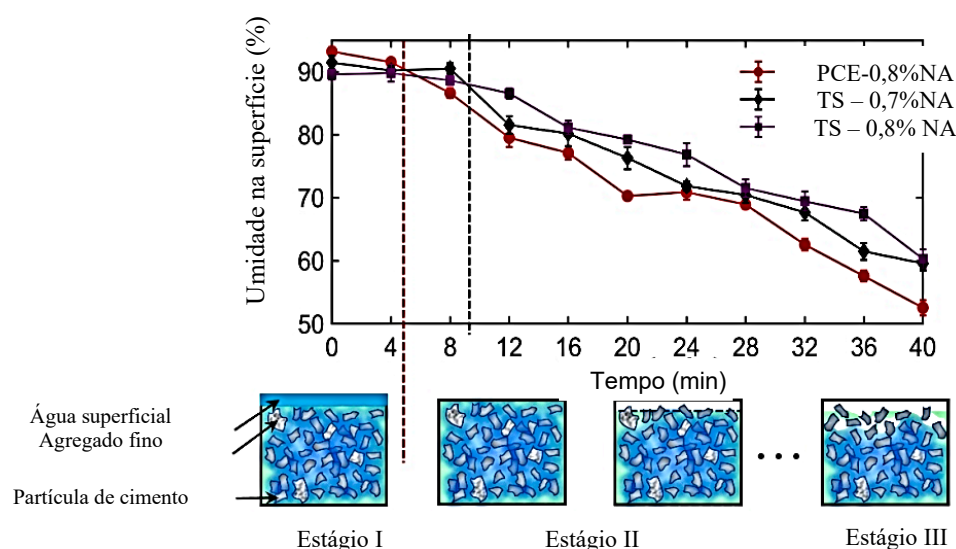
Além desse fator, os resultados da resistência a aderência entre camadas diminuem com o aumento do tempo devido a diminuição do teor de umidade da superfície, isto porque quando a camada fica mais seca absorve mais água da camada superior e, simultaneamente, bolhas de ar podem ocorrer causando vazios e afetando a ligação entre as camadas. Este fenômeno é confirmado pela maior perda ocorrida no intervalo de tempo de 0 a 10 min. (VAN DER PUTTEN *et al.*, 2019).

Sanjayan *et al.* (2018) estudaram o efeito da umidade nas camadas de materiais cimentícios desenvolvidos na proporção de 1:1,5. As camadas foram impressas e permaneceram em repouso nos intervalos de tempos de 0, 10, 20 e 30 min. Em cada tempo foram colocados sobre a superfície da camada uma tira de papel toalha durante 20 segundos. Os autores observaram queda significativa na umidade nos intervalos de 0 a 20 min, referente a 0,34g e 0,19 g respectivamente. Este fato se deve a evaporação constante da umidade da superfície impressa.

Pan *et al.* (2021) estudaram a umidade superficial em misturas aplicadas a impressão 3D desenvolvidas na proporção de 1:1,25 com cimento OPC Tipo II 42,5 com

adição de nanoargilas (NA) em 7% e 8% em relação a massa de cimento e dois tipos de aditivos superplastificantes (PCE e TS) em 0,3%. A umidade foi obtida através da leitura da camada impressa por um equipamento digital JK-C10 em diferentes tempos e em 3 pontos. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 36.

Figura 36 -Umidade superficial nas camadas impressas com adição de nanoargila



Fonte: Adaptado de Pan *et al.* (2021).

Conforme pode ser observado na Figura 36 a umidade superficial da camada para todas as misturas diminui continuamente com o aumento do tempo de descanso, devido à evaporação e à hidratação cimentícia. Além desse fator os pesquisadores relatam que é possível observar a ocorrência de três estágios, sendo que no estágio I a perda de umidade depende principalmente da evaporação da água. No estágio II ocorre alguns produtos de hidratação iniciais, tais como a etringita e o gel C-S-H e no estágio III a umidade da superfície diminui rapidamente devido à alta taxa de evaporação e a hidratação do cimento, e que resulta em uma rápida diminuição na resistência da ligação entre camadas (PAN *et al.*, 2021).

Muthukrishnan *et al.* (2020) estudaram o efeito da resistência entre camadas e sua relação com a umidade através do calor de micro-ondas em materiais geopoliméricos. O ensaio foi realizado através de papel seda colocado sobre a superfície das camadas para absorver água. As camadas impressas foram expostas ao aquecimento de micro-ondas nos

tempos de 0s, 5s, 10s e 20s e a perda de peso do papel foi registrada de cada período de aquecimento. Os resultados demonstraram que a duração de micro-ondas de 10s aumentou a resistência entre as camadas em 132% e por mais que o aumento da perda de umidade tenha sido pelo aquecimento, o aumento da resistência deve-se a aceleração na reação de poli condensação entre as camadas com mínima deformação após serem sobrepostas.

Para Pan *et al.* (2021) a construtibilidade pode afetar indiretamente a resistência entre camadas através da umidade superficial, sendo que o uso de nanoargilas além de aumentar significativamente a taxa de estruturação (Athix), tem a função de cura interna e de retenção de água. Assim, conclui-se que o uso de nanoargilas e superplastificantes podem reduzir a perda de umidade da superfície das camadas impressas em 3D e aumentar a resistência na zona de contato. Esta contribuição pode fornecer uma nova visão sobre materiais de impressão 3D fornecendo extrudabilidade e construtibilidade adequadas e resistência entre camadas.

2.6.1 Análise de temperatura e umidade por termografia infravermelha

A termografia infravermelha (TI) é considerada uma tecnologia não destrutiva e sem contato, capaz de visualizar a distribuição de temperatura de um objeto usando radiação infravermelha emitida pela superfície (LI *et al.*, 2022a). Para Santos; Rocha e Póvoas (2019) a (TI) possibilita resultados rápidos e em tempo real, contudo, só é possível trabalhar com termografia se houver diferenças de temperatura.

A radiação infravermelha emitida pela superfície é coletada pelos detectores e convertida em uma imagem com a distribuição da temperatura superficial do corpo, os termogramas. Neste processo, cada cor é expressa para uma certa faixa de temperatura (BARREIRA; ALMEIDA; DELGADO, 2016). De acordo com Sakamoto e Fioriti (2017) as cores emitem intensidades de radiações infravermelhas diferentes, pois apresentam valores de emissividades distintas e absorvem diferentemente a radiação conforme o aquecimento.

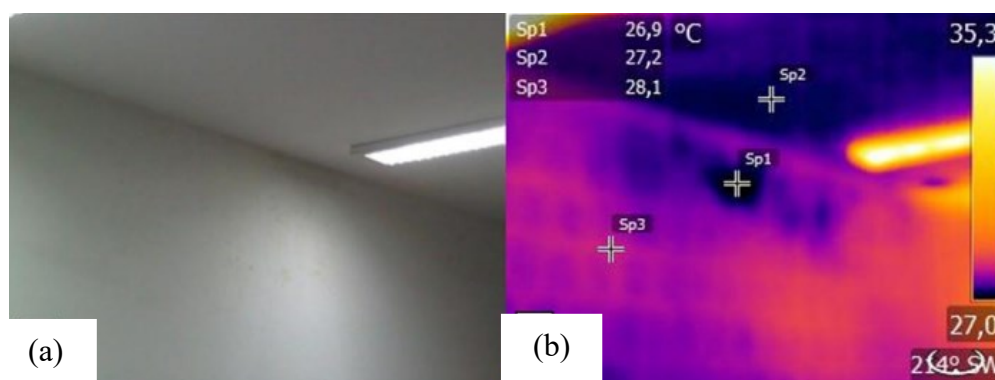
Veratti (2015) relata que os termogramas são imagens térmicas visuais que representam a radiação infravermelha invisível, captada pelos sistemas infravermelhos. Os

termogramas são compostos por uma matriz de pontos denominados pixels que são caracterizados por valores referentes a posição (x,y) e a intensidade (I) de radiação captada pelo equipamento de infravermelho.

De forma conjunta aos valores de posição e intensidade de radiação presente nos termogramas, estes também utilizam uma escala de cores denominadas de paletas, em que as intensidades de radiação medidas em cada ponto do termograma passam a ser representadas por cores específicas (VERATTI, 2015).

Dessa forma, com as cores presentes nos termogramas é possível interpretar uma determinada imagem e relacioná-la por meio de fenômenos existentes, tais como ocorrência de umidade e predominância de calor. Na Figura 37.b, tem-se um exemplo de imagem térmica obtida por meio da pesquisa de Rocha *et al.* (2018) que utilizaram termografia para detectar umidade em ambientes internos.

Figura 37 -Imagem digital e térmica de infiltração em laje



Fonte: Rocha *et al.* (2018).

Figura 37. (a) Imagem digital de ambiente com infiltração em laje. **(b)** Imagem térmica obtida por câmera termográfica de ambiente com paleta de cores.

Verifica-se na Figura 37. b, que as cores violeta e azul referem-se a menores temperaturas e as cores laranja, amarelo e branco a maiores temperaturas. Veratti (2015) relatou que existe relação física entre a temperatura de um corpo aquecido e a cor resultante da radiação visível que ele emite com o fenômeno da incandescência. Em função do aumento de temperatura, os corpos iniciam emitindo na faixa uma radiação vermelha escura, que passa a vermelho claro, laranja, amarelo, branco, azul e violeta.

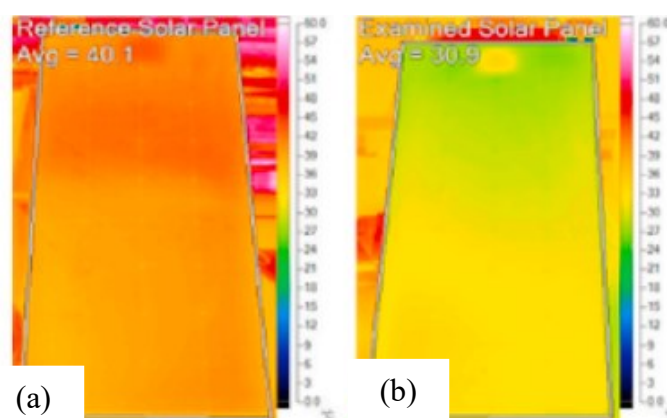
Além da detecção de umidade presentes nos ambientes, verifica-se diversas aplicações da (TI) no desenvolvimento de pesquisas relacionadas a construção civil. Watase *et al.* (2015) utilizaram a (TI) para examinar os efeitos ambientais em delaminações

subterrâneas e vazios no concreto, visando identificar a melhor janela de tempo para inspeções. Os autores concluíram que foi possível determinar a janela de tempo adequada para conduzir inspeções por (TI).

Pedram *et al.* (2022) pesquisou o mecanismo de fluxo de calor em lajes de concreto com defeitos subsuperficiais ocultos. Os experimentos foram realizados em seis lajes com registros de temperatura durante as fases de aquecimento e resfriamento para calcular o contraste térmico. Os autores concluíram que foi possível compreender sobre mecanismo de transferência de calor em concreto com defeitos e apresentar novas direções para a implementação da (TI) para a detecção de defeitos ocultos.

Ahmad *et al.* (2021) utilizaram a (TI) para analisar o resfriamento de painéis de sistema fotovoltaicos por meio de um sistema de ar-condicionado centralizado para compensação da degradação da energia elétrica pela temperatura (Figura 38).

Figura 38 -Imagem térmica de painel fotovoltaico



Fonte: Ahmad *et al.* (2021)

Figura 38. (a) Painel fotovoltaico sem resfriamento. **(b)** Painel fotovoltaico com resfriamento

Por meio da (TI) os autores concluíram que a temperatura elevada tem efeito adverso no desempenho elétrico dos painéis, sendo possível estudar a distribuição de temperatura e a estimativa do desempenho, juntamente com a detecção de defeitos superficiais (AHMAD *et al.*, 2021).

Li *et al.* (2022a) utilizou a (TI) para analisar os defeitos construtivos de edificações relacionados a condução térmica, ventilação e umidade (Figura 39).

Figura 39 -Imagem térmica de edificações



Fonte: Li *et al.* (2022a)

Os resultados mostraram que os defeitos térmicos de condução são os mais comuns nos prédios residenciais, ocorrendo nas juntas de diferentes paredes e nas juntas das paredes e outras estruturas. E que é observada a predominância de umidade em estruturas de madeira e estruturas antigas de paredes de tijolos, obtendo temperatura mais baixa de 28,8 °C, em comparação com temperatura média de 31,6 °C na região livre de anomalias.

Cortizo (2007) diagnosticou anomalia por meio do uso da (TI) em uma edificação do Patrimônio Histórico Cultural Brasileiro, a capela de São Sebastião de Águas Claras localizada em Nova Lima, Minas Gerais (Figura 40).

Figura 40 -Imagens da capela



Fonte: Cortizo (2007).

Os resultados possibilitaram identificar as estruturas de madeira e estruturas de vedação ocultas na capela e, ainda, a presença de algumas anomalias nas alvenarias, sendo

que os mesmos são plenamente validados pela documentação histórica das intervenções promovidas na capela ao longo dos anos. O autor concluiu que a (TI) possibilitará a tomada de decisão para intervenções civis necessárias para conservação e preservação. (CORTIZO, 2007).

Para Marynowicz e Kucharczyk (2021) a (TI) é uma alternativa interessante para testar os parâmetros de umidade dos materiais da construção. De acordo com Barreira; Almeida e Delgado (2016) o problema da umidade nas edificações é uma das principais causas de patologia, podendo degradar os componentes da construção, comprometendo seu desempenho quanto à durabilidade, resistência mecânica, impermeabilidade e aparência.

Rocha *et al.* (2018) analisaram por meio da (TI) a umidade em ambientes internos localizados em áreas vulneráveis a infiltrações. Os autores concluíram as áreas afetadas pela infiltração apresentam temperaturas mais baixas em relação às áreas sem umidade, e consideraram uma ferramenta útil para a detecção de infiltrações não visíveis ou em estágios iniciais.

Para Barreira; Almeida e Delgado (2016) as mudanças no teor de umidade estão relacionadas com as mudanças na temperatura da superfície, sendo detectadas por (TI) devido aos seguintes fenômenos físicos: resfriamento evaporativo na área úmida que induz a diminuição da temperatura, resistência térmica reduzida por meio do fluxo de calor e maior capacidade de armazenamento de calor do material úmido.

Assim, devido ao material cimentício impresso estar sujeito ao resfriamento evaporativo e ser um material úmido, é possível concluir, que a aplicação da termografia no desenvolvimento de materiais impressos 3D pode contribuir para a compreensão dos fenômenos relacionados a aumento de temperatura ocasionadas pelo bombeamento e presença de umidade no material, influenciando na extrudabilidade, construtibilidade e nas propriedades mecânicas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos nesta tese e dar resposta a questão de pesquisa relacionada ao desenvolvimento das pastas e dos materiais cimentícios, a Campanha Experimental foi dividida em quatro Estudos, sendo o Estudo A sobre os ensaios em pastas cimentícias e argamassas e os Estudos B, C e D sobre os efeitos provocados nos materiais cimentícios desenvolvidos com diferentes porcentagens de (MC) em substituição a massa de cimento e na adição de (HPMC) em relação aos aspectos de extrudabilidade, construtibilidade e nas propriedades mecânicas.

As etapas referentes aos estudos experimentais podem ser visualizadas no fluxograma apresentado na Figura 41. No Estudo A foram estudadas pastas cimentícias e argamassas desenvolvidas com diferentes porcentagens de (MC) de 0%, 5%, 10% e 30% em relação a substituição da massa de cimento e 0,3% de aditivo químico (HPMC) sendo estas submetidas aos ensaios de consistência normal, início e fim de pega e retenção de água. Dessa forma, o Estudo A objetivou compreender o comportamento das pastas e argamassas e por meio dos resultados obtidos definir os materiais cimentícios a serem utilizadas nos Estudos B, C e D.

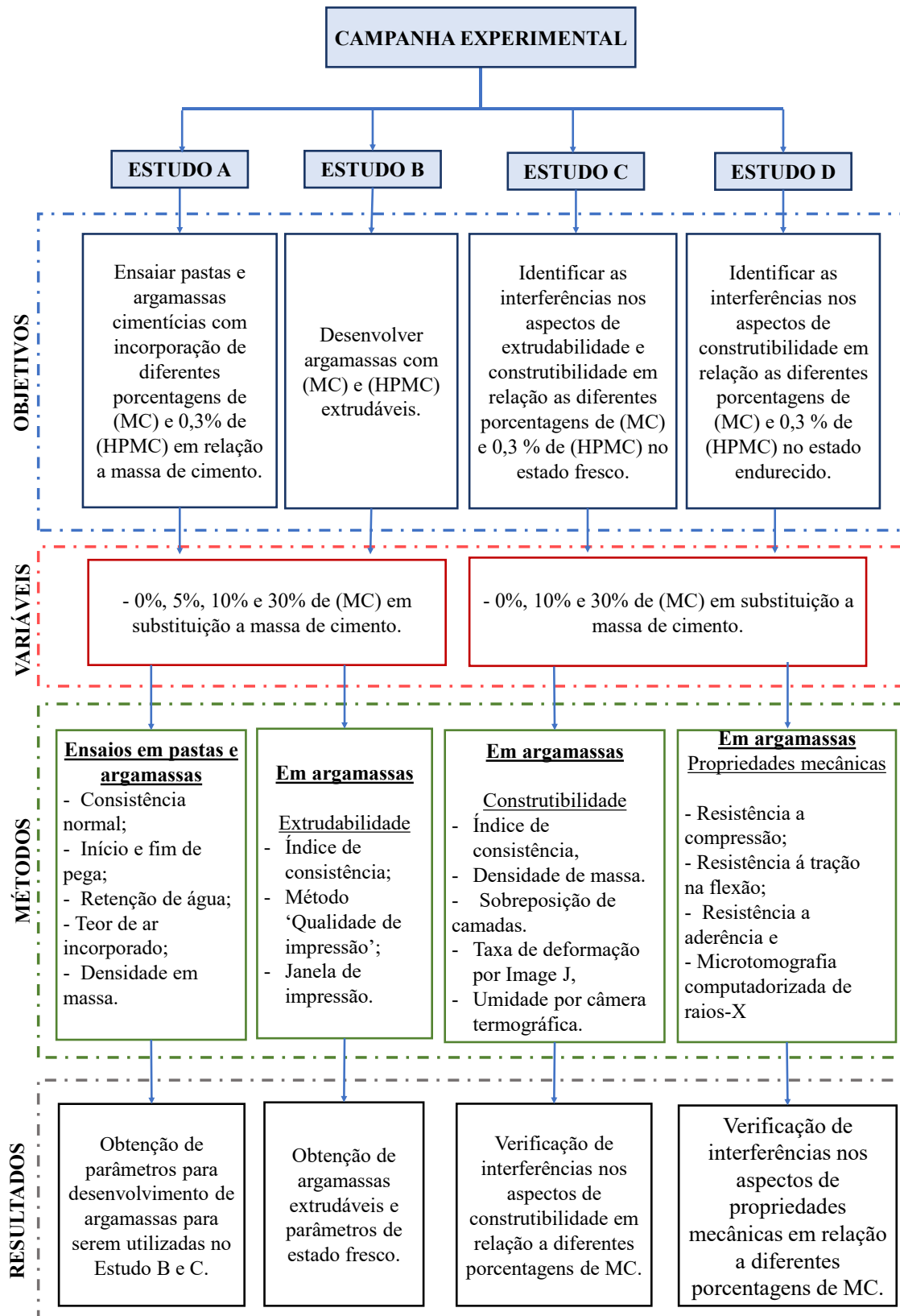
O Estudo B teve como objetivo analisar os materiais cimentícios desenvolvidos com as mesmas incorporações de (MC) e de aditivo químico (HPMC), em maquinário de bancada de impressão 3D, por meios dos ensaios de extrudabilidade e janela de impressão. Dessa forma, buscou-se levantar as relações existentes entre as diferentes porcentagens de (MC) em substituição ao cimento e os parâmetros no estado fresco dos materiais cimentícios extrudados.

No Estudo C quantificou-se as relações existentes entre os aspectos de extrudabilidade e construtibilidade em materiais cimentícios desenvolvidas nas porcentagens de (MC) de 0%, 10% e 30% em relação a substituição da massa de cimento e 0,3% de aditivo químico (HPMC). Para isso, os materiais cimentícios foram ensaiados em relação a capacidade de sobreposição de camadas e deformabilidade por meio de software de processamento de imagens e por meio de umidade por câmera termográfica.

No Estudo D quantificou-se as relações existentes entre as diferentes porcentagens de (MC) e os resultados de propriedades mecânicas, para isso, foram extrudadas duas camadas e coletadas amostras para ensaios de resistência a compressão, resistência à tração na flexão e aderência entre camadas para que dessa forma, seja possível compreender de que

forma a substituição de (MC) e adição de HPMC podem afetar os parâmetros no estado endurecido.

Figura 41 - Fluxograma da campanha experimental utilizada nesta pesquisa



Fonte: A autora.

Através da Campanha Experimental foi possível analisar os materiais cimentícios com suas respectivas proporções de (MC) e adição de 0,3% de (HPMC) e analisar os efeitos ocasionados nos materiais cimentícios em relação aos aspectos de extrudabilidade, construtibilidade e propriedades mecânicas.

3.1 MATERIAIS

Nesse item são apresentados os materiais utilizados na produção das pastas e materiais cimentícios, o procedimento de preparação e o método para a realização dos ensaios dos Estudos A, B, C e D que compõem a Campanha Experimental desta pesquisa. Nos quatro Estudos experimentais foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland CII F 40, areia quartzosa, metacaulim (MC), aditivo químico hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e água.

- Cimento Portland

Por meio do método de revisão sistemática (conforme resultado apresentado no item 2.2.1) observou-se que o cimento OPC Tipo I é um dos cimentos mais utilizados no desenvolvimento de materiais cimentícios aplicados na tecnologia de impressão 3D. Assim, para o desenvolvimento dos materiais utilizados nesta pesquisa buscou-se entre os cimentos comercializados no Brasil que tivesse características físicas e químicas mais próximas ao OPC Tipo I. Assim verificou-se que o cimento Portland CP II F 40 e o cimento Portland de alta resistência (CP V ARI) possuem características semelhantes ao OPC Tipo I em relação a obter resultados de resistência inicial nas primeiras idades de forma mais rápida quando comparado aos demais tipos de cimentos comercializados.

Para este trabalho foi selecionado o CP II F 40 por ser mais acessível economicamente e de fácil aquisição na região quando comparado ao CP V ARI. O CP II F 40 é regulamentado pela NBR 16697 (ABNT, 2018) e suas especificações podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações do cimento CP II F 40

ABNT NBR 16697		Fabricante
Parâmetros		
Tempo de início de pega (minutos)	≥ 60	189
Tempo de fim de pega (minutos)	≤ 600	266
MgO (%)	-	4
Perda ao fogo (%)	≤ 12,5	5,3
Resíduo insolúvel (%)	≤ 7,5	-
SO ₃ (%)	≤ 4,5	3,1
Finura		
Blaine (cm ² /g)	-	4734
# 200 (%)	≤ 10	0,2
# 325 (%)	-	1,4
Resistência à compressão (MPa)		
3 dias	≥ 15	38,7
7 dias	≥ 25	43,8
28 dias	≥ 40	48,1

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (ABNT, 2018) e Fabricante.

- Areia quartzosa

A areia quartzosa utilizada nesta pesquisa é originária do Rio Paraná. A partir da realização dos procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR NM 248:2003 foi possível a análise granulométrica. Os resultados obtidos através dos ensaios são apresentados na Tabela 3.

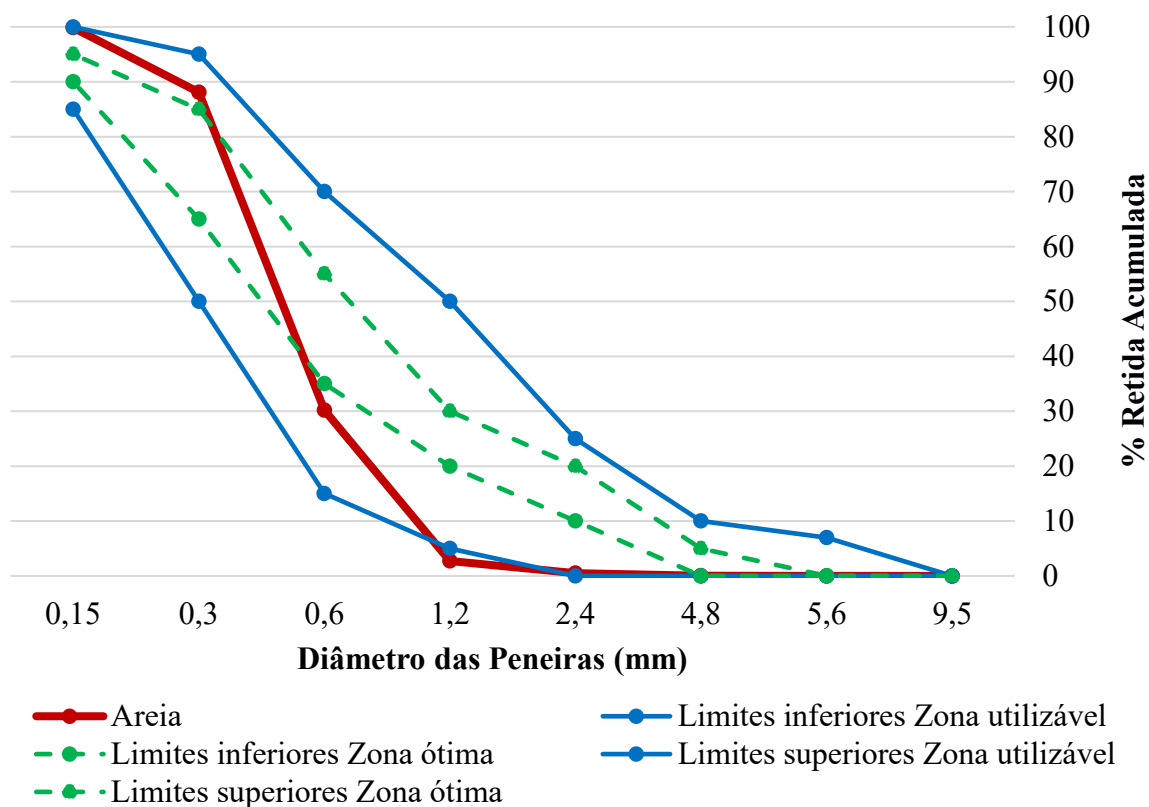
Tabela 3 - Granulometria do agregado miúdo

Peneiras # (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,5	0	0	0
5,6	0	0	0
4,8	0,225	0,045	0,045
2,4	2,265	0,454	0,499
1,2	11,17	2,237	2,736
0,6	151,99	27,438	30,174
0,3	289,01	57,888	88,062
0,15	58,83	11,784	99,847
Fundo	0,765	0,153	100

Fonte: A autora.

Na Figura 42 é possível observar a curva granulométrica, conforme ensaio da ABNT NBR NM 248: 2003, bem como, os limites estabelecidos pela NBR 7211:2009.

Figura 42 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: A autora.

Demais caracterizações, respectivas normativas e seus resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Ensaios e resultados do agregado miúdo

Ensaio	Normativas	Unidade	Resultados
Módulo de finura	ABNT NBR NM 248:2003	-	2,21
Dimensão máxima característica	ABNT NBR NM 248:2003	mm	1,2
Massa unitária sem compactar	ABNT NBR NM 16972:2021	g/cm ³	1,53

Fonte: A autora.

Nota-se que a areia apresenta curva granulométrica dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211: 2009. Na Tabela 4 verifica-se que a areia utilizada nesta pesquisa possui módulo de finura igual a 2,21, dimensão máxima de 1,2 mm e massa unitária de 1,53 g/cm³. Observou-se na literatura científica agregados utilizados no desenvolvimento de materiais de impressão 3D com dimensões máximas menores que 2 mm (NERELLA; KRAUSE; MECHTCHERINE, 2020); RUBIN, 2021; MOHAN *et al.*, 2021; PANDA e TAN, 2018b; KHALIL *et al.*, 2017).

De acordo com Jianchao; Faried e Wengang (2017), para garantir o fluxo adequado dos materiais cimentícios aplicados a impressão 3D, o tamanho máximo do agregado utilizado não deve ser superior ao diâmetro do bico extrusor. Segundo El Cheikh *et al.* (2017) a razão do diâmetro do bocal até o diâmetro máximo da partícula deve ser maior que 4,25 para evitar o bloqueio durante a extrusão. Neste trabalho o bico possui 23 mm de diâmetro e o agregado com diâmetro máximo de 1,2 mm resultando em uma relação de 19,16 possibilitando assim uma extrusão adequada.

- Metacaulim (MC)

A NBR 15894 (ABNT, 2010) especifica as características e propriedades do (MC) como adição em materiais cimentícios e concretos. O (MC) utilizado nesta pesquisa é do tipo HP Ultra sendo suas especificações fornecidas pelo fabricante e disponibilizadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Especificações do metacaulim (MC)

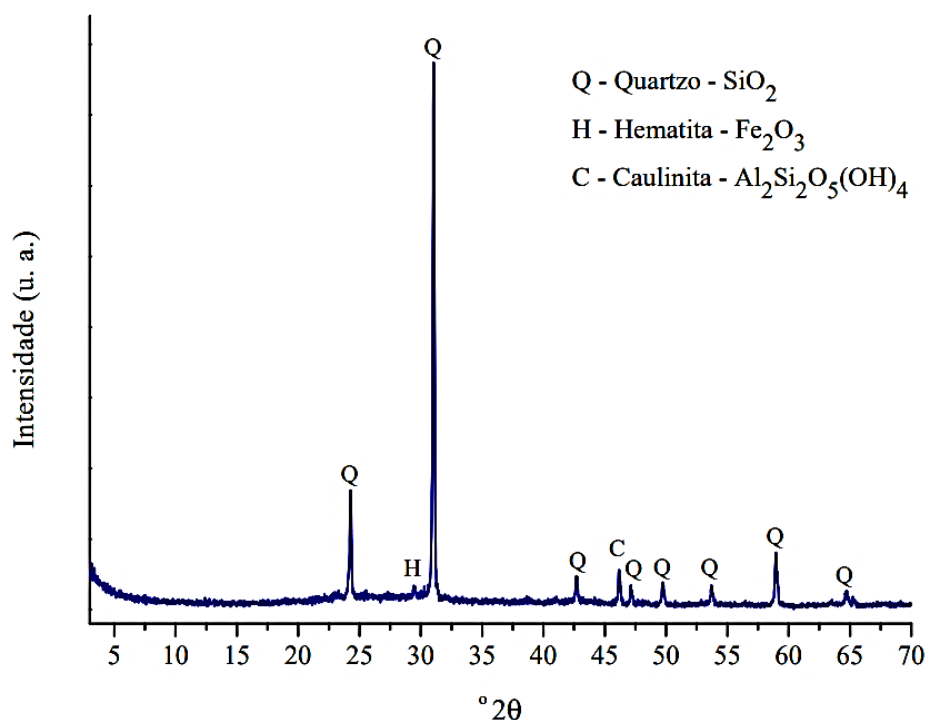
Elementos	Resultado	Típico	Especificações da NBR 15894
SiO ₂	58,5%	55%	44% a 65%
Al ₂ O ₃	32,8%	36%	32% a 46%
Fe ₂ O ₃	1,9%	3,5%	< 1,5 %
TiO ₂	1,1%	0,7%	< 1 %
CaO	0,3%	0,4%	CaO + MgO ≤ 1,5%
MgO	0,4%	0,4%	
K ₂ O	1,6%	1,3%	-
Na ₂ O	0,2%	0,2%	≤ 0,5%
SO ₃	0,1%	0,3%	≤ 1%
Perda ao Fogo	3,1%	2%	≤ 4%
Propriedades Físicas	Resultado	Típico	Especificações da NBR 15894
Finura (< #325 - 44µm)	5,9 %	5%	≤ 10%
Área específica BET	168000 cm ² /g	230000 cm ² /g	≥ 150000 cm ² /g
Massa específica	2,55 kg/dm ³	2,55 kg/dm ³	-
Massa unitária	0,69 kg/dm ³	0,64 kg/dm ³	-

Atividade Pozolânica Chapelle	800 mg Ca(OH) ₂ /g	800 mg Ca(OH) ₂ /g	≥750 mg Ca(OH) ₂ /g
----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------

Fonte: O fabricante e NBR 15894-1 (ABNT, 2010).

A caracterização do (MC) utilizado neste trabalho foi realizado pelo ensaio de difratometria do (MC) que possibilitou a determinação dos compostos químicos presentes na amostra conforme apresentado na Figura 43. O ensaio de caracterização foi realizado no complexo de Centrais de Pesquisa - COMCAP-UEM gentilmente cedido pelo prof. Dr. Ivan Granemann de Souza Júnior e Prof. Dr. Antônio Carlos Costa. Para o ensaio foi utilizada uma amostra de (MC) em pó e, o ensaio foi realizado em um equipamento Shimadzu XRD-6000 com geometria $\theta/2\theta$ utilizando radiação $\text{CoK}\alpha$ com voltagem 40 kV e 30 mA. As leituras foram feitas de forma contínua entre os ângulos 3° a 70° , com intervalos de $0,02^\circ$ e $2^\circ/\text{min}$.

Figura 43 - Ensaio de difratometria de raio x (MC)



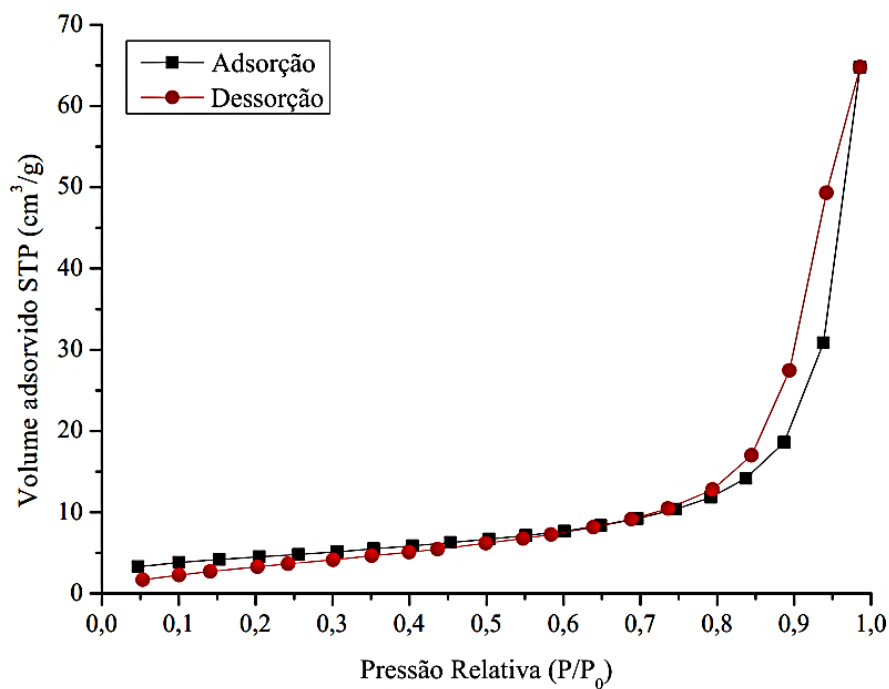
Fonte: A autora.

Em relação aos resultados de difratometria é possível observar que o (MC) possui picos referentes aos compostos de Quartzo - SiO_2 , Hematita - Fe_2O_3 e Caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Em sua pesquisa com materiais cimentícios com argilas com diferentes

teores de calcinação aplicadas a impressão 3D, Chen *et al.* (2020a) observaram em ensaio de difratometria predominância dos compostos químicos Quartzo - SiO₂, Mulita - 3Al₂O₃.2SiO₂ e Caulinita Al₂Si₂O₃(OH)₄ em argila com 50% de (MC).

A área específica e porosidade do (MC) foram determinadas por meio das isotermas de fisissorção com gás nitrogênio e os cálculos de área específica foram feitos a partir do método BET (Brunauer, Emmett e Teller) com o auxílio do software *NOVA Win* (*Quantachrome Instruments, Boynton Beach, FL, EUA*). Os resultados são apresentados na Figura 44.

Figura 44 - Isotermas de adsorção e dessorção (MC)



Fonte: A autora.

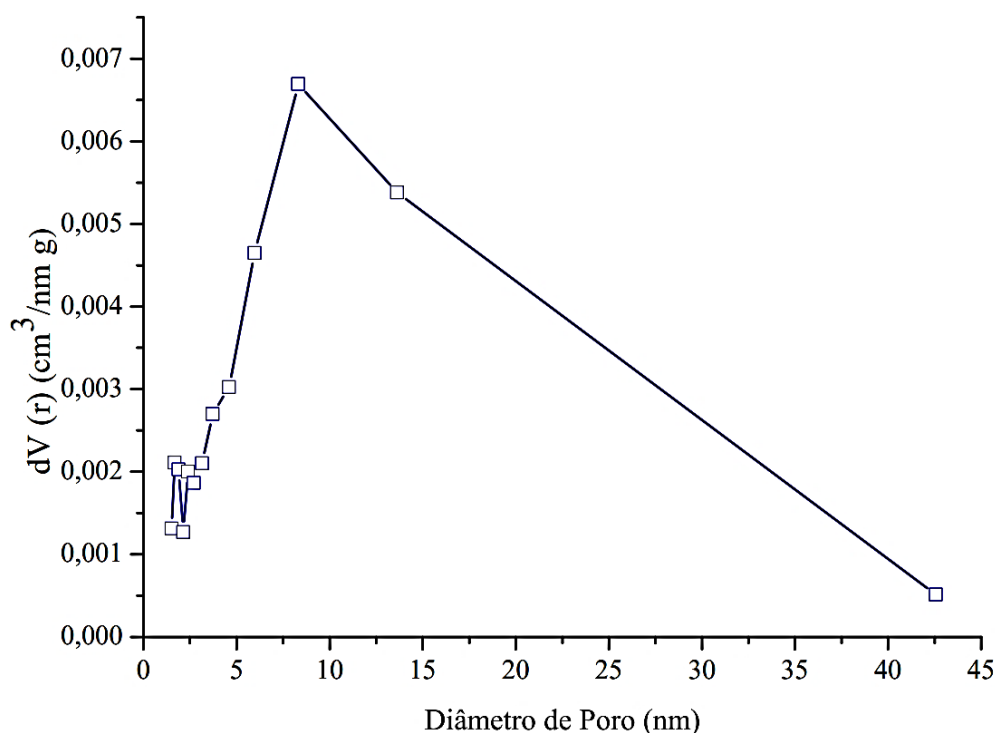
De acordo com Thommes *et al.* (2015) a adsorção física denominada de fisissorção ocorre quando um gás é colocado em contato com a superfície de um sólido. No contexto da fisissorção, classifica-se os poros de acordo com seu tamanho em macroporos (diâmetros superiores a cerca de 50 nm), mesoporos (diâmetros entre 2 nm e 50 nm) e microporos (diâmetros inferiores a cerca de 2 nm) (IUPAC, 1985).

As isotermas da amostra de (MC) demonstraram comportamento do tipo IV.a caracterizado por um material mesoporoso. De acordo com a IUPAC (1985), as isotermas

de fisissorção são agrupadas em seis tipos, sendo que as isotermas do tipo IV são associadas a materiais adsorventes mesoporosos e a do tipo IV.a tem como característica a condensação capilar acompanhada por histerese. A histerese ocorre quando a largura do poro excede uma certa largura crítica, que depende do sistema de adsorção e da temperatura (THOMMES *et al.*, 2015).

Na Figura 45 é possível observar a distribuição do diâmetro (nm) dos poros da amostra ensaiada, obtida para ramo da dessorção e calculada a partir do método BJH (Barrett, Joyner e Halenda).

Figura 45 - Ensaio de difratometria de raio X (MC)



Fonte: A autora.

Verifica-se na Figura 45 que a amostra de (MC) demonstra ser uma amostra heterogênea em relação ao diâmetro dos poros, sendo que é possível observar predominância dos diâmetros de 7,5 a 15 nm. O diâmetro médio e o volume de poros nas etapas de adsorção e dessorção foram calculados com base no método BJH em que se verificou o diâmetro médio de 8,306 nm e volume dos poros de 0,103 cm³/g. A área

específica foi calculada por meio da equação proposta por Brunauer, Emmett e Teller (método BET) e o resultado foi de 157820 cm²/g.

- Aditivo químico hidroxipropilmetilcelulose (HPMC)

Nesta pesquisa foi utilizado o aditivo químico (HPMC) com especificações conforme apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 - Especificações de (HPMC)

Aditivo hidroxipropilmetilcelulose (HPMC)	
Viscosidade*	7000 a 13000 mpas
Umidade	< 8%
pH (2% solução)	5 - 9
Tamanho da partícula	< 177 µm min. 95%

* A viscosidade foi medida por viscosímetro Brookfield em condições de solução aquosa a 2% neutra, 20°C e 20 rpm.

Fonte: O fabricante (Shanghai Huiguang Fine Chemical Industry Co.) e MC Química (importadora).

O aditivo HPMC é comercializado como um pó fino de coloração esbranquiçada e solúvel em água (Figura 46) pela companhia chinesa *Shanghai Huiguang Fine Chemical Industry* com o nome comercial GMC 1150, vendido em sacos de 20 kg.

Figura 46 - HPMC em pó

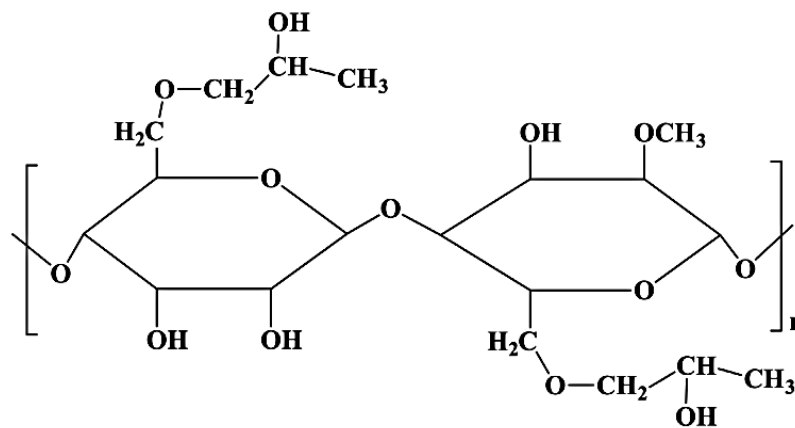


Fonte: A autora.

O HPMC é considerado um éter de celulose de baixa viscosidade que quando em contato com água forma um gel transparente e estável, sendo que foi desenvolvido para produtos específicos que necessitam de retenção de água para promover hidratação completa de aglomerantes e melhorar o desempenho de materiais cimentícios.

O hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), é considerado como aditivo modificador de viscosidade devido aos grupos hidroxila ($-OH$) e grupos éter ($R-O-R$) presentes na cadeia molecular (Figura 47) combinarem com moléculas de água para formar a ligação hidroxila (MA *et al.*, 2018).

Figura 47 - Cadeia molecular do HPMC



Fonte: A autora.

- Água potável.

A água utilizada nesta pesquisa será fornecida pela rede de abastecimento local.

3.1.1 Desenvolvimento dos materiais cimentícios

As pastas cimentícias e argamassas foram desenvolvidos com diferentes porcentagens de (MC) em substituição a massa de cimento e (HPMC), sendo que as pastas foram ensaiadas quanto a consistência normal - ABNT NBR 16606:2018 e tempo de início e fim de pega - ABNT NBR 16607:2018 e as argamassas em relação ao ensaio de retenção de água - ABNT NBR 13277:2005, extrudabilidade, construtibilidade e propriedades mecânicas.

Os resultados do ensaio de consistência normal realizados nas pastas possibilitaram definir a relação água/cimentícia para o ensaio de início e fim de pega e serviram como parâmetro norteador para a definição de quantidade de água a ser utilizada nas argamassas ensaiadas nos Estudos B e C.

A tabela 7 apresenta a nomenclatura de cada uma das pastas e suas proporções em massa dos materiais utilizadas no Estudo A desta pesquisa. Foram utilizadas as porcentagens de adição de metacaulim (MC) de 0%, 5%, 10% e 30% em substituição a massa de cimento e 0,3% de (HPMC) em relação a massa de cimento.

Tabela 7 – Proporção dos materiais para as pastas do Estudo A

Nomenclatura	Descrição	Cimento CP II F 40	Substituição - em relação a massa de cimento	Aditivo HPMC (%)
p_ref	Pasta de referência	1	0	0
p_HPMC	Pasta + HPMC	1	0	0,3
p_MC_5	Pasta + 5% MC	0,95	0,05	0
p_MC_10	Pasta + 10% MC	0,90	0,10	0
p_MC_30	Pasta + 30% MC	0,70	0,30	0
p_MC_5_HPMC	Pasta + 5% MC + HPMC	0,95	0,05	0,3
p_MC_10_HPMC	Pasta + 10% MC + HPMC	0,90	0,10	0,3
p_MC_30_HPMC	Pasta + 30% MC + HPMC	0,70	0,30	0,3

Fonte: A autora.

Para o ensaio de retenção de água - Estudo A foram desenvolvidas argamassas conforme recomendações da NBR 13277 (ABNT, 2005) em que para a execução do ensaio são necessários 2,5 kg de materiais secos e relação a/cimentícia conforme índice de consistência de 260 ± 5 mm. Na Tabela 8 é possível observar as proporções dos materiais utilizados.

Tabela 8 – Proporção dos materiais para as argamassas do Estudo A

Nomenclatura	Cimento CP II F 40	Areia	Substituição - em relação a massa de cimento	Relação a/cimentícios	Aditivo HPMC (%)
arg_ref	1	1,5	0	0,42	0
arg_HPMC	1	1,5	0	0,50	0,3
arg_MC_10	0,90	1,5	0,10	0,40	0
arg_MC_30	0,70	1,5	0,30	0,42	0
arg_MC_10_HPMC	0,90	1,5	0,10	0,52	0,3
arg_MC_30_HPMC	0,70	1,5	0,30	0,58	0,3

Fonte: A autora.

Para o estudo B foram desenvolvidas argamassas para serem submetidas aos ensaios de extrudabilidade e de janela de impressão sendo que suas proporções são apresentadas na tabela 9.

Tabela 9 - Proporção dos materiais para as argamassas do Estudo B

Nomenclatura	Cimento CP II F 40	Areia	Substituição - em relação a massa de cimento	Relação a/cimentícios	Aditivo HPMC (%)
arg_HPMC	1	1,5	0	Variável	0,3
arg_MC_5_HPMC	0,95	1,5	0,05	Variável	0,3
arg_MC_10_HPMC	0,90	1,5	0,10	Variável	0,3
arg_MC_30_HPMC	0,70	1,5	0,30	Variável	0,3

Fonte: A autora.

Para o estudo C e D foram desenvolvidas argamassas para serem submetidas aos ensaios de construtibilidade e propriedades mecânicas sendo que suas proporções são apresentadas na tabela 10.

Tabela 10 - Proporção dos materiais para as argamassas do Estudo C e D

Nomenclatura	Cimento CP II F 40	Areia	Substituição - em relação a massa de cimento	Relação a/cimentícios	Aditivo HPMC (%)
arg_HPMC	1	1,5	0	Variável	0,3
arg_MC_10_HPMC	0,90	1,5	0,10	Variável	0,3
arg_MC_30_HPMC	0,70	1,5	0,30	Variável	0,3

Fonte: A autora.

3.1.2 Mistura e moldagem

A mistura das pastas e argamassas a serem utilizados em todas as etapas experimentais desta pesquisa foi realizada conforme recomendações da ABNT NBR 16541:2016 – Estudo A e conforme análise da consistência adequada para extrusão – Estudo B. As etapas podem ser visualizadas no Quadro 12.

Quadro 12 - Procedimento de mistura de materiais cimentícios

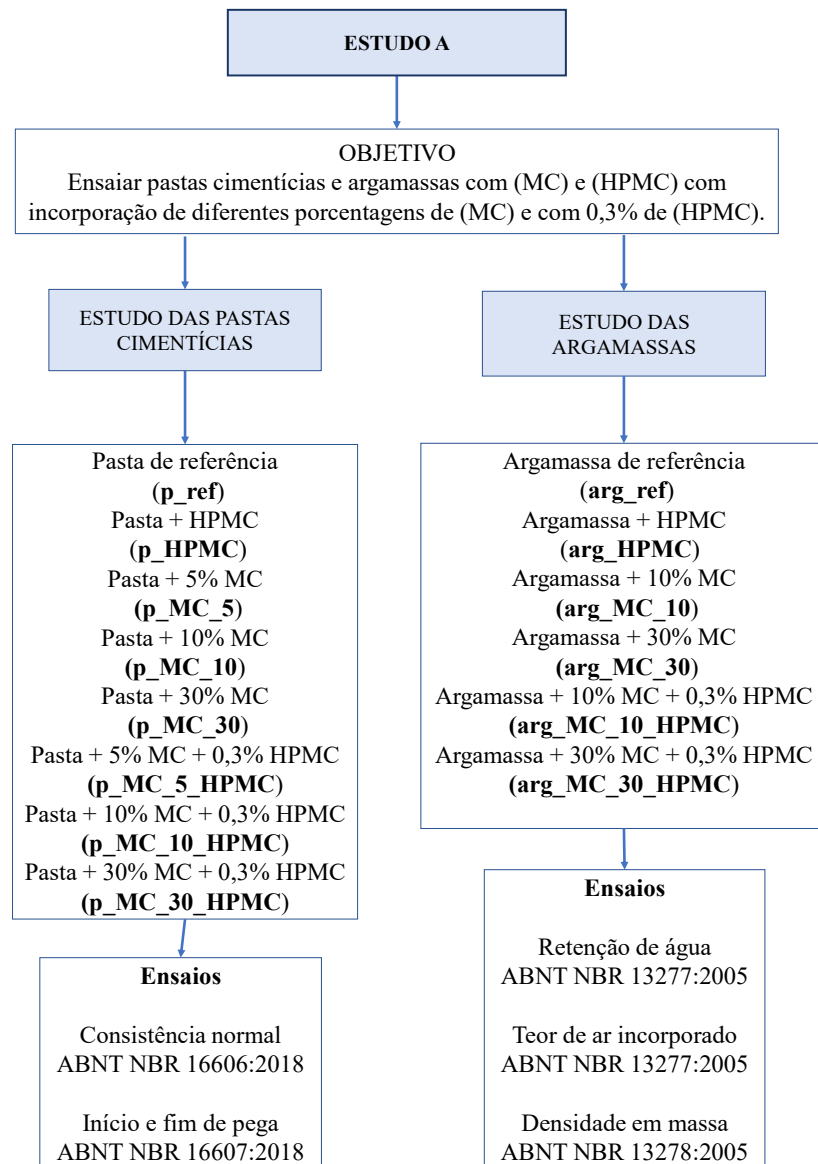
Etapas	Procedimentos para pastas – Estudo A
1	Pesagem dos materiais constituintes - cimento, metacaulim (MC), água e aditivo HPMC de acordo com o traço definido para pastas para o Estudo A;
2	Mistura dos secos (cimento Portland CII F 40, MC e HPMC) na cuba do misturador;
3	Acionamento do misturador na velocidade baixa, adicionando 75% da água de mistura nos 10s iniciais, contando 30s desde o tempo de acionamento do misturador;
4	Alteração para velocidade alta, misturando a material cimentício por mais 60 s;
5	Pausa do processo de mistura, realizando a raspagem de toda superfície da pá e deixando a material cimentício em repouso por 90 s;
6	Acionamento do misturador na velocidade baixa, adicionando os 25% restantes de água pelo tempo de 60 s.
Etapas	Procedimento para argamassas – Estudo A
1	Peneira-se a areia a ser utilizada na mistura com peneira com malha de abertura de 4,75 mm;
2	Pesagem dos materiais constituintes - cimento, areia, metacaulim (MC), água e aditivo HPMC - de acordo com o traço definido para materiais cimentícios para o Estudo A;
3	Mistura dos secos (cimento Portland CII F 40, areia, MC e HPMC) na cuba do misturador;
4	Acionamento do misturador na velocidade baixa, adicionando 75% da água de mistura nos 10s iniciais, contando 30s desde o tempo de acionamento do misturador;
5	Alteração para velocidade alta, misturando a material cimentício por mais 60 s;
6	Pausa do processo de mistura, realizando a raspagem de toda superfície da pá e deixando a argamassa em repouso por 90 s;
7	Acionamento do misturador na velocidade baixa, adicionando os 25% restantes de água pelo tempo de 60 s.
Etapas	Procedimento para argamassas – Estudo B e C
1	Peneira-se a areia a ser utilizada na mistura com peneira com malha de abertura de 4,75 mm;
2	Pesagem dos materiais constituintes – cimento CII F 40, areia, metacaulim (MC), água e aditivo HPMC - de acordo com o traço definido para materiais cimentícios para o Estudo B e C;
3	Mistura completa dos secos (cimento Portland CII F 40, areia, MC e HPMC) na cuba do misturador;
4	Após mistura completa dos secos, adiciona-se 75% de água (kg) na mistura;
5	Pausa no misturador após mistura completa para raspagem durante 30 segundos;
6	Aciona-se o misturador inserindo os 25% de água restante aos poucos até a mistura completa;
7	Após a mistura desliga-se o misturador e verifica-se se a argamassa atingiu a consistência adequada por meio da análise visual “teste de mão”.

Fonte: Adaptado de NBR 16541 (ABNT, 2016).

3.2 ESTUDO A

O objetivo deste estudo foi realizar os ensaios de consistência normal, início e fim de pega e retenção de água em pastas cimentícias e argamassas com metacaulim (MC) em diferentes proporções em substituição a massa de cimento e com hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) em 0,3% da massa de cimento. Na Figura 48 é ilustrado o fluxograma do Estudo A.

Figura 48 - Descrição do Estudo A adotado nesta pesquisa



Fonte: A autora.

Na Figura 48, observa-se que no Estudo das pastas e argamassas foram realizados os ensaios de consistência normal, início e fim de pega em 8 pastas cimentícias e de retenção de água em 6 argamassas desenvolvidas com diferentes proporções de (MC) em substituição a massa de cimento e com 0,3% de (HPMC) em relação a massa de cimento.

O ensaio de consistência normal tem por objetivo estabelecer a relação água/cimentícia mínima necessária para o ensaio de tempo de início e fim de pega em pastas e para o desenvolvimento de materiais cimentícios a serem desenvolvidas no Estudo B e C. O ensaio de início e fim de pega foi realizado para que através dos seus resultados fosse possível compreender o tempo mínimo necessário para extrusão de camada nos materiais cimentícios desenvolvidos no Estudo B e C, isto porque em materiais cimentícios aplicados a impressão 3D o tempo de pega pode afetar a janela de impressão sendo necessário a sua compreensão para garantir que, quando for depositada a segunda camada, a primeira tenha evolução para resistir o peso da segunda camada e não ter entrado em pega para que dessa forma possibilite a aderência.

Como um dos objetivos desta pesquisa é o de compreender de que forma as diferentes porcentagens de (MC) e (HPMC) nos materiais cimentícios desenvolvidos para impressão 3D influenciam nos parâmetros de extrudabilidade, construtibilidade e as propriedades mecânicas, os ensaios de retenção de água, teor de ar incorporado e densidade de massa em materiais cimentícios foram realizado pois estes, possibilitam, através dos seus resultados, analisar de que forma diferentes porcentagens de adição de (MC) e de aditivo químico (HPMC) podem afetar a umidade entre as camadas e conseqüentemente interferir na extrudabilidade e na construtibilidade.

3.2.1 Planejamento Experimental

O planejamento experimental do Estudo A foi realizado conforme proposto na Tabela 11.

Tabela 11 - Planejamento experimental do Estudo A

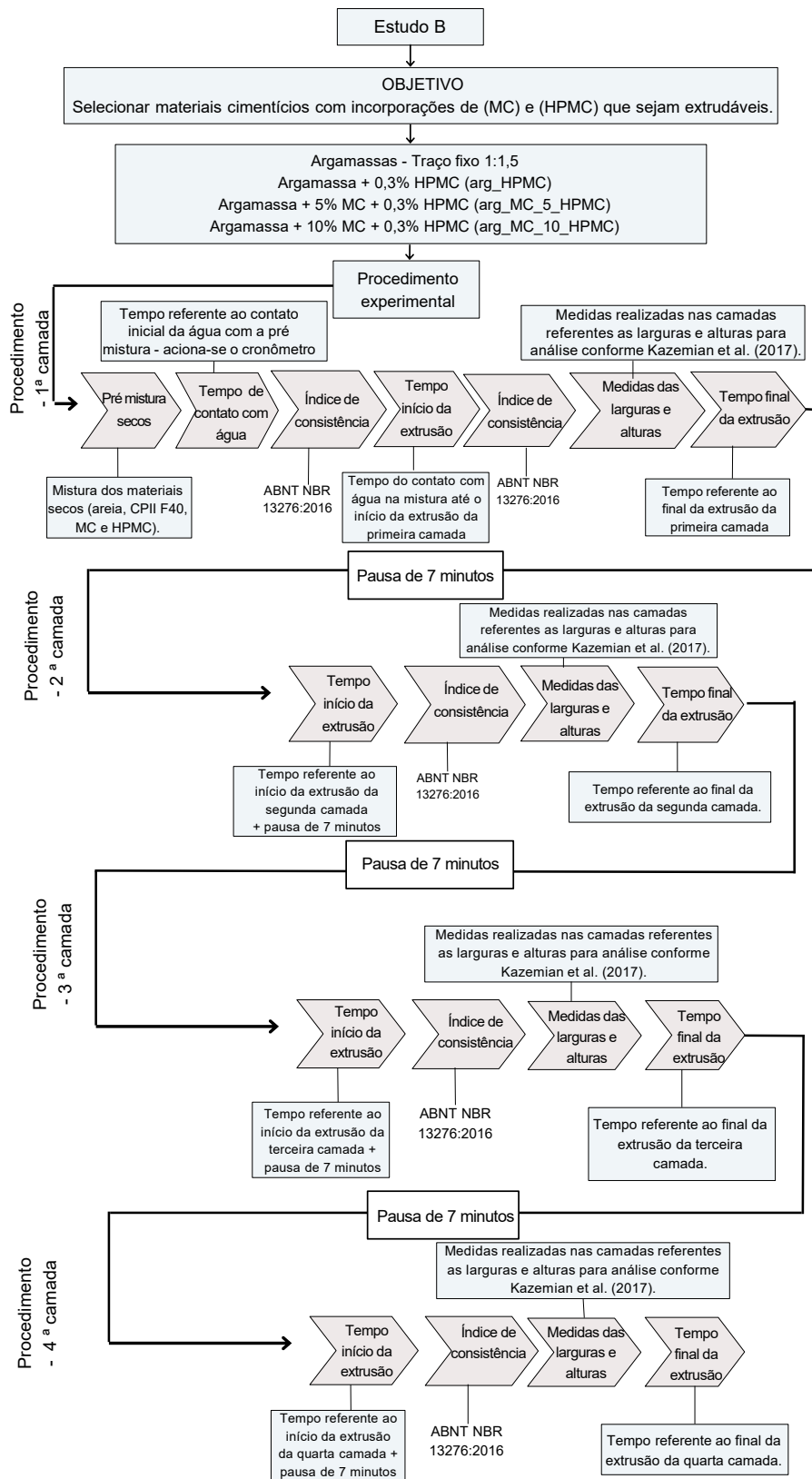
Material ensaiado	Ensaio e normas	Amostras			
		Idades	Nº de amostras por idade	Nº de amostras por traço	Nº de amostras total
Pastas	Consistência normal NBR 16606 (ABNT, 2018)	Após o preparo da pasta	1	1	8
	Início e fim de pega NBR 16607 (ABNT, 2018)	Após o preparo da pasta	1	1	8
Argamassas	Retenção de água NBR 13277 (ABNT, 2005)	Após preparo da argamassa	1	1	6
	Teor de ar incorporado NBR 13277 (ABNT, 2005)	Após preparo da argamassa	1	1	6
	Densidade em massa NBR 13278 (ABNT, 2005)	Após preparo da argamassa	1	1	6

Fonte: A autora.

3.3 ESTUDO B

O estudo B objetiva o desenvolvimento de materiais cimentícios com incorporação de (MC) e (HPMC) que sejam considerados extrudáveis por meio de ensaio em impressora 3D de bancada. Na Figura 49 tem-se o fluxograma referente aos ensaios que foram realizados no Estudo B: índice de consistência, extrudabilidade e janela de impressão.

Figura 49 - Descrição da metodologia do Estudo B para as argamassas arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC



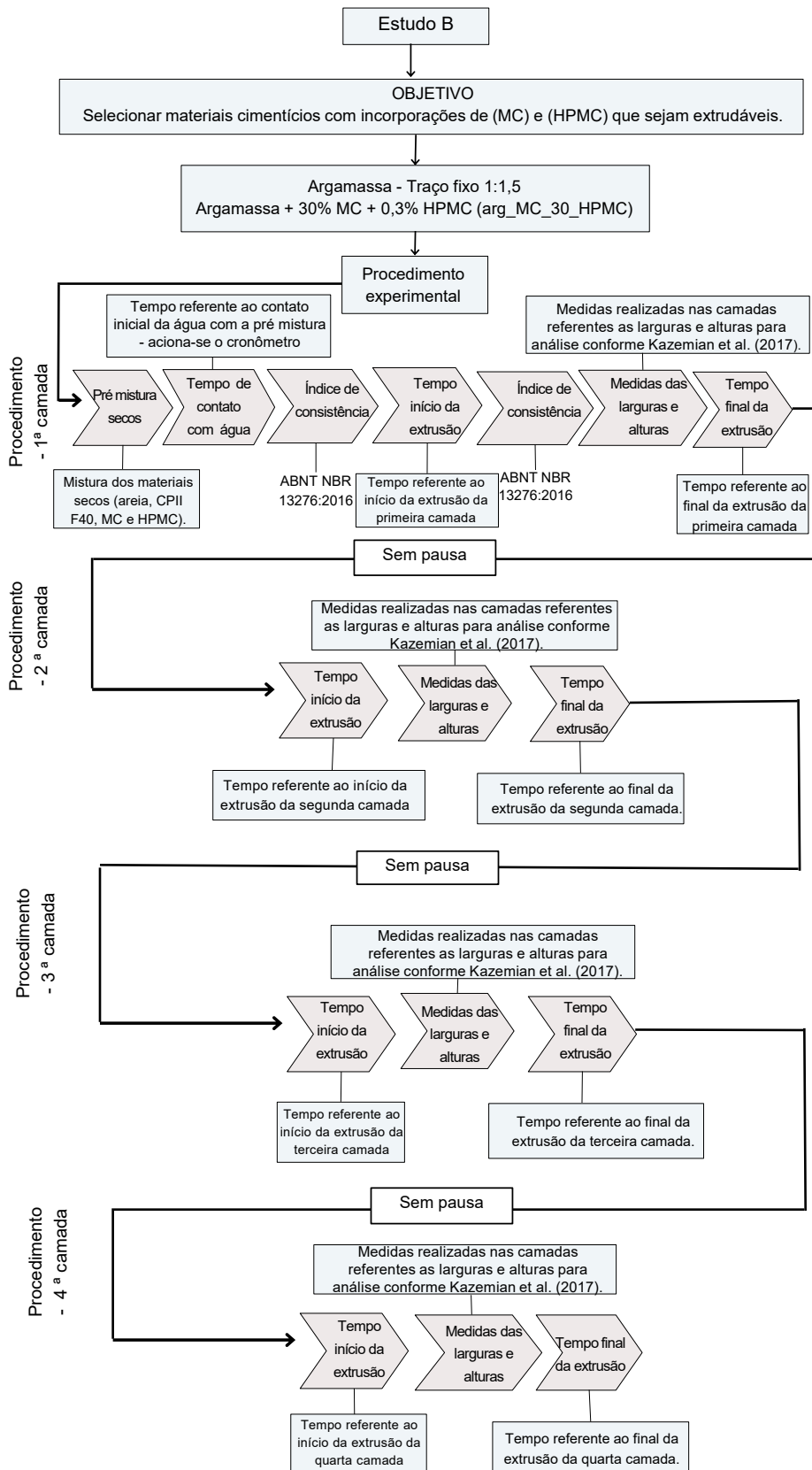
Fonte: A autora.

Conforme pode ser observado na Figura 49, as argamassas arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC foram ensaiadas em relação ao índice de consistência, extrudabilidade na primeira camada e janela de impressão quando submetidas à pausa de 7 minutos entre a extrusão de cada uma das quatro camadas. Dessa forma, no ensaio de janela de impressão foi possível analisar prováveis descontinuidades e variações ocorridas nas dimensões das larguras de cada uma das camadas ao longo da evolução do tempo de extrusão.

De forma sequencial, buscou-se investigar a extrudabilidade na primeira camada e a janela de impressão em argamassa de forma contínua, ou seja, sem pausas na extrusão entre as camadas. O ensaio em argamassa de forma contínua foi realizado devido a possibilitar a análise da extrudabilidade das camadas sem a existência de pausas, o que permitiu, no Estudo C, verificar a capacidade de sobreposição de camadas.

Devido à logística do ensaio, foi necessária a seleção de uma argamassa para ser submetida à extrudabilidade e janela de impressão de forma contínua. Assim, a arg_MC_30_HPMC foi a argamassa ensaiada sem pausa entre as suas camadas extrudadas. A escolha da arg_MC_30_HPMC deve-se ao fato desta argamassa ser considerada mais promissora em termos sustentáveis quando comparada às demais argamassas arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC. Na Figura 50 é possível observar o fluxograma da metodologia de ensaio realizado na arg_MC_30_HPMC.

Figura 50 - Descrição da metodologia do Estudo B para a argamassa arg_MC_30_HPMC



Fonte: A autora.

3.3.1 Índice de Consistência

O ensaio de consistência foi realizado conforme NBR 13276 (ABNT, 2016). As amostras de cada uma das argamassas foram coletadas, colocadas em forma troncocônica e submetidas a golpes na mesa de abatimento para que fossem aferidas em relação a três diâmetros e posteriormente calculadas as médias. A Figura 51 apresenta a coleta da amostra após a extrusão da argamassa (a) e a argamassa ensaiada na mesa de abatimento (b).

Figura 51 - Ensaio de consistência em argamassa após a extrusão.

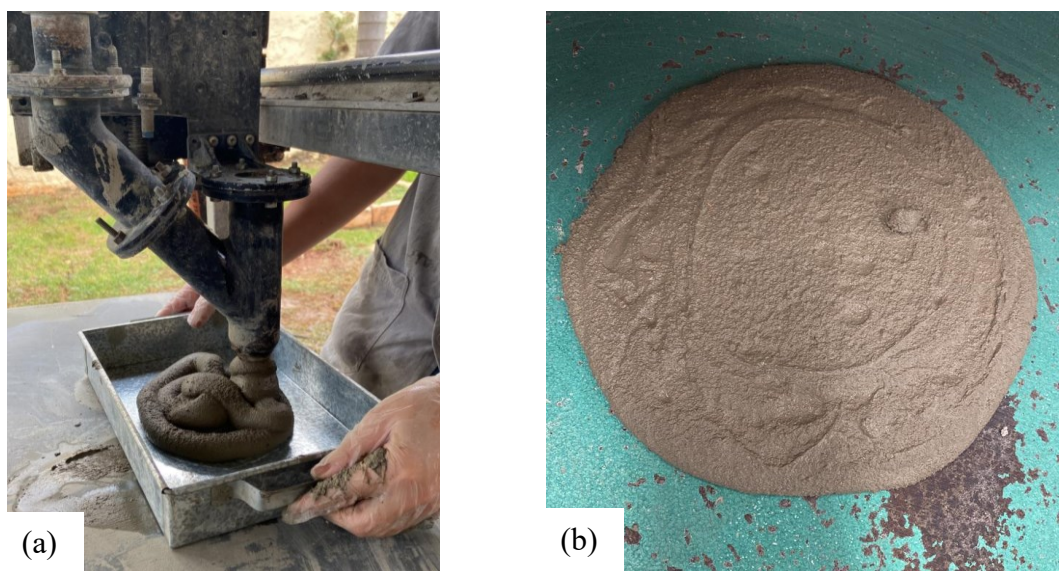


Figura 51. (a) Coleta da amostra da arg_MC_10_HPMC após a extrusão. **(b)** Argamassa arg_MC_10_HPMC ensaiada na mesa de abatimento.

Fonte: A autora.

Para as argamassas arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC, o ensaio de índice de consistência foi realizado antes e após a extrusão da primeira, segunda, terceira e quarta camada para que, dessa forma, fosse possível analisar as alterações ocorridas nos índices de consistências em função do processo de bombeamento e de extrusão.

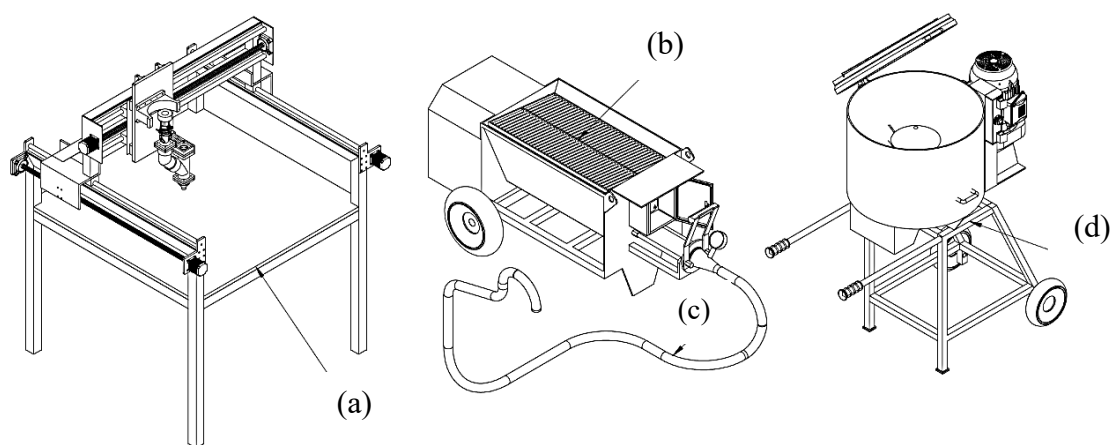
Para a arg_MC_30_HPMC, o ensaio de índice de consistência foi realizado antes e após a extrusão da primeira camada. As demais camadas (segunda, terceira e quarta) não foram ensaiadas quanto ao índice de consistência devido ao fato de o processo de extrusão

ser de forma contínua (sem pausas entre as camadas), o que inviabilizou a coleta da amostra de argamassa no bico.

3.3.2 Análise da Extrudabilidade - Primeira Camada

O ensaio de extrudabilidade foi realizado por meio de um protótipo de impressão 3D de bancada, com mesa de 1m² desenvolvido na Universidade Cesumar, no Programa de Pós-graduação em Tecnologias Limpas. A pesquisa foi realizada à nível de mestrado, intitulada ‘Desenvolvimento e validação de um protótipo de impressora 3D em escala de bancada visando aplicação na construção civil’, sob autoria de Maicon Douglas Leles da Silva e orientação da Prof^ª. Dr^ª. Luciana Cristina Soto Herek Rezende. O protótipo foi gentilmente disponibilizado para os ensaios desta pesquisa. Na Figura 52, é possível observar a ilustração referente ao sistema de impressão 3D.

Figura 52 – Sistema de impressão 3D de bancada da impressora 3D utilizada nesta pesquisa



Fonte: Silva (2022).

Conforme apresentado na Figura 52, o sistema de impressão 3D é composto por subsistemas: (a) protótipo de impressora 3D de bancada com deslocamento nos eixos X, Y e Z; (b) bomba B40 da Betomaq com motor trifásico; (c) mangueira para transporte de argamassa com diâmetro de 1 polegada e (d) misturador de material cimentício modelo MIX 90 da Betomaq. A automatização da impressora é feita por um conjunto de motores e drivers. Na tabela 12 são demonstradas as especificações do sistema de impressão 3D de bancada.

Tabela 12 - Especificações técnicas do sistema de impressão 3D utilizado nesta pesquisa

Impressora 3D de bancada

Estrutura	Metálica – metalon e chapas de aço
Deslocamento	Eixos x, y e z
Diâmetro interno do bico extrusor	23 mm
Velocidade de operação	10, 30 e 50 mm/s

Bomba de injeção

Modelo	B40 Betomaq
Caçamba – capacidade	125 L
Granulometria máxima	6 mm
Unidade bomba padrão	1L6
Acionamento	Motor redutor 3,7 kW (5cv) 220 Vca
Capacidade teórica – vazão	40 L/min
Pressão nominal de trabalho	15 BAR
Alcance máximo vertical	30 m (a depender do material)
Diâmetro da mangueira	1 polegada

Misturador

Modelo	MIX 90 Betomaq
Acionamento	Motor redutor 2,2 kW/ 3 cv
Capacidade nominal	120 L
Capacidade útil	90 L
Granulometria máxima	6 mm
Rotação de saída	50 rpm
Peso aproximado	95 kg

Fonte: Adaptado de Silva (2022) e Betomaq.

Na Figura 53 tem-se as imagens referentes ao sistema de impressão 3D.

Figura 53 - Sistema de impressão 3D

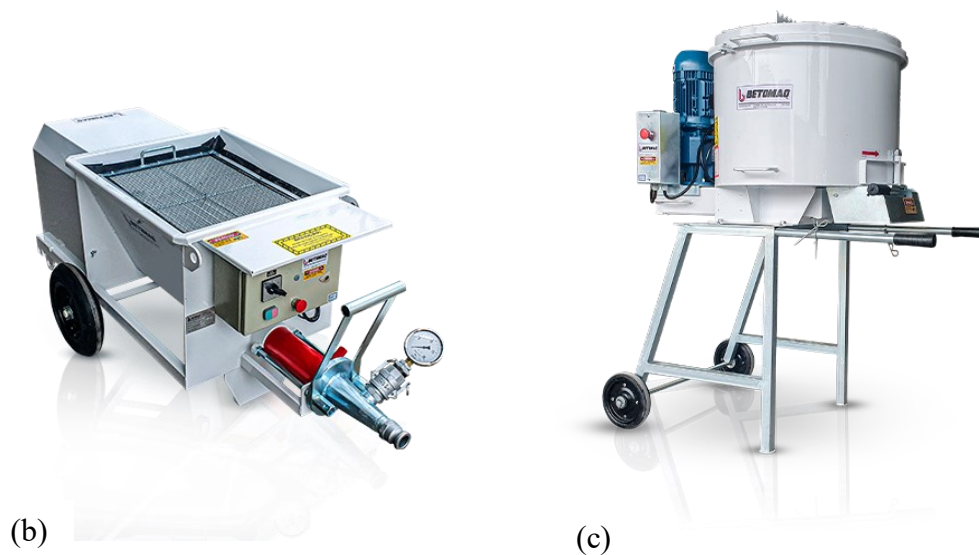
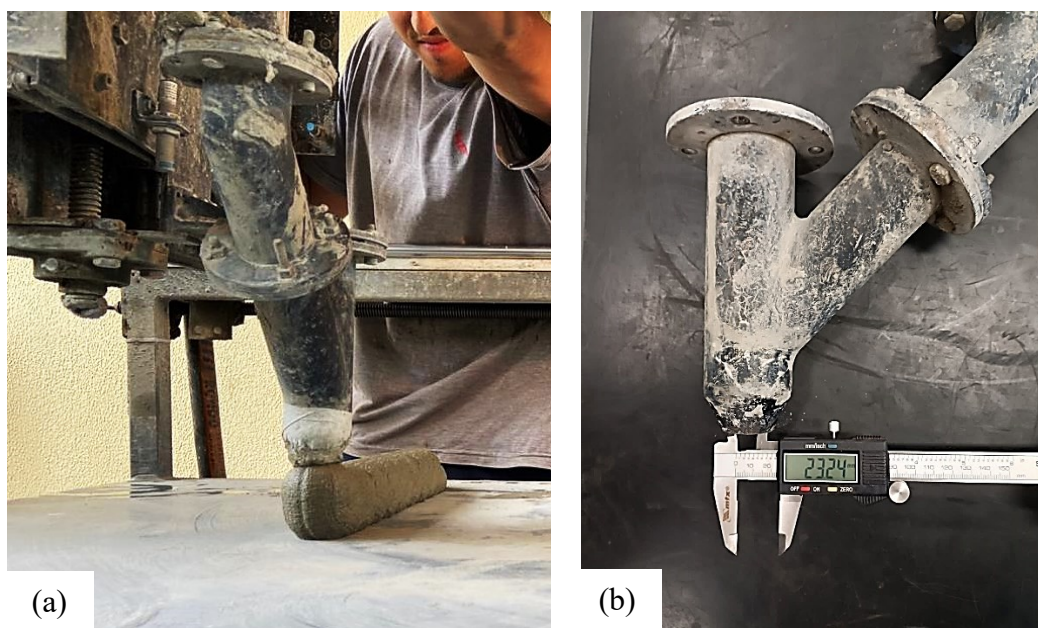


Figura 53. (a) Impressora 3D de bancada. (b) Bomba de injeção. (c) Misturador.
Fonte: A autora e fabricante Betomaq.

O bico extrusor da impressora 3D possui aproximadamente 23 mm de diâmetro interno e tem por finalidade depositar a argamassa de forma contínua por meio de uma rosca sem fim acoplada ao maquinário (Figura 54).

Figura 54 - Bico extrusor da impressora 3D utilizada nesta pesquisa



Fonte: A autora.

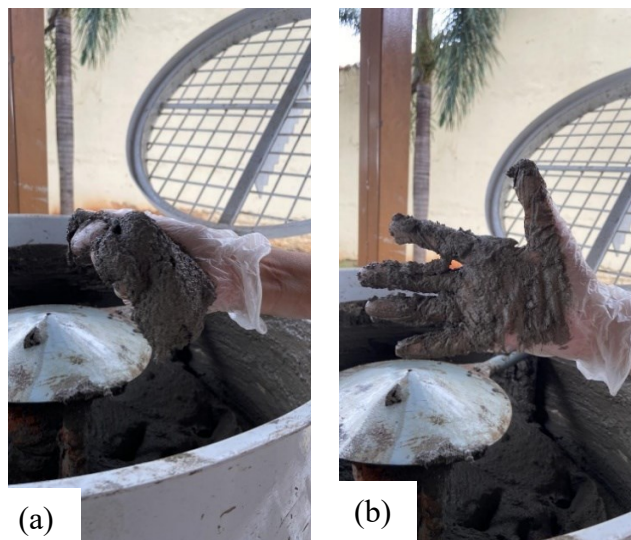
Figura 54. (a) Bico extrudando argamassa. **(b)** Bico extrusor retirado do maquinário de impressão 3D para ser medido em relação ao diâmetro interno (23 mm).

Silva (2022) desenvolveu a impressora 3D de bancada para operar nas vazões de 5kg/min e 4 kg/min e nas velocidades de 10, 30 e 50 mm/s. O autor verificou que, para as vazões mássicas de 5kg/min e 4 kg/min, foram encontradas vazões volumétricas correspondentes à 2,46 L/min e 2,18 L/min. Nesta pesquisa, as argamassas foram extrudadas com velocidade de impressão de 50 mm/s, por meio do bombeamento constante na vazão de 2,46 L/min (5 kg/min).

Chen *et al.* (2020c) relatam que para serem consideradas aptas e, assim, extrudadas, após misturadas por 10 minutos em velocidade alta em misturador planetário, as misturas cimentícias deveriam demonstrar aderência nas paredes da cuba. Nesta pesquisa, após as argamassas serem misturadas com suas respectivas relações água/cimentícios, elas foram analisadas visualmente em relação a estarem ou não aptas para serem submetidas ao processo de bombeamento e de extrusão.

A análise visual foi realizada por meio do teste da mão conforme apresentada na Figura 55 e descrita a seguir.

Figura 55 - Análise da argamassa por meio do teste da mão



Fonte: A autora.

Figura 55. (a) Argamassa com 10% de MC e 0,3% de HPMC após finalização da mistura sendo moldada na mão. **(b)** Análise visual de resíduo de argamassa após a abertura da mão.

Conforme apresentada na Figura 55, a análise de forma visual deu-se por meio dos seguintes procedimentos:

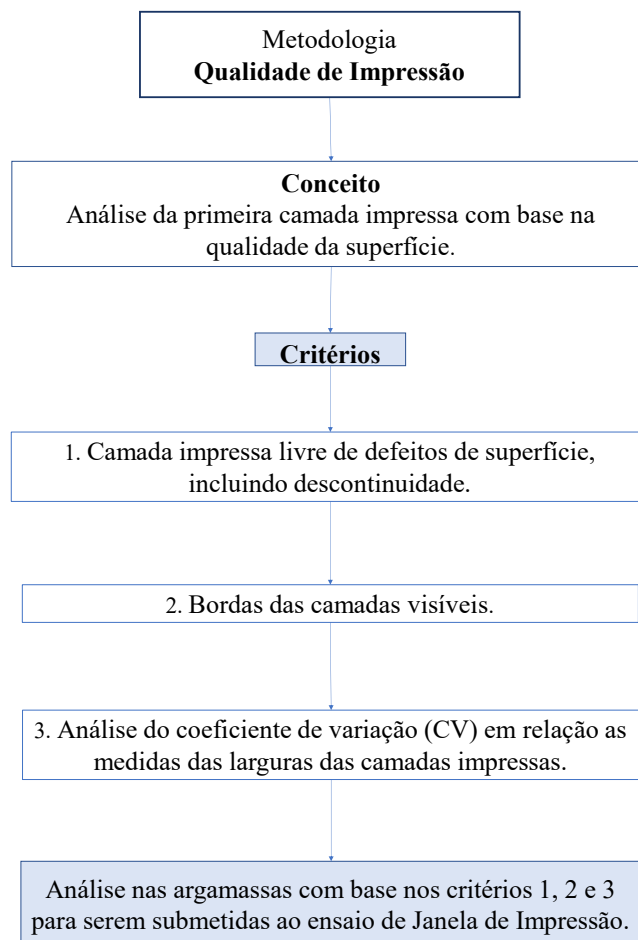
1. O misturador foi desligado,
2. Com o misturador desligado, coleta-se uma parte da argamassa recém misturada com a mão,
3. Com parte da argamassa na mão, aperta-se a argamassa entre os dedos e verifica-se se esta apresenta a forma da palma da mão.
4. Solta-se a argamassa da mão e verifica-se se esta adere à mão, deixando resíduos.

Este procedimento foi realizado nas argamassas ensaiadas arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC. Ao serem submetidas ao processo de mistura, as argamassas foram cronometradas a partir do contato com água, de forma a se obter o tempo do início e fim da extrusão de cada uma das camadas. Dessa

maneira, as camadas de cada uma das argamassas foram analisadas em relação aos ensaios de extrudabilidade e de janela de impressão.

O ensaio de extrudabilidade foi realizado na primeira camada extrudada de cada uma das argamassas ensaiadas. O ensaio foi realizado conforme adaptação da metodologia - Qualidade de Impressão proposta por Kazemian *et al.* (2017). O procedimento é apresentado na Figura 56.

Figura 56 - Metodologia adotada para realização do ensaio de extrudabilidade



Fonte: A autora.

A primeira camada extrudada das argamassas ensaiadas foi avaliada de acordo com uma adaptação da metodologia – Qualidade de Impressão proposta por Kazemian *et al.*

(2017), descrito na sessão 2.4. A metodologia é composta por 3 critérios que são descritos a seguir:

1. Continuidade e coesão na primeira camada extrudada com o comprimento de 1600 mm para a arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC e o comprimento de 2400 mm para a arg_MC_30_HPMC;
2. Visibilidade nas bordas na primeira camada extrudada por meio de formas arredondadas e coesas. A camada foi extrudada com o comprimento de 1600 mm para a arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC e o comprimento de 2400 mm para a arg_MC_30_HPMC;
3. Análise do coeficiente de variação (CV) em relação à largura da primeira camada extrudada com o comprimento de 1600 mm para a arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC e o comprimento de 2400 mm para a arg_MC_30_HPMC.

As diferenças de comprimento das camadas devem-se ao fato do ensaio de extrudabilidade na arg_MC_30_HPMC ter sido realizado de forma conjunta ao ensaio de construtibilidade – Estudo C. Após as argamassas serem analisadas quanto aos critérios 1, 2 e 3, estas foram submetidas ao ensaio de janela de impressão.

3.3.3 Janela de impressão

O ensaio de janela de impressão identifica qual o intervalo de tempo que o material cimentício mantém uma boa trabalhabilidade para a impressão. O ensaio foi de acordo com Ma; Li e Wang (2018) conforme descrito no item 2.5, porém sofreu adaptações em relação ao intervalo de tempo devido aos seguintes fatores: capacidade executiva do equipamento de impressão 3D em relação à extrusão, tempo suficiente para aferição das larguras e alturas das camadas e limpeza da mesa para impressão de próximas camadas a serem extrudadas.

Objetivou-se com o ensaio de janela de impressão investigar as possíveis descontinuidades em cada uma das camadas ao longo do tempo de extrusão e obter o número

máximo de camadas a serem extrudadas pelo maquinário em função da capacidade de volume do misturador de 90 litros.

Para a execução do ensaio, foram extrudadas camadas de 1600 mm para a arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC com pausas de 7 minutos entre as camadas e extrudadas camadas de 2400 mm para a arg_MC_30_HPMC de forma contínua (sem pausas) até atingir a capacidade máxima referente ao volume do misturador.

Após o ensaio foi possível selecionar 3 argamassas para serem submetidas ao Estudo C. Para serem selecionadas as argamassas deveriam atender, por meio da extrusão de suas camadas, os critérios de continuidade, coesão, bordas visíveis, menor coeficiente de variação (CV) em relação às medidas das larguras das camadas e serem consideradas promissoras em relação ao aspecto sustentável, ou seja, possuírem maior porcentagem de MC em substituição à massa de cimento.

3.3.4 Planejamento experimental

Com o objetivo de caracterizar as argamassas extrudáveis avaliadas no Estudo B, foram realizados os ensaios expostos na Tabela 13.

Tabela 13 - Planejamento experimental do Estudo B utilizado nesta pesquisa

Material ensaiado	Ensaio	Tempos	Nº de amostras por argamassa	Nº de amostras total
Argamassas – Arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC, arg_MC_10_HPMC	Índice de consistência NBR 13276 (ABNT, 2016)	Antes e após o bombeamento, antes da extrusão da segunda camada, antes da extrusão da terceira camada e antes da extrusão da quarta camada.	5	15
Argamassas – arg_MC_30_HPMC	Índice de consistência NBR 13276 (ABNT, 2016)	Antes e após o bombeamento da primeira camada.	2	2
Primeira camada impressa – Arg_HPMC,	Adaptação da análise de ‘Qualidade de	Após extrusão da primeira camada com 1600 mm para a arg_HPMC,	1	4

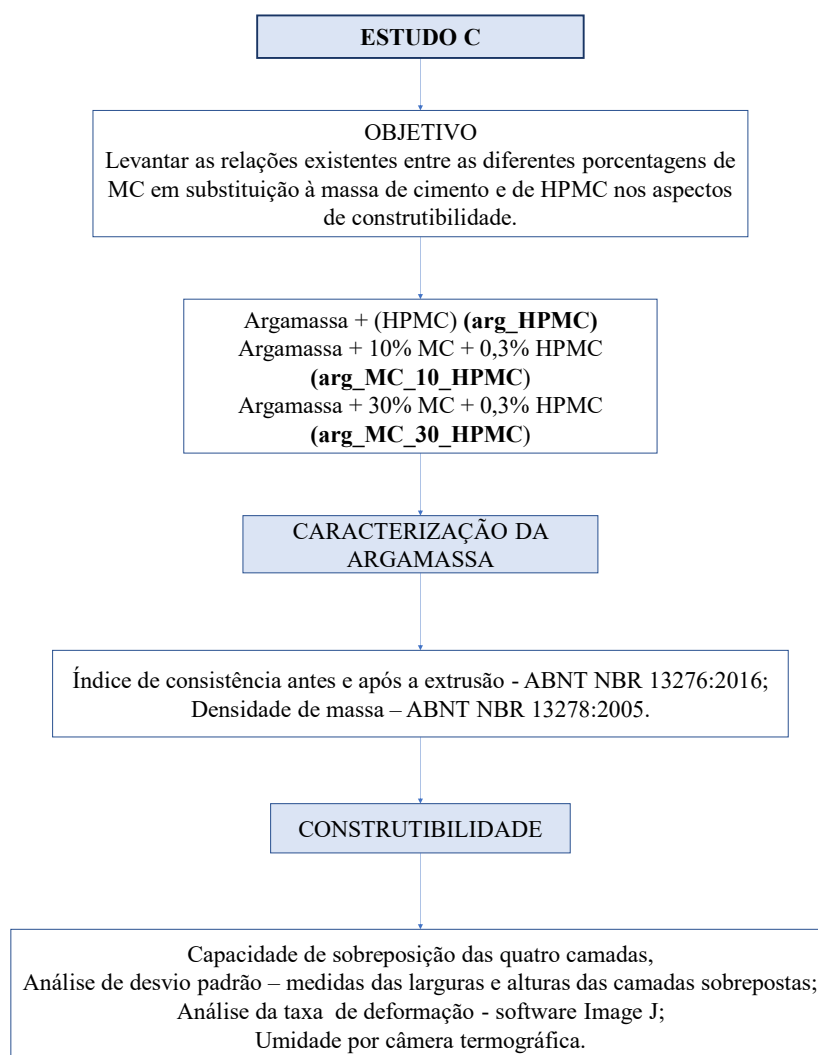
arg_MC_5_HPMC, arg_MC_10_HPMC, arg_MC_30_HPMC	Impressão' (Kazemian <i>et al.</i> , 2017)	arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC e 2400 mm para arg_MC_30_HPMC.		
Camadas impressas – Arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC, arg_MC_10_HPMC.	Janela de impressão	Primeira camada, Pausa de 7min + segunda camada Pausa de 7 min + terceira camada Pausa de 7 min + quarta camada.	4	12
Camadas impressas – arg_MC_30_HPMC.	Janela de impressão	Primeira camada, segunda camada terceira camada e quarta camada.	4	4

Fonte: A autora.

3.4 ESTUDO C

O Estudo C objetiva estabelecer as relações existentes entre as diferentes porcentagens de adição de (MC) em substituição à massa de cimento e os aspectos de construtibilidade em argamassas que foram selecionadas no Estudo B. Na Figura 57 é apresentado o fluxograma da metodologia do Estudo C.

Figura 57 – Metodologia do Estudo C adotada nesta pesquisa



Fonte: A autora.

Conforme observado na Figura 57, para atender ao objetivo proposto pelo Estudo C, as argamassas selecionadas no Estudo B foram ensaiadas quanto ao índice de consistência, densidade de massa e construtibilidade. Sendo que, para a construtibilidade, as argamassas foram analisadas quanto a capacidade de sobreposição de até quatro camadas, análise de coeficiente de variação (CV), taxa de deformação das camadas por meio do software Image J e umidade superficial com câmera termográfica. Os ensaios realizados estão descritos a seguir.

3.4.1 Índice de Consistência

O ensaio de consistência foi realizado conforme NBR 13276 (ABNT, 2016) nas argamassas arg_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC antes e após serem extrudadas. Assim as argamassas ensaiadas foram coletadas e moldadas em forma troncocônica e golpeadas na mesa de abatimento. Após os golpes, as argamassas foram medidas em relação aos 3 diâmetros e calculadas as médias.

3.4.2 Densidade de massa

O ensaio de densidade de massa no estado fresco foi realizado nas argamassas arg_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC antes e após a extrusão conforme NBR 13278 (ABNT, 2005a). O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Um recipiente cúbico com volume de 1000 cm^3 (V_r) foi pesado e registrado a sua massa de 313 gramas (m_v);
2. A amostra das argamassas ensaiadas foi coletada antes (Figura 58.a) e após (Figura 58.b) a extrusão e inserido no recipiente cúbico.

Figura 58 - Coleta da amostra para ensaio de densidade de massa



Figura 58. (a) Cubo com argamassa antes de ser extrudada. **(b)** Cubo sendo preenchido de argamassa após ter sido extrudada.

Fonte: A autora.

3. O recipiente contendo a amostra das argamassas foi submetido a três quedas com altura de 3 cm.
4. Rasou-se o recipiente cúbico contendo a amostra das argamassas com espátula em duas passadas ortogonais entre si com movimentos de vai e vem.
5. Pesou-se o recipiente cúbico com a amostra das argamassas e registrou-se sua massa (m_c).
6. As densidades de massa das argamassas antes e após a extrusão foram calculadas em g/cm^3 através da Equação 4.

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que m_c é a massa do recipiente contendo a amostra das argamassas antes e após a extrusão em gramas, m_v é a massa do recipiente cilíndrico vazio em gramas, v_r é o volume do recipiente cilíndrico em centímetros cúbicos e d refere-se à densidade no estado fresco em g/cm^3 .

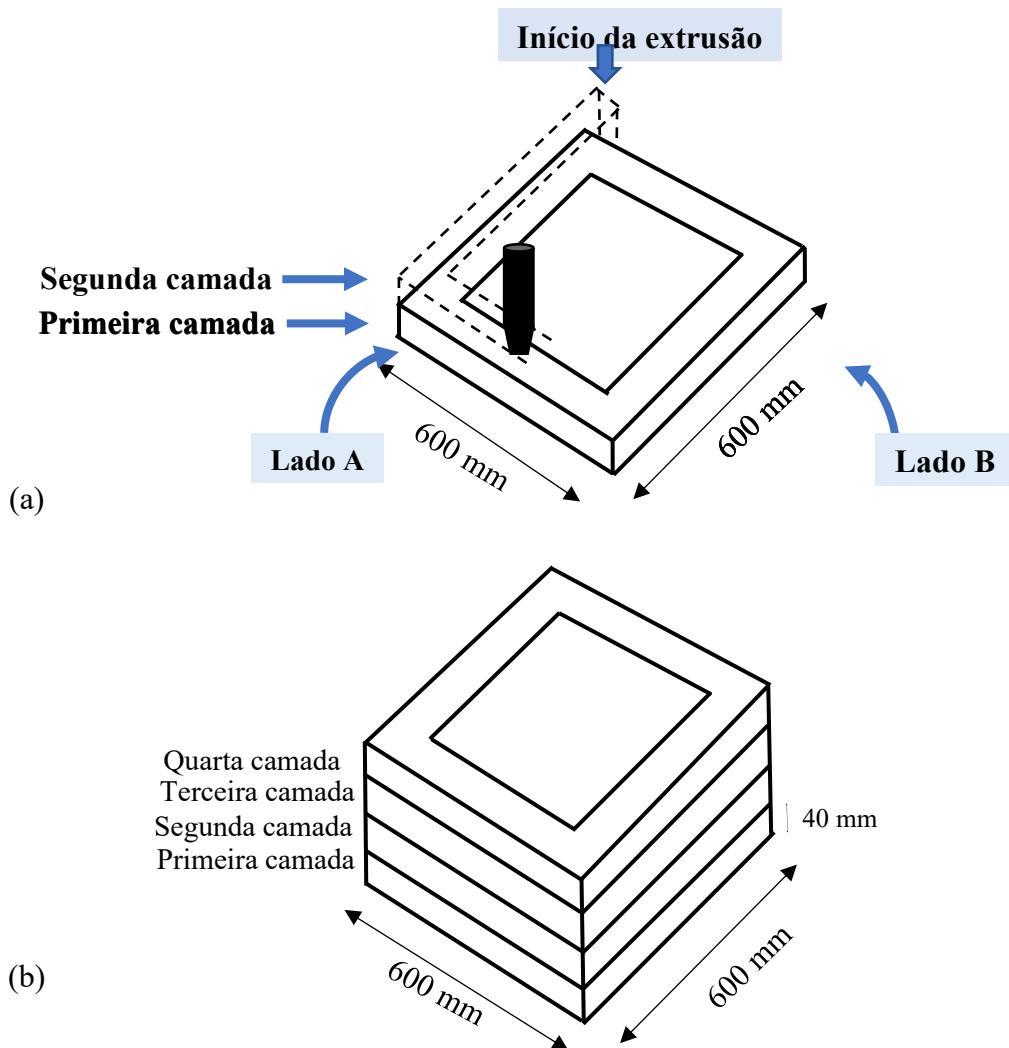
A consistência e a densidade de massa foram realizadas com o objetivo de avaliar se o processo de bombeamento e extrusão ocasionaram alterações no material cimentício após ser extrudado.

3.4.3 Construtibilidade

3.4.3.1 Ensaio de Sobreposição de Camadas

Por não haver normativas que avaliem a construtibilidade, foi utilizado como referência o estudo de Khalil *et al.* (2017). Nesta pesquisa, as argamassas *arg_HPMC*, *arg_MC_10_HPMC* e *arg_MC_30_HPMC* foram ensaiadas de forma a se obter a capacidade máxima de sobreposição de camadas, sendo que, o limite do maquinário de impressão 3D é de quatro camadas devido ao volume de 90 L do misturador. Conforme as camadas foram sendo sobrepostas, elas formaram um sólido 3D, com lados A e B, e dimensões de 600 mm x 600 mm (Figura 59.a).

Figura 59 - Sólido 3D obtido por meio do ensaio de construtibilidade



Fonte: A autora.

Figura 59. (a) Formação do sólido 3D. (b) Sólido 3D com as quatro camadas extrudadas.

Verifica-se na Figura 59.b, que o sólido 3D é formado pela sobreposição de até quatro camadas. Neste Estudo, as camadas foram extrudadas com os mesmos parâmetros pré-fixados e utilizados no Estudo B, sendo a vazão de 2,46 L/min e a velocidade de 50 mm/s.

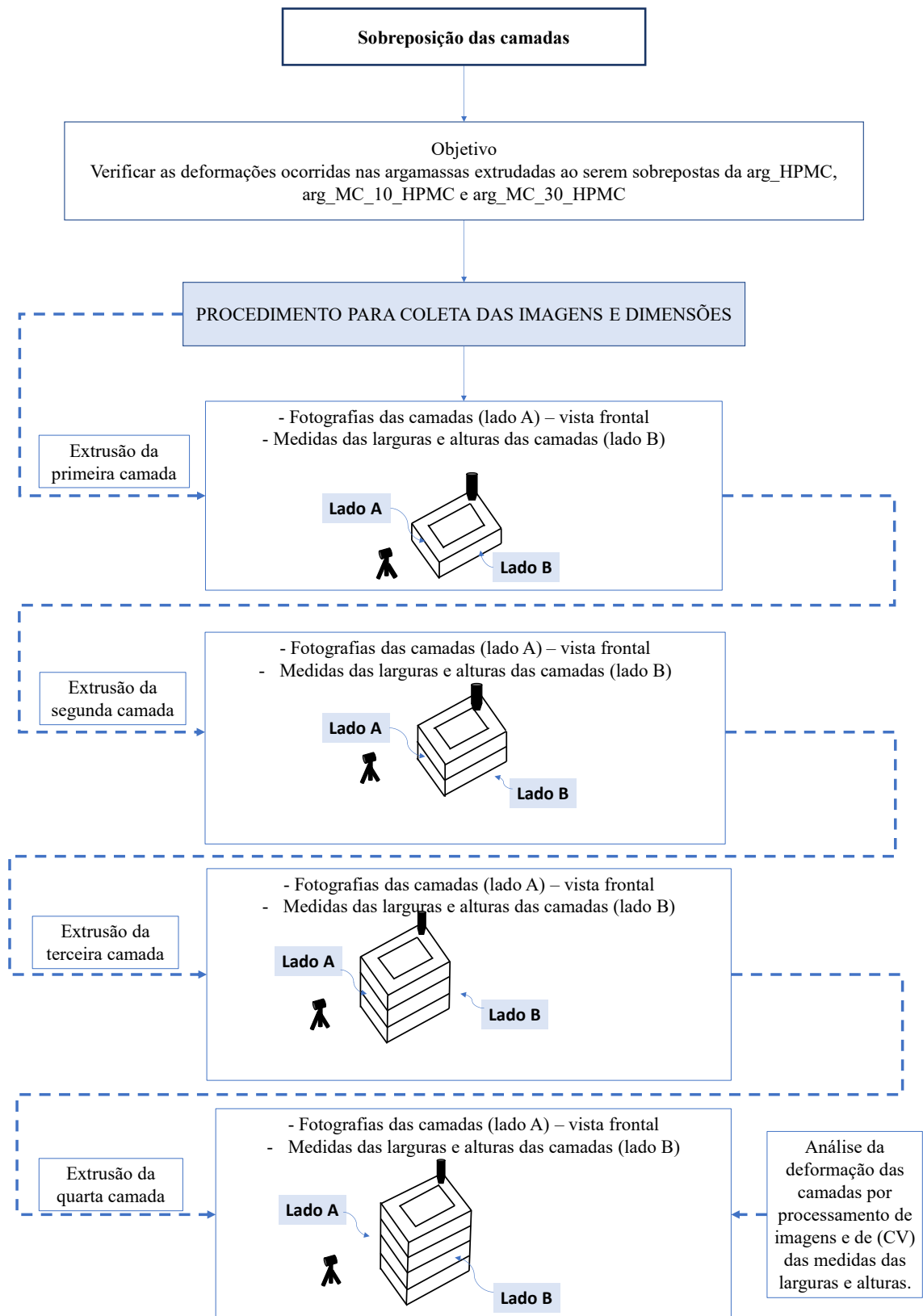
Conforme o sólido 3D da arg_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC foi sendo formado, as suas camadas foram fotografadas pelo lado A, por meio do celular e câmera termográfica, e medidas em relação as larguras e alturas, pelo lado B.

3.4.3.2 Taxa de deformação por meio da análise de imagem

A capacidade de resistir às deformações durante a sobreposição é considerada uma propriedade importante para análise da construtibilidade das argamassas impressas, visto que o peso próprio e da camada seguinte podem provocar alterações e interferir na capacidade construtiva. Assim, para se verificar as deformações ocorridas nas camadas após a sobreposição, estas foram medidas quanto as larguras e alturas e fotografadas para serem analisadas por meio da taxa de deformação com a utilização do software Image J.

Na Figura 60, é possível observar o procedimento para coleta de imagens, para análise posterior por meio de processamento, e o procedimento para obter as medidas referentes as larguras e alturas.

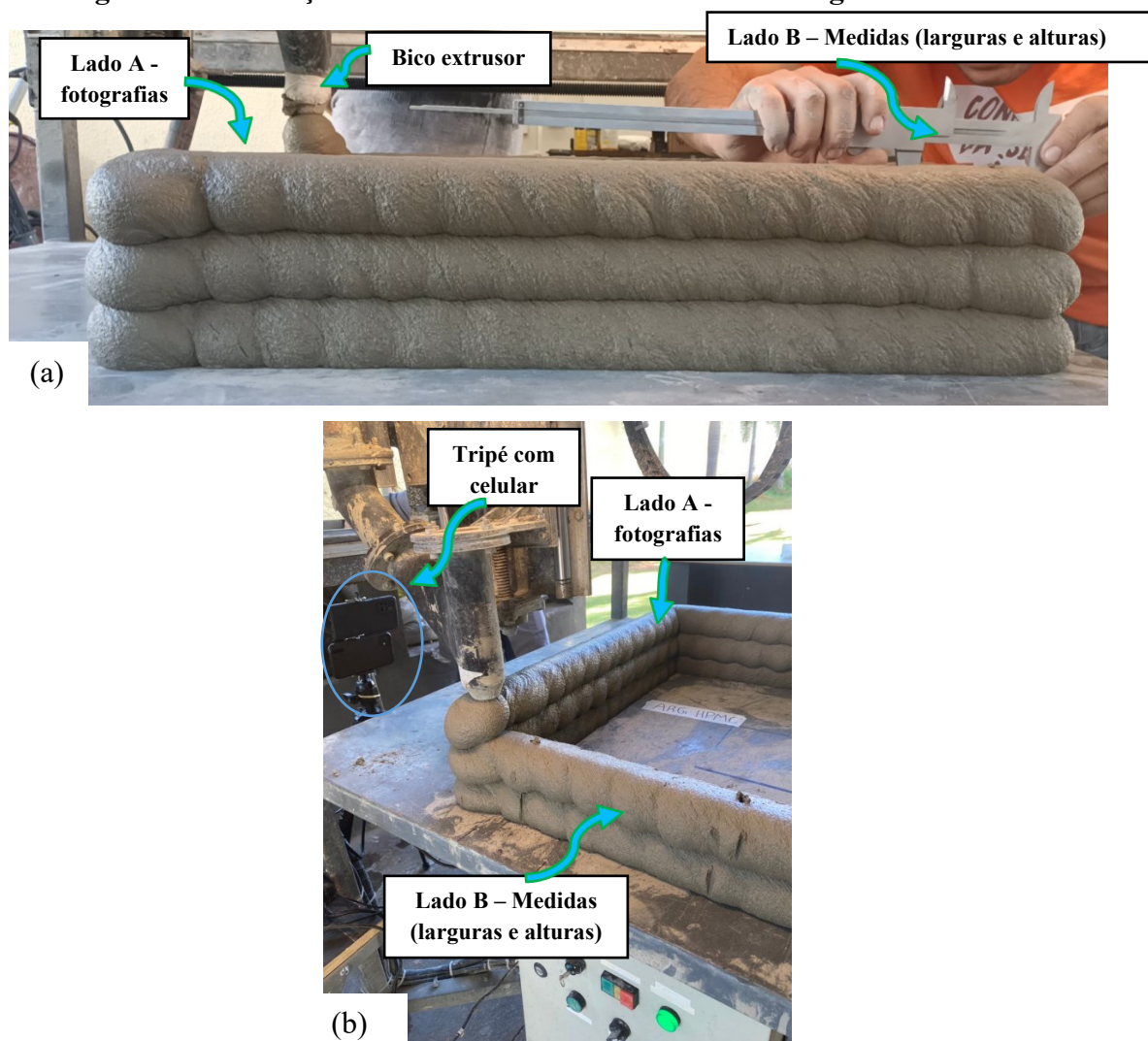
Figura 60 - Procedimento para análise da taxa de deformação e (CV) das camadas



Fonte: A autora.

Conforme observado na Figura 60, ao serem extrudadas as quatro camadas foram fotografadas (lado A) e medidas em relação a largura e a altura (lado B). Para tirar as fotografias, um celular foi encaixado em um tripé e posicionado a uma distância de 50 cm da mesa. O tripé foi colocado na mesma distância para todas as argamassas ensaiadas. As fotografias foram tiradas a cada 21 segundos da vista frontal do lado A do sólido 3D à medida que as camadas extrudadas eram sobrepostas. Na Figura 61 é possível visualizar imagens referentes a execução do ensaio – fotografia do lado A e medidas do lado B do sólido 3D.

Figura 61 - Execução do ensaio de construtibilidade - fotografias e medidas



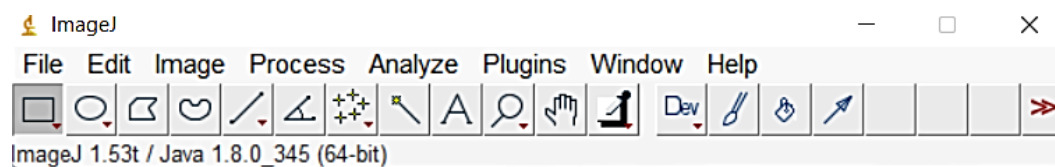
Fonte: A autora.

Figura 61. (a) Vista frontal do lado A com três camadas da arg_HPMC. **(b)** Vista lateral do sólido 3D da arg_HPMC.

Na Figura 61.a observa-se a fotografia obtida pela câmera do celular que foi posicionado na frente do lado A. E, na Figura 61.b. tem-se a localização do tripé, posicionado em frente ao lado A, e pode se visualizar o lado B do sólido 3D, em que foram coletadas as medidas das larguras e alturas.

Após as camadas serem fotografadas, foi utilizado o *software* Image J para análise das deformações ocorridas em função da sobreposição das camadas. O *software* Image J é um *software* de domínio público (<https://imagej.nih.gov/ij/download.html>.) destinado ao processamento de imagens. Na Figura 62 tem-se a página inicial do software.

Figura 62 - Página inicial do software Image J



Fonte: A autora.

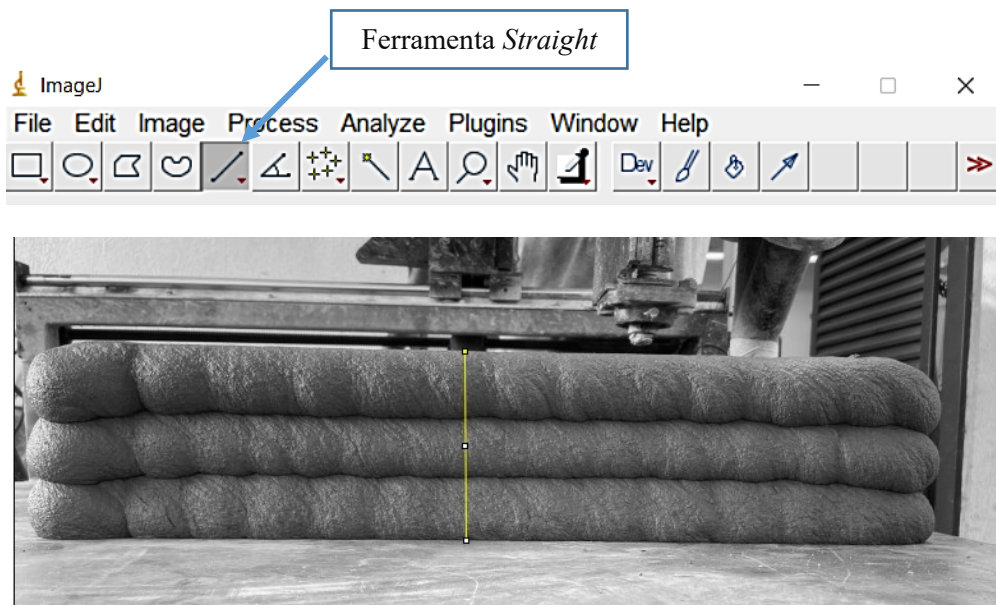
Na Figura 62, observa-se que o software possui em sua página inicial comandos necessários para o processamento de imagens, tais como, *File*, *Edit*, *Image*, *Process*, *Analyze*, *Plugins*, *Window* e *Help*, e as ferramentas para seleção de áreas, tais como o retângulo, oval, polígono e de mão de livre. Nesta pesquisa, os comandos e ferramentas são utilizados para obtenção das áreas das camadas antes e após a sobreposição conforme os seguintes procedimentos:

1. Inicialmente as imagens das camadas antes e após a sobreposição foram importadas utilizando o comando > *File* e convertidas do formato *RGB* para *8-bit* por meio do comando *Image* > *Type*.
 2. Após as imagens terem sido convertidas para *8-bit*, elas foram calibradas em relação as suas medidas. A calibração visa a conversão dos pixels da imagem para outra unidade, como por exemplo, em milímetros (mm), metros (m). Para se realizar a calibração é necessário conhecer alguma medida que esteja na imagem, como por exemplo, a espessura do objeto.
- Nesta pesquisa, utilizou-se como medida para a calibração a média da altura da camada e a média da altura de camadas sobrepostas. Assim, com a ferramenta

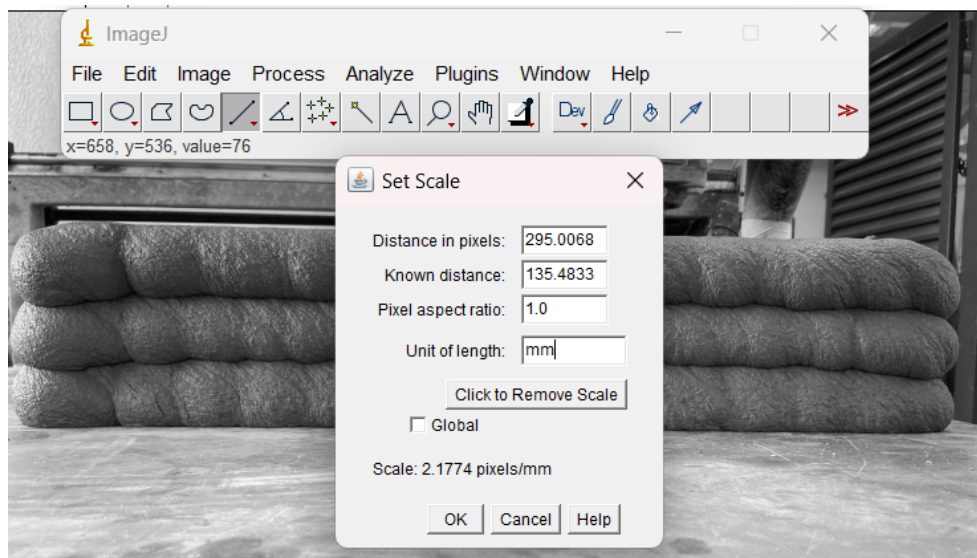
Straight acionada e com o auxílio do cursor do mouse traçou-se uma reta correspondente à altura da camada. (Figura 63.a).

3. Após o traçado da reta, ativou-se o comando *Analyze > Set Scale* que abriram uma caixa de diálogo. Na caixa de diálogo no item *Know distance* inseriu-se para calibração a medida conhecida e no item *Unit of length* a unidade em mm (Figura 63.b).

Figura 63 - Calibração das imagens



(a)



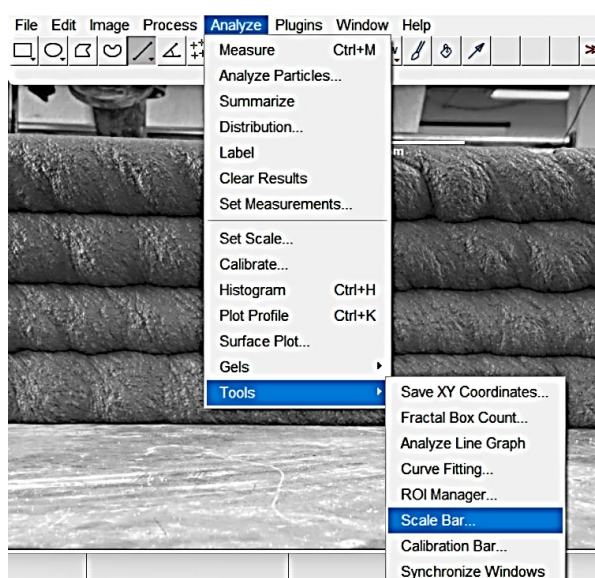
(b)

Fonte: A autora.

Figura 63. (a) Delimitação da reta com o uso do comando *Straight*. **(b)** Caixa de diálogo do comando *Analyze*.

4. Após a imagem ter sido calibrada foi inserida a escala, ativando o comando *Analyze > Tools > Scale Bar* (Figura 64.a). A imagem com a escala é importante pois é possível observar as proporções da camada (Figura 64.b).

Figura 64 – Inserção da escala na imagem



(a)



(b)

Figura 64. (a) Caixa de diálogo aberta com ativação do comando *Analyze* para se colocar escala na imagem. **(b)** Imagem com escala inserida de 100 mm.

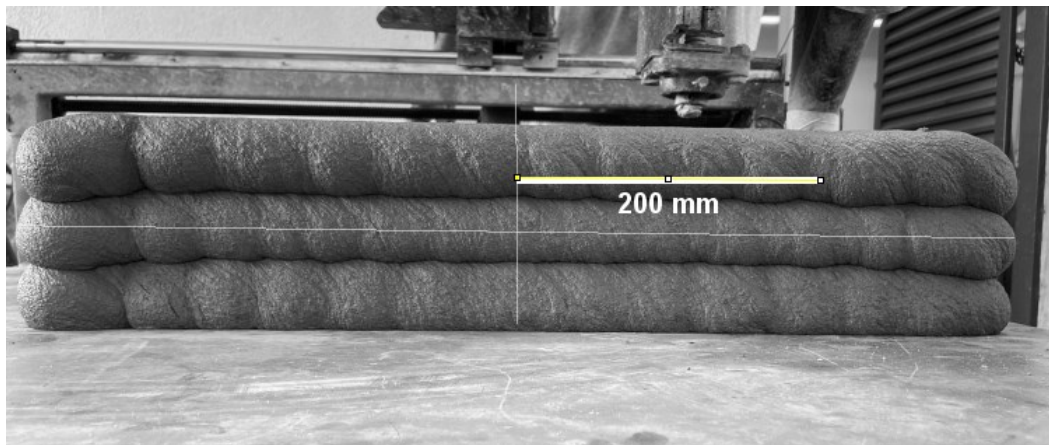
Fonte: A autora.

5. Com a imagem já calibrada, traçou-se uma reta do início ao fim da camada para que se determinasse o seu ponto médio. Após o traçado da reta e do ponto médio, ativou-se o comando > *Edit* > *Fill* para que o centro da camada ficasse visível na imagem (Figura 65.a). A partir do centro da camada traçou se uma reta para o lado direito e com o comando > *Analyze* > *Tools* > *Scale Bar* determinou-se uma escala referente a 200 mm de comprimento (Figura 65.b).

Figura 65 – Demarcação da reta na camada para cálculo da área



(a)



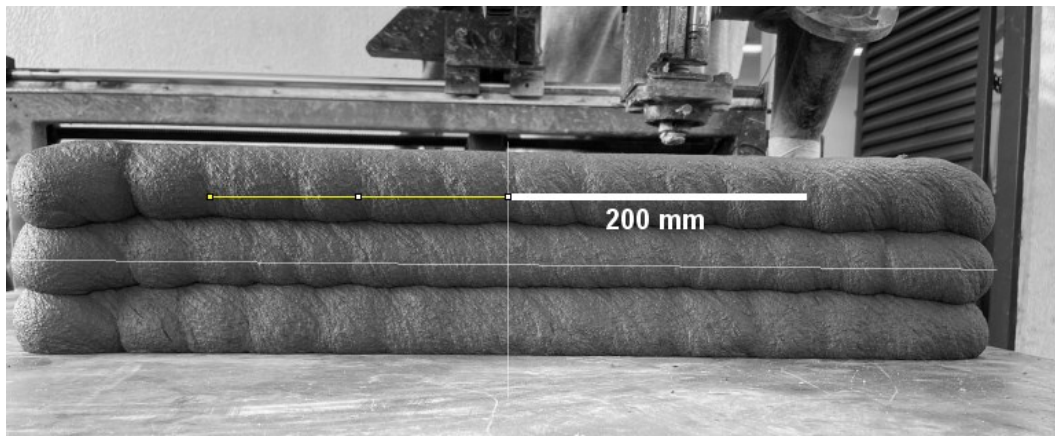
(b)

Fonte: A autora.

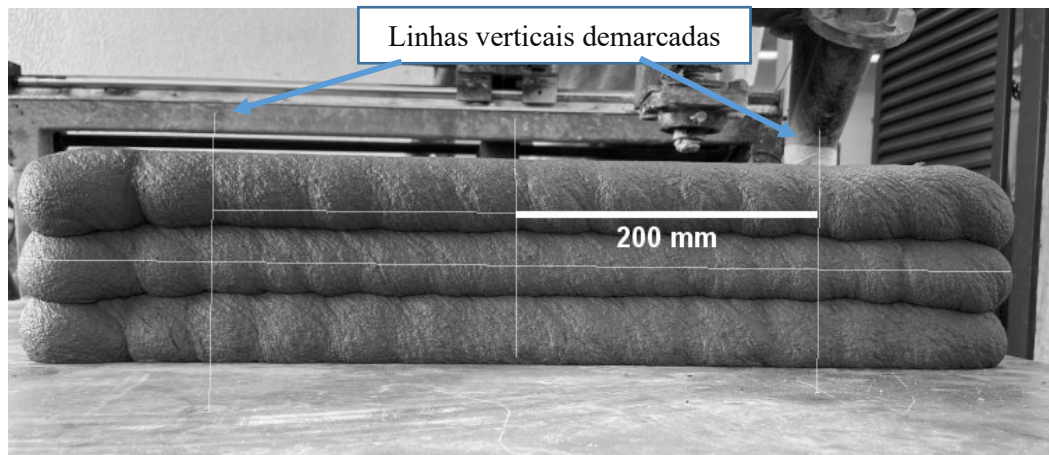
Figura 65. (a) Reta traçada ao longo do comprimento da camada. **(b)** Reta traçada com 200 mm do lado direito do centro da camada.

6. Com o auxílio do mouse, ajustou-se uma reta por cima da escala de 200 mm de forma a coincidir com o tamanho da escala e moveu-se a reta para o lado esquerdo do ponto médio. Novamente, acionou-se o comando $> fill$ para visualização da reta (Figura 66.a). Dessa forma, obteve-se o comprimento de 400 mm localizado no centro da camada e com este, pode-se estabelecer os limites por meio de linhas verticais e comando $> fill$. Assim, foi delimitada a área a ser calculada (Figura 66.b).

Figura 66 – Demarcação da área



(a)



(b)

Fonte: A autora.

Figura 66. (a) Reta de 400 mm traçada ao longo do comprimento da camada. (b) Retas verticais traçadas delimitando a área a ser calculada.

7. A área antes e após a sobreposição referente ao comprimento de 400 mm foi calculada por meio da ferramenta *Polygon selections* (Figura 67.a). A

demarcação ocorreu de forma a contornar o trecho de comprimento de 400 mm, possibilitando a obtenção das respectivas áreas (Figura 67.b).

Figura 67 - Imagem da camada com área demarcada

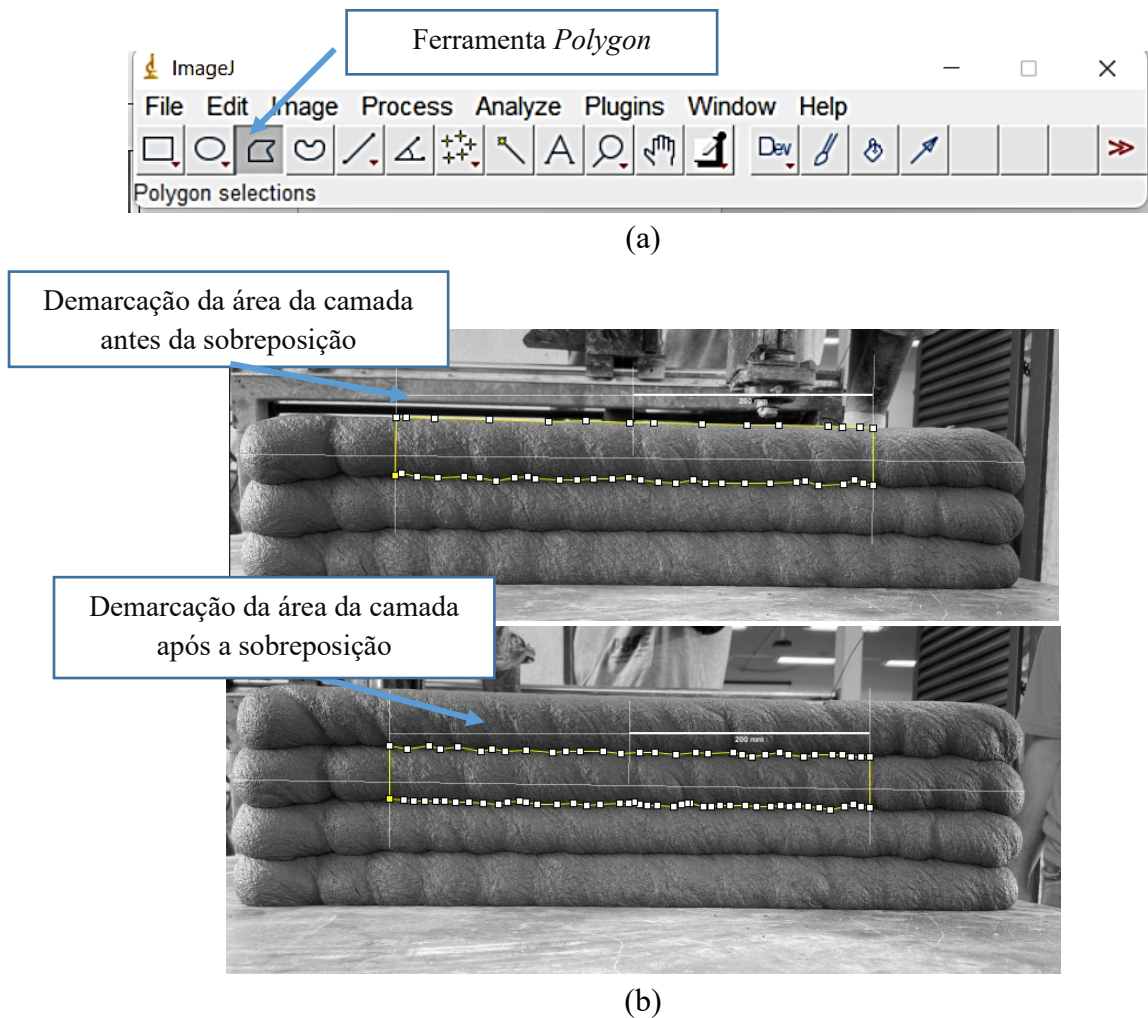


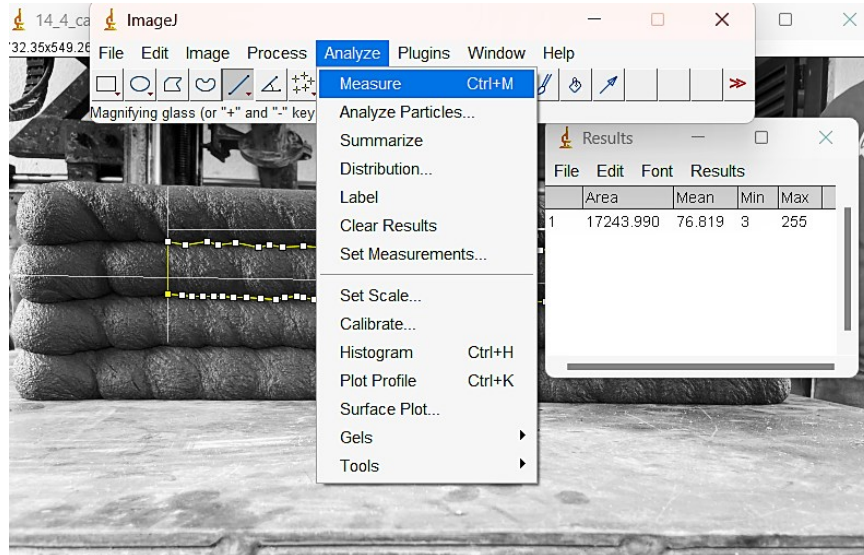
Figura 67. (a) Área demarcada na terceira camada antes da sobreposição da quarta camada. **(b)** Área demarcada na terceira camada após a sobreposição da quarta camada.

Fonte: A autora.

8. Após as camadas terem sido demarcadas, os resultados referentes as áreas foram obtidas por meio do comando *Analyze > Measure*. Na Figura 68 é

possível observar o comando *Analyze* ativado e a caixa de diálogo fornecida pelo software com os resultados das áreas calculadas.

Figura 68 – Comando para o cálculo da área das camadas no software



Fonte: A autora.

A seleção das áreas para análise da deformação nas camadas antes e após a sobreposição foi realizada, conforme descrição a seguir:

- A área da primeira camada extrudada foi demarcada e calculada antes e após a sobreposição da segunda, terceira e quarta camada,
- A área da segunda camada extrudada foi demarcada e calculada antes e após a sobreposição da terceira e quarta camada,
- A área da terceira camada extrudada foi demarcada e calculada antes e após a sobreposição da quarta camada,
- A área da quarta camada foi demarcada somente antes da sobreposição, pois não houve extrusão da quinta camada.

Com os resultados das áreas referentes a 400 mm de comprimento de cada camada, calculou-se a taxa de deformação (mm) por meio da Equação 5.

$$\text{Taxa de deformação (mm)} = \frac{A}{400} \quad \text{Equação (5)}$$

Em que:

A: Área referente ao comprimento de 400 mm obtida pelo software Image J, em mm^2 .

Dessa forma, foi possível compreender quais são os efeitos que diferentes porcentagens de (MC) e adição de HPMC causam em relação a deformação nas camadas ao serem sobrepostas e de que forma estes efeitos afetam a construtibilidade.

3.4.3.3 Umidade superficial por termografia

A análise da umidade superficial entre as camadas é considerada importante para o desenvolvimento dos materiais cimentícios impressos aplicados a impressão 3D. A umidade influencia na propriedade mecânica de aderência entre as camadas. De acordo com Sanjayan *et al.* (2018) o teor de umidade da superfície é afetado por vários fatores incluindo o processo de impressão, tipo e tamanho da impressora, pressão e composição do material.

Para a execução do ensaio utilizando a (TI), ao serem extrudadas, as camadas foram fotografadas com câmera termográfica modelo E6-XT da FLIR, com detector de infravermelho de 43.200 (240×180) pixels e faixa operacional de temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na Figura 69 é possível observar a câmera termográfica E6-XT.

Figura 69 - Câmera termográfica utilizada nesta pesquisa



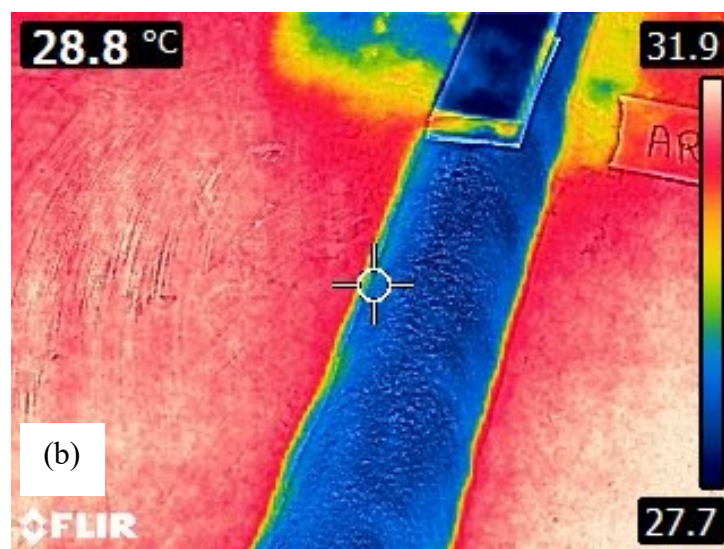
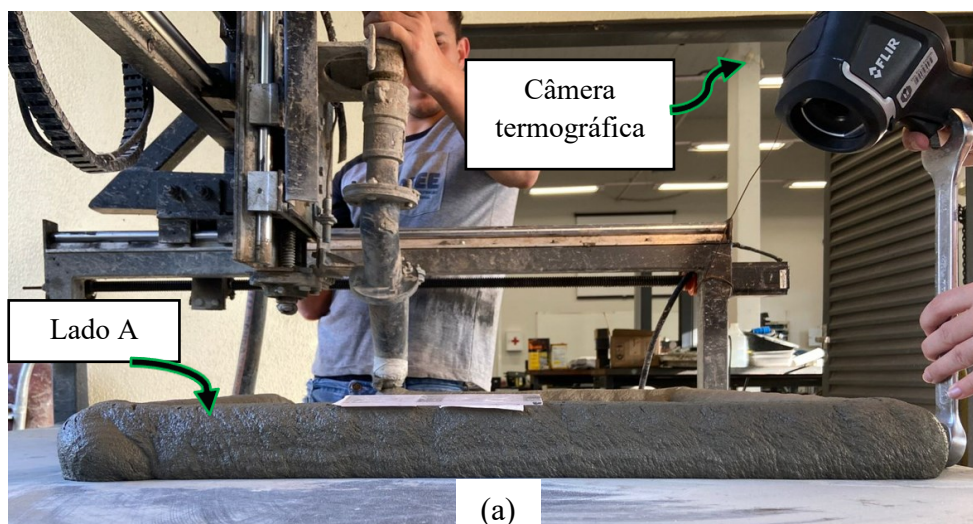
Fonte: Telx1edyne Flir, 2023.

As fotografias por câmera termográfica foram tiradas na mesma posição para todas as argamassas ensaiadas. Para isso, utilizou-se como apoio um objeto com 30 cm de altura e um calço de 5 cm, de forma a manter a câmera sempre na mesma altura e angulação das imagens da superfície.

As imagens foram feitas após cada camada ser extrudada das argamassas arg_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC, sendo as superfícies das camadas fotografadas pertencentes ao lado A do sólido 3D.

Na Figura 70.a é possível observar a execução do ensaio e o posicionamento da câmera termográfica e na Figura 70.b a imagem obtida pela câmera termográfica.

Figura 70 - Execução e imagem obtida por meio da câmera termográfica



Fonte: A autora.

Na Figura 70.b, verifica-se que a imagem obtida possui uma escala com diferentes tipos de cores, sendo que a cor azul representa menores temperaturas e vermelha maiores temperaturas. De acordo com Barreira; Almeida e Delgado (2016) uma escala de cores foi estabelecida para a escala relativa do detector de umidade. Como as temperaturas mais baixas correspondem a zonas mais úmidas, cores frias estão relacionadas a altos valores de umidade e cores quentes a baixos valores de umidade.

Nesta tese, os resultados em relação a umidade e seus efeitos nas propriedades mecânicas são apresentados com base nos estudos desenvolvidos por Monique de Brito Filgueiras, em pesquisa a nível de Mestrado, intitulada ‘Avaliação das propriedades mecânicas de material cimentício produzido por impressão 3D com foco na aderência entre camadas’, desenvolvida em parceria com esta tese e defendida em fevereiro de 2023.

Dessa forma, com os resultados obtidos foi possível correlacionar os efeitos que diferentes porcentagens de MC e HPMC causam nas camadas extrudadas e sua relação com a umidade e com os resultados de resistência a aderência entre camadas, obtidos no Estudo D.

3.4.4 Planejamento Experimental

O planejamento experimental do Estudo C foi realizado conforme exposto na Tabela 14.

Tabela 14 - Planejamento experimental do Estudo C

Material ensaiado	Ensaio e procedimentos	Amostras				
		Amostras	Tempos	Nº de amostras por idade	Nº de amostras por traço	Nº de amostras total
Materiais cimentícios	Índice de consistência - NBR 13276 (ABNT, 2016)	Molde tronco cônico	Antes e após a extrusão	1	2	6
	Densidade de massa - NBR 13278 (ABNT, 2005a)	Molde prismático	Antes e após a extrusão	1	2	6

Sobreposição de camadas – Khalil; (2017).	Objeto 3D (600mm x 600 mm)	Após a extrusão	1	1	3
Análise por meio de software – Image J	Quatro camadas de 2400 mm cada.	Após a extrusão de cada camada.	7	7	21
Umidade por câmera termográfica	Superfície da camada e camadas sobrepostas	Após a extrusão de cada camada	3	3	9

Fonte: A autora.

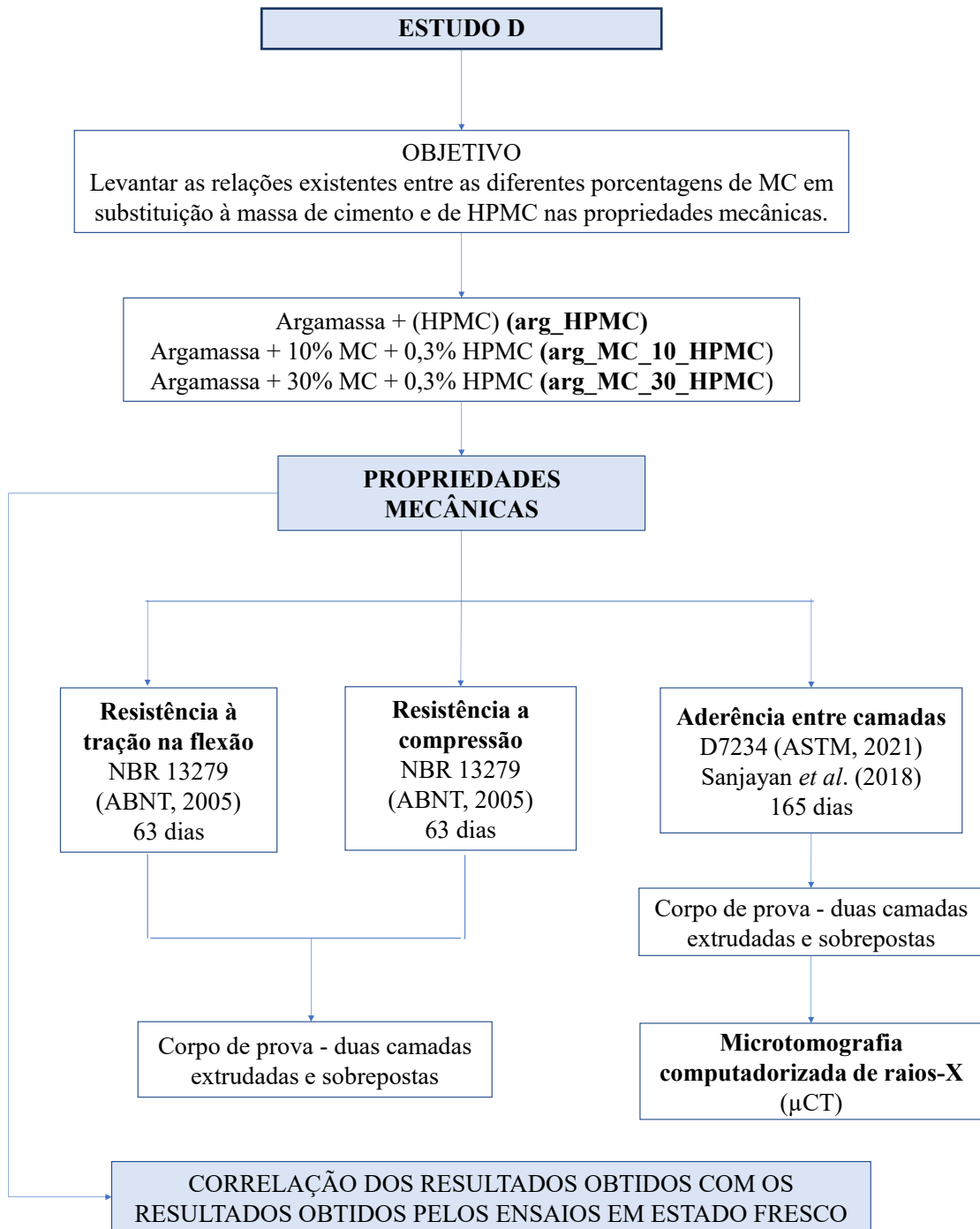
3.5 ESTUDO D

O objetivo deste Estudo é o de estabelecer as relações existentes entre as diferentes porcentagens de (MC) em substituição a massa de cimento e os resultados de propriedades mecânicas em argamassas no estado endurecido desenvolvidas e que foram consideradas extrudáveis e construtivas pelo Estudo B e C.

As propriedades mecânicas de resistência à tração na flexão, resistência a compressão e de aderência entre camadas estudadas nesta pesquisa, foram referentes ao procedimento metodológico da dissertação de Filgueiras (2023), intitulada ‘Avaliação das propriedades mecânicas de material cimentício produzido por impressão 3D com foco na aderência entre camadas’, realizada em parceria com esta tese de doutorado, sendo que foi utilizada a mesma impressora e os mesmos materiais.

Na Figura 71 é ilustrado o fluxograma do Estudo D.

Figura 71 - Descrição do Estudo D adotado nesta pesquisa



Fonte: A autora.

Conforme observado na Figura 71, para atender ao objetivo proposto pelo Estudo D, os corpos de provas com camadas sobrepostas das arg_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC foram ensaiados em relação as propriedades mecânicas de resistência a tração na flexão aos 63 dias, resistência a compressão aos 63 dias e de aderência entre camadas e de microtomografia computadorizada de raios-X (μ CT) aos 165 dias.

3.5.1 Ensaio de microtomografia computadorizada de raios-X (μ -CT)

O ensaio de microtomografia computadorizada de raios-X foi realizado para que fosse possível verificar diferenças de porosidade ocorridas na interface das camadas e no restante do corpo de prova. O ensaio foi realizado no Laboratório de Análises por Técnicas de Raios-X (LARX) da Universidade Estadual de Londrina (UEL) por meio do equipamento Microtomógrafo SkyScan-Bruker, modelo 1173, com as especificações conforme Tabela 15.

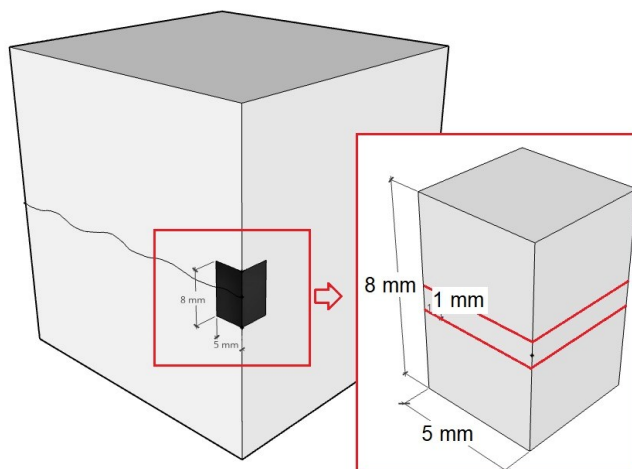
Tabela 15 – Especificações do Microtomógrafo para ensaio

Parâmetros	Dados
Voltagem	90 Kv
Corrente	88 μ A
Resolução de imagem	8 μ m
Filtro	alumínio
Tempo de exposição	700 ms
Passo angular	0.35° (rotacionando a amostra em 180°);
Tempo de escaneamento	40 min.

Fonte: A autora.

As imagens foram realizadas nos corpos de prova cortados para o ensaio de aderência, sendo a região analisada correspondente à interface, com dimensões (5x8x5) mm conforme Figura 72.

Figura 72 - Região de corte do corpo de prova para ensaio em microtomografia



Fonte: Filgueiras (2023).

Na Figura 72 é possível observar o local que foi analisada a porosidade, em que abrange a faixa de 1 mm, correspondente a região de interface entre camadas, e a porosidade total da argamassa, de 0 a 8 mm.

Ao final do Estudo D, com os resultados obtidos de propriedades mecânicas foi possível relacionar com os resultados obtidos nos Estudos B e C relacionados a extrudabilidade e construtibilidade das argamassas com diferentes porcentagens de MC e adição de HPMC.

3.5.2 Planejamento Experimental

O planejamento experimental do Estudo D foi conforme exposto na Tabela 16.

Tabela 16 - Planejamento experimental do Estudo D adotado nesta pesquisa

Material ensaiado	Ensaio e procedimentos	Corpos de provas	Idade (dias)	Nº de amostras por idade	Nº de amostras por traço	Nº de amostras total
Duas camadas sobrepostas	Resistência a tração na flexão – NBR 13279 (ABNT, 2005)	(8x8x32) cm	63	2	2	6
	Resistência a compressão axial – NBR 13279 (ABNT, 2005)	(8x8x8) cm	63	4	4	12
	Resistência na aderência –	(8x8x8) cm	165	3	3	9

	D7234 (ASTM, 2019) e Sanjayan <i>et al.</i> (2018).					
	Porosidade nas camadas e na região de interface	(5x5x8) mm	165	1	1	3
Argamassas extrudadas e moldadas	Resistência a compressão axial – NBR 13279 (ABNT, 2005)	(8x8x8) cm	21 e 63	3	6	18
	Resistência a tração na flexão – NBR 13279 (ABNT, 2005)	(8x8x32) cm	63	2	2	6

Fonte: A autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises provenientes dos Estudos Experimentais desenvolvidos ao longo desta tese. De forma inicial, os ensaios do Estudo A objetivaram compreender as interferências ocorridas nas pastas e argamassas com adição de MC em substituição à massa de cimento e com adição de 0,3% de HPMC. No Estudo B foram desenvolvidas argamassas consideradas extrudáveis e avaliadas por meio do ensaio de janela de impressão. De forma sequencial, no Estudo C são apresentadas as alterações ocorridas nas argamassas em relação aos aspectos de construtibilidade e de umidade por meio da câmera termográfica e no Estudo D são apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios de propriedade mecânica e da análise por microtomografia computadorizada de raios-X (μ CT).

5.1 ESTUDO A

Para compreensão dos efeitos ocasionados pelo HPMC e pela adição de MC em diferentes porcentagens como substituição à massa de cimento em pastas e argamassas, foram realizados ensaios de consistência normal, início e fim de pega, retenção de água, teor de ar incorporado e densidade.

4.1.1 Ensaio em pastas – consistência normal e início e fim de pega

Inicialmente as pastas foram ensaiadas em relação a consistência normal para obtenção das relações água/cimentícios e, de forma sequencial em relação ao início e fim de pega. Os ensaios foram realizados a temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 1$. Na Tabela 17 são apresentados os resultados das relações água/cimentícios para a obtenção da consistência normal e de início e fim de pega.

Tabela 17 - Resultados consistência normal e início e fim de pega em pastas cimentícias

Nomenclatura	Descrição	Relação água/cimentícios	Início de pega (min)	Fim de pega (min)	Intervalo de tempo (min)
p_ref	Pasta de referência	0,306	235	305	70
p_HPMC	Pasta + 0,3% HPMC	0,382	325	> 420	95
p_MC_5	Pasta + 5% MC	0,326	280	335	55
p_MC_10	Pasta + 10% MC	0,343	230	275	45
p_MC_30	Pasta + 30% MC	0,360	200	220	20
p_MC_5_HPMC	Pasta + 5% MC + 0,3% HPMC	0,356	300	410	110
p_MC_10_HPMC	Pasta + 10% MC + 0,3% HPMC	0,408	305	>420	115
p_MC_30_HPMC	Pasta + 30% MC + 0,3% HPMC	0,463	290	360	70

Fonte: A autora.

Verifica-se na Tabela 17 que no que se refere a consistência normal a pasta com adição de HPMC (p_HPMC), obteve a relação água/cimentício de 0,382, e que esta demandou maior quantidade de água para atingir a consistência normal quando comparada a pasta de referência (p_ref) com o resultado de relação água/cimentício de 0,306.

Este comportamento é justificado devido ao HPMC ser considerado um aditivo polimérico conhecido como éter de celulose, por possuir altos pesos moleculares e grupamentos de hidroxila modificados pela adição de outros grupamentos funcionais (PATURAL *et al.*, 2011).

Os grupos éteres e hidroxilas presentes no HPMC podem polarizar as moléculas de água e formar pontes de hidrogênio absorvendo a água (MA *et al.*, 2018). E ainda, a adição de HPMC em materiais cimentícios pode aumentar a consistência em argamassas e a

viscosidade em pastas, devido a molécula de HPMC reter as partículas de cimento (PATURAL *et al.*, 2011; MA *et al.*, 2018).

Em relação as pastas com MC (p_MC_5, p_MC_10 e p_MC_30) verifica-se que a adição do MC demandou maiores quantidades de água quando comparada a pasta sem adição (p_ref) e que este aumento nas relações água/cimentícios ocorreu de forma progressiva, ou seja, conforme o aumento da substituição de cimento por MC houve aumento nas relações água/cimentícios. Este resultado justifica-se devido ao MC possuir elevada área superficial (157820 cm²/g) quando comparada a do cimento (4734 cm²/g).

É possível observar resultados progressivos nas relações água/cimentícios nas pastas desenvolvidas com MC e HPMC, sendo de 16,34 % para a p_MC_5_HPMC, de 33,33% para a p_MC_10_HPMC e de 51,30% para a p_MC_30_HPMC quando comparada a p_ref. Possivelmente devido aos efeitos combinados da polarização das moléculas de água pelos grupos éteres e hidroxilas presentes no HPMC e pela elevada área superficial do MC (157820 cm²/g), que promove maior contato.

E ainda, verifica-se aumento nas relações água/cimentícios para as pastas desenvolvidas com a adição de HPMC e de MC quando comparadas as pastas desenvolvidas somente com MC, sendo este aumento de 9,20% para a p_MC_5_HPMC, de 18,95% para a p_MC_10_HPMC e de 28,61% para a p_MC_30_HPMC. Estes resultados demonstram que o HPMC intensifica o aumento das relações água/cimentícios quando utilizado de forma combinada com MC.

Após serem obtidas as relações água/cimentícios das pastas ensaiadas, foram realizados ensaios de tempo de início e fim de pega. Observou-se que a pasta com adição de HPMC (p_HPMC) foi a pasta que apresentou o maior tempo de início de pega (325 min) quando comparada às demais pastas. Este resultado é devido ao HPMC provocar retardo na hidratação cimentícia devido a este ser um éter de celulose que por meio da adsorção nas partículas cimentícias interfere na formação do gel C-S-H e na precipitação de portlandita Ca(OH)₂ (CHEN *et al.*, 2020c; CHEN *et al.*, 2020d; POURCHEZ, GROSSEAU e ROUT, 2010).

Nas pastas com adição de MC verificam-se um decréscimo do tempo de início de pega conforme o aumento das porcentagens de substituição de MC por cimento, sendo 5 de minutos para a p_MC_10 e de 35 minutos para a p_MC_30 quando comparada a p_ref, demonstrando que o MC intensifica as reações ocorridas nas pastas cimentícias quando comparada a pasta sem adição (p_ref). Este efeito é ocasionado pelo MC acelerar a

hidratação cimentícia devido a reação pozolânica com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e da calcita (CaCO_3) corroborando com os comportamentos obtidos na literatura (KOCAK, 2020; CHEN *et al.*, 2019).

Para as pastas com adição de MC e HPMC observou-se retardo de início de pega de 27,66% para a p_MC_5_HPMC, de 29,79% para a p_MC_10_HPMC e de 23,40% para a p_MC_30_HPMC quando comparado a pasta de referência (p_ref). A adição de HPMC promove retardo, influenciando na reação, e por outro lado, o aumento das porcentagens de MC em pastas desenvolvidas com HPMC, atenua os efeitos de retardo de início de pega, sendo a p_MC_30_HPMC com o menor tempo de início, de 290 minutos, corroborando com o comportamento ocorrido nas pastas com adição de MC (p_MC_5, p_MC_10 e p_MC_30).

O retardo no tempo de início de pega, em materiais aplicados a impressão 3D promovem extrusão de camadas de forma contínua e possibilitam atingir resistência necessária para que as camadas resistam ao próprio peso e o peso das camadas posteriores. (BUSWELL *et al.*, 2018). Assim, verifica-se nesta pesquisa, que as pastas com os maiores tempos de início de pega foram as p_HPMC (325 minutos), p_MC_5_HPMC (300 minutos), p_MC_10_HPMC (305 minutos) e p_MC_30_HPMC (290 minutos), sendo consideradas promissoras para o desenvolvimento de materiais cimentícios aplicados à impressão 3D.

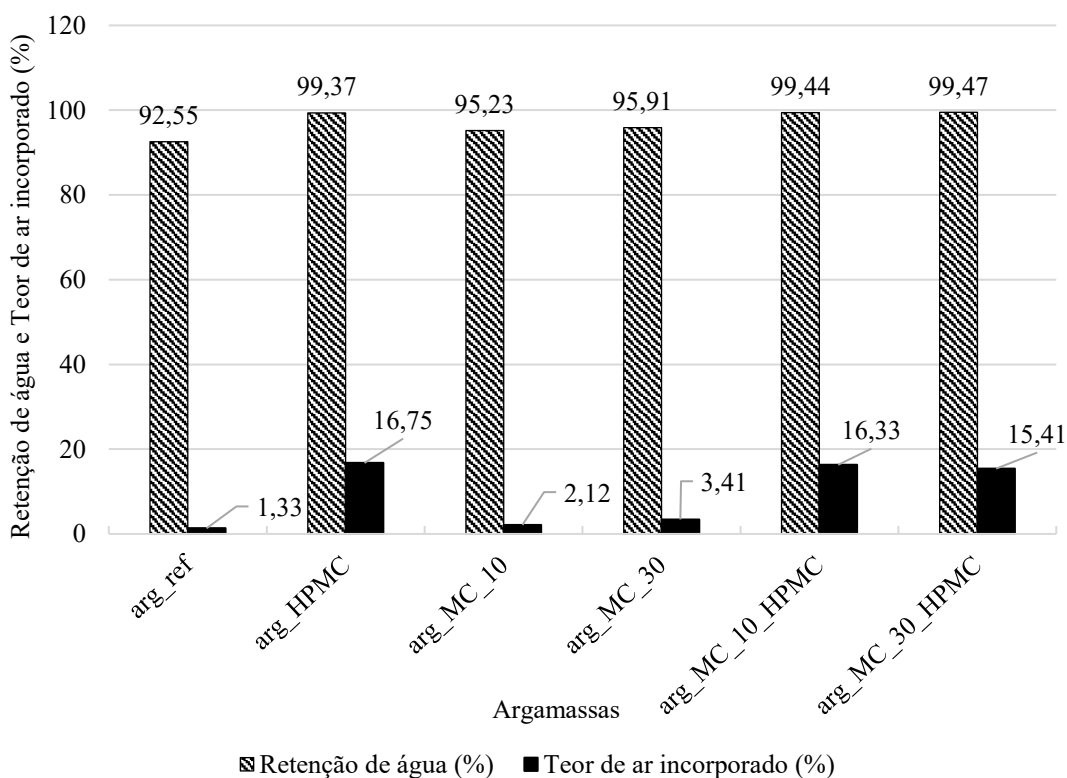
Em relação aos intervalos de tempo de início e fim de pega (diferença entre tempo de fim de pega e tempo de início de pega) observa-se que nas pastas desenvolvidas com MC (p_MC_5, p_MC_10 e p_MC_30) houve decréscimo de intervalo conforme o aumento da substituição de cimento por MC. E que, as pastas com adição de HPMC (p_HPMC, p_MC_5_HPMC e p_MC_10_HPMC) obtiveram os maiores intervalos de tempo (95min, 110min e 115min).

O intervalo de tempo é importante pois influencia a execução de objetos tridimensionais impressos em 3D e no tempo de extrusão de cada camada. Dessa forma materiais cimentícios com maiores intervalos de tempo possibilitam maior tempo de extrusão de camada e consequentemente de objetos impressos. Ou seja, neste sentido, as pastas com adição de HPMC obtiveram maiores intervalos de tempos e por isso podem ser consideradas promissoras para o desenvolvimento de argamassas desenvolvidas nos Estudos B, C e D.

4.1.2 Ensaio em argamassas - retenção de água, teor de ar incorporado e densidade de massa

As argamassas foram ensaiadas em relação a retenção de água, teor de ar incorporado e densidade de massa, para que por meio dos resultados fossem analisadas em relação as interferências ocorridas com a adição de MC em substituição a massa de cimento e de HPMC. Na Figura 73 são apresentados os resultados de retenção de água e teor de ar incorporado.

Figura 73 - Resultados de retenção de água e teor de ar incorporado em argamassas



Fonte: A autora.

Em relação aos resultados de retenção de água, observa-se que a arg_HPMC obteve resultado de 99,37%, o que significa um aumento de 7,37% quando comparada a arg_ref, demonstrando que o aditivo HPMC promoveu maior capacidade de retenção de água na argamassa ensaiada.

Este comportamento pode ser justificado devido a polarização da molécula de água pelo HPMC e por este possuir natureza hidrofílica. Assim, ao se adicionar o HPMC em argamassas, ocorre a formação de um filme que impede a evaporação da água de forma

rápida. Resultados semelhantes foram obtidos na literatura, em argamassas desenvolvidas nas porcentagens de adição de HPMC de 0,27% e 0,3% com resultados de retenção de 96,8% a 98,9% e de 95%, respectivamente. (PATURAL *et al.*, 2011; CHEN *et al.*, 2020d).

Em relação as argamassas desenvolvidas com MC, verifica-se que a substituição de cimento por metacaulim nas porcentagens de 10% e 30% promoveu aumento de retenção de 2,89% e de 3,63% respectivamente em relação a arg_ref. Este fato é ocasionado devido à elevada área superficial do MC ($157820 \text{ cm}^2/\text{g}$) quando comparada a do cimento ($4734 \text{ cm}^2/\text{g}$).

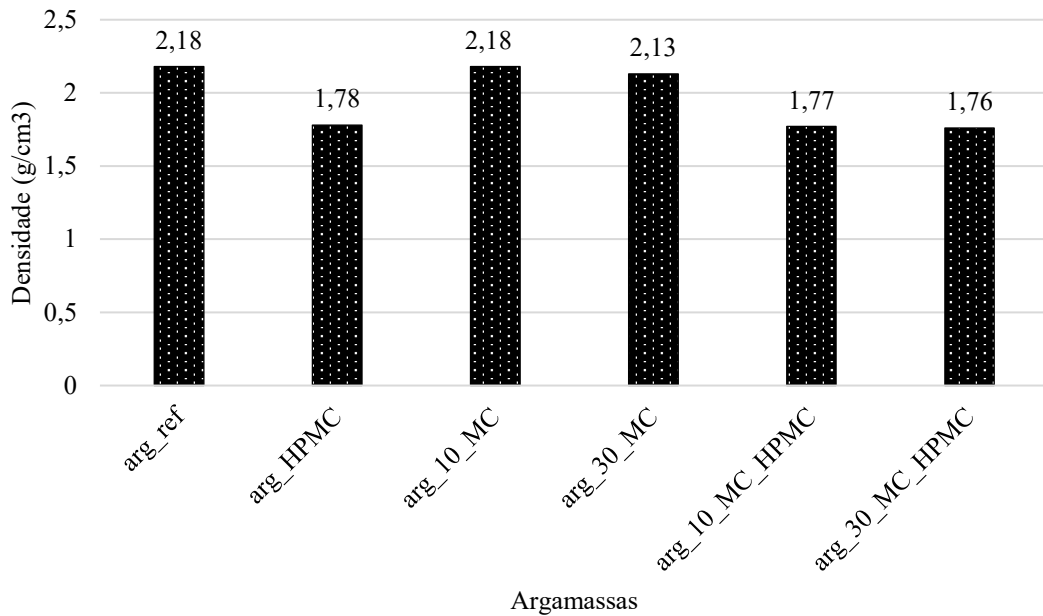
Para as argamassas desenvolvidas com MC e HPMC, observa-se um aumento de 0,07% para a arg_MC_10_HPMC e de 0,10% para a arg_MC_30_HPMC em relação a arg_HPMC. Dessa forma, pode se concluir que em relação a retenção de água não há alteração significativa entre a arg_HPMC e as argamassas com HPMC e MC.

Os resultados de teor de ar incorporado demonstraram que a arg_HPMC possui o resultado mais elevado quando comparado as argamassas ensaiadas, de 16,75%, sendo que resultados aproximados são encontrados nas argamassas arg_10_MC_HPMC, de 16,33% e arg_30_MC_HPMC, de 15,41%. Possivelmente este aumento é decorrente em função da alteração da microestrutura nas argamassas por meio da adição de HPMC. Na porcentagem de 0,3% de HPMC ocorre um efeito de ponte em torno das partículas de areia, fazendo com que a maioria das partículas de areia fiquem incorporadas na rede coloidal de HPMC e suspensas na solução intersticial. (CHEN *et al.*, 2020d).

Assim, pode se afirmar que a adição de HPMC e de diferentes porcentagens de MC promoveram resultados mais elevados de retenção de água sendo este resultado considerado promissor, pois materiais cimentícios desenvolvidos para impressão 3D que possuam considerável capacidade de reter água possibilitarão que ao serem extrudados, as camadas sofram perda gradativa de água, possibilitando que as reações do processo de hidratação cimentícia sejam mais lentas, ocasionando menores fissuras e retrações.

Além da propriedade de retenção de água e teor de ar incorporado as argamassas foram ensaiadas em relação a densidade, para verificação da influência do HPMC e de diferentes porcentagens de adição de MC nesta propriedade. Os resultados da densidade de massa são apresentados na Figura 74.

Figura 74 - Resultados de densidade de massa em argamassas ensaiadas



Fonte: A autora.

Em relação aos resultados densidade de massa verifica-se que nas argamassas arg_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC apresentaram menores resultados de densidade de massa de 1,78, 1,77 e 1,76 g/cm³ quando comparados a arg_ref de 2,18 g/cm³. Este resultado se correlaciona com o teor de ar incorporado onde foi observado que as argamassas contendo HPMC obtiveram maiores resultados quando comparada a arg_ref.

É importante ressaltar que materiais cimentícios menos densos aplicados a impressão 3D interferem na capacidade construtiva, isto porque com estes materiais é possível a extrusão e sobreposição de maior número de camadas e com menores pesos. Em decorrência do menor peso tem-se menores alterações nas camadas do objeto tridimensional extrudado e por consequência maior estabilidade do objeto na execução construtiva.

4.1.3 Considerações parciais do Estudo A

Pode-se concluir com base nos resultados obtidos no Estudo A que o HPMC promove aumento na relação água/cimentícios em pastas e de retenção de água em argamassas, sendo o aumento de 7,37% para a arg_HPMC quando comparada a arg_ref. Este resultado é considerado importante pois materiais cimentícios aplicados a impressão 3D desenvolvidos com HPMC promovem perda gradativa de água na extrusão das camadas de

objetos impressos. Por outro lado, a maior demanda de água pode afetar de forma significativa a reologia dos materiais cimentícios impressos com HPMC e com isso interferir na capacidade de bombeamento do maquinário por meio do aumento de pressão.

As pastas com HPMC tiveram maior retardo no tempo de início de pega, pois o HPMC interfere na hidratação cimentícia. Este resultado demonstra que possivelmente argamassas desenvolvidas com HPMC poderão ser extrudadas com maior tempo de bombeamento e de extrusão, sendo este um fator importante para caso seja necessário adequação nos maquinários de impressão 3D sem comprometer a extrusão. E ainda, o maior tempo de início de pega, possibilita a extrusão de camadas que ao serem sobrepostas sejam aderidas as camadas extrudadas anteriormente.

Em relação aos resultados de densidade, o HPMC promoveu materiais cimentícios menos densos e que contribuem para a construtibilidade e estabilidade de objetos a serem impressos. Por outro lado, os materiais cimentícios com HPMC obtiveram maiores resultados de teor de ar incorporado, sendo que, este aumento pode interferir nas propriedades mecânicas.

E, por último, a adição de diferentes porcentagens de MC demonstrou ser uma alternativa promissora devido a contribuir com a sustentabilidade, por meio do desenvolvimento de argamassas com a substituição em massa do cimento, e por não alterar de forma significativa os resultados de retenção de água quando comparada as argamassas contendo somente HPMC.

5.2 ESTUDO B

Este estudo teve como principal objetivo desenvolver argamassas consideradas extrudáveis e analisá-las por meio do ensaio de janela de impressão. Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos das argamassas desenvolvidas com a adição de (MC) nas porcentagens de substituição de 0, 5, 10 e 30% em relação à massa de cimento e adição de 0,3% de HPMC.

A relação água/cimentício das argamassas extrudadas se deu com base na definição da quantidade de água necessária para atingir a trabalhabilidade considerada adequada para

as argamassas serem submetidas a extrusão. Na tabela 18 são apresentados os resultados das argamassas ensaiadas e suas respectivas relações água/cimentícios.

Tabela 18 - Relações água/cimentícios das argamassas

Argamassas	Quantidade de água para execução de 90 litros de argamassa (kg)	Relação água/cimentícios
arg_HPMC	14,88	0,372
arg_MC_5_HPMC	14,94	0,374
arg_MC_10_HPMC	15,65	0,391
arg_MC_30_HPMC	16,78	0,419

Fonte: A autora.

Observa-se, na tabela 18, que as relações água/cimentícios utilizadas no desenvolvimento das argamassas extrudadas aumentam à medida que se aumenta a porcentagem de substituição de (MC), variando de 0,372 para a arg_HPMC a 0,419 para a arg_30_HPMC. Estes resultados corroboram com os identificados no ensaio de consistência normal – Estudo A.

Comportamentos semelhantes foram encontrados na literatura científica, Bohuchval *et al.* (2020) estudaram os efeitos do (MC) e de cinza volante em substituição à massa de cimento e concluíram que a elevada área superficial do (MC) e os teores de silicato e de aluminato em sua composição química tornam as superfícies pozolânicas reativas, demandando maiores quantidades de água.

Chen *et al.* (2020c) estudaram misturas cimentícias desenvolvidas com argila com baixo teor de calcinação, filler calcário e aditivo HPMC. Após uma série de tentativas e erros, a relação água/cimentícios foi fixada em 0,3, o que garantiu trabalhabilidade para a mistura ser impressa. Dessa maneira, pode-se afirmar que a água adicionada nas misturas cimentícias aplicadas na impressão 3D possui importante função de tornar a mistura apta ao processo de impressão.

Após as argamassas arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC serem misturadas com suas respectivas relações água/cimentícios, elas foram analisadas visualmente por meio do teste de mão para serem consideradas aptas para serem extrudadas para que assim pudesse ser verificada a qualidade de impressão da primeira camada.

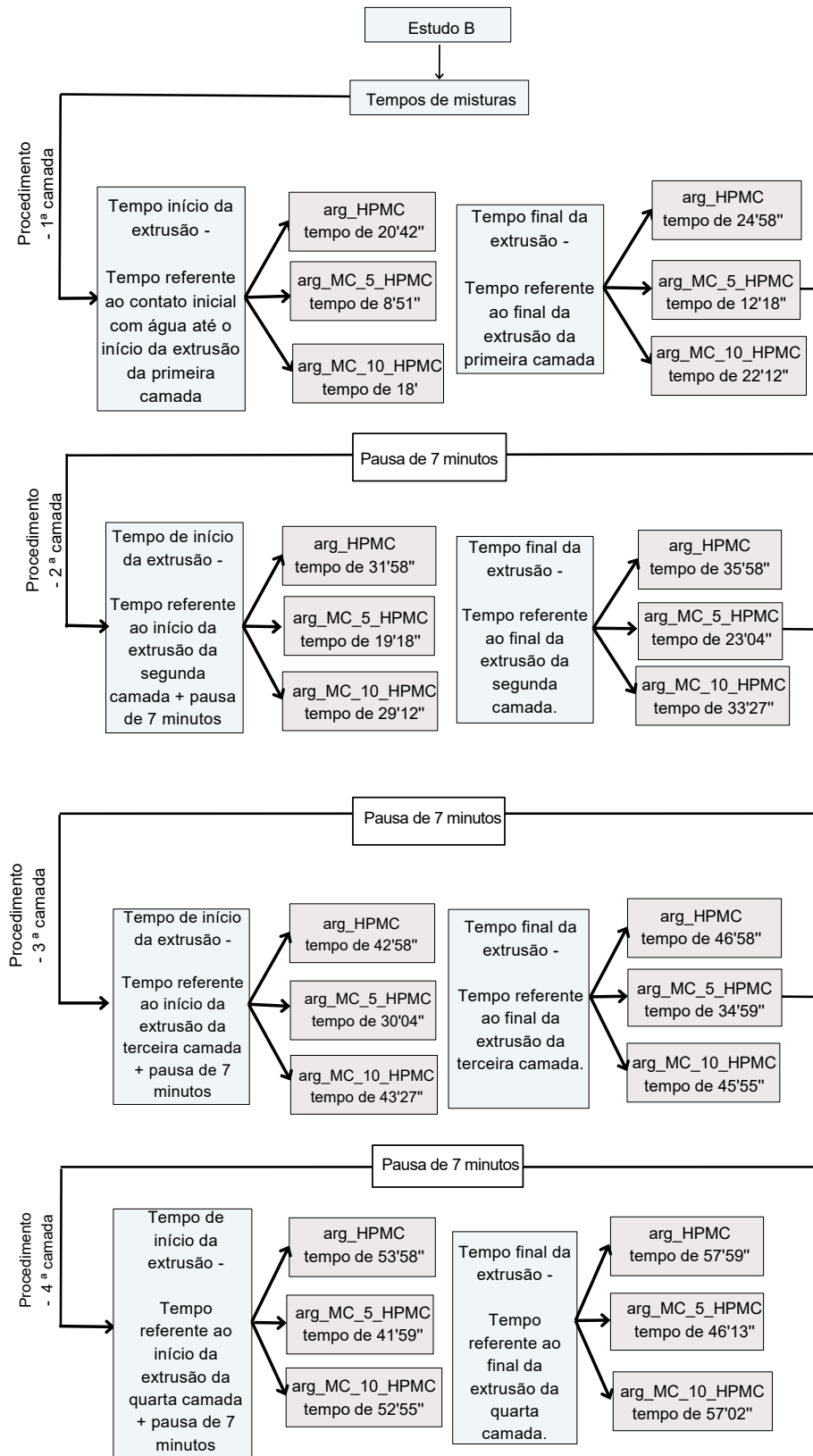
4.2.1 Tempos de misturas, consistência e quantidade de camadas extrudadas

Para os ensaios de extrudabilidade e janela de impressão, as argamassas foram misturadas e cronometradas a partir do contato da água com os materiais secos (cimento CP II F40, areia e HPMC) pois, a partir deste contato se iniciam as reações de hidratação cimentícia nas argamassas.

De forma sequencial, foram anotados os tempos referentes ao início e fim da extrusão da primeira camada, segunda, terceira e quarta camada. Sendo que no ensaio de janela de impressão foram incluídas pausas de 7 minutos entre a extrusão de cada uma das camadas extrudadas para as argamassas *arg_HPMC*, *arg_MC_5_HPMC* e *arg_MC_10_HPMC*. E, a extrusão se deu de forma contínua entre as camadas, ou seja, sem pausas para *arg_MC_30_HPMC*.

Por fim, verificou-se o número de camadas extrudadas em função do volume do misturador de 90 litros para cada uma das argamassas ensaiadas. Na Figura 75, é possível observar os resultados obtidos referentes aos tempos das misturas (a partir do contato inicial com água) até o início e fim da extrusão de cada uma das camadas das argamassas *arg_HPMC*, *arg_MC_5_HPMC* e *arg_MC_10_HPMC* e a quantidade de camadas extrudadas.

Figura 75 - Resultados obtidos referentes aos tempos de misturas da arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC



Fonte: A autora.

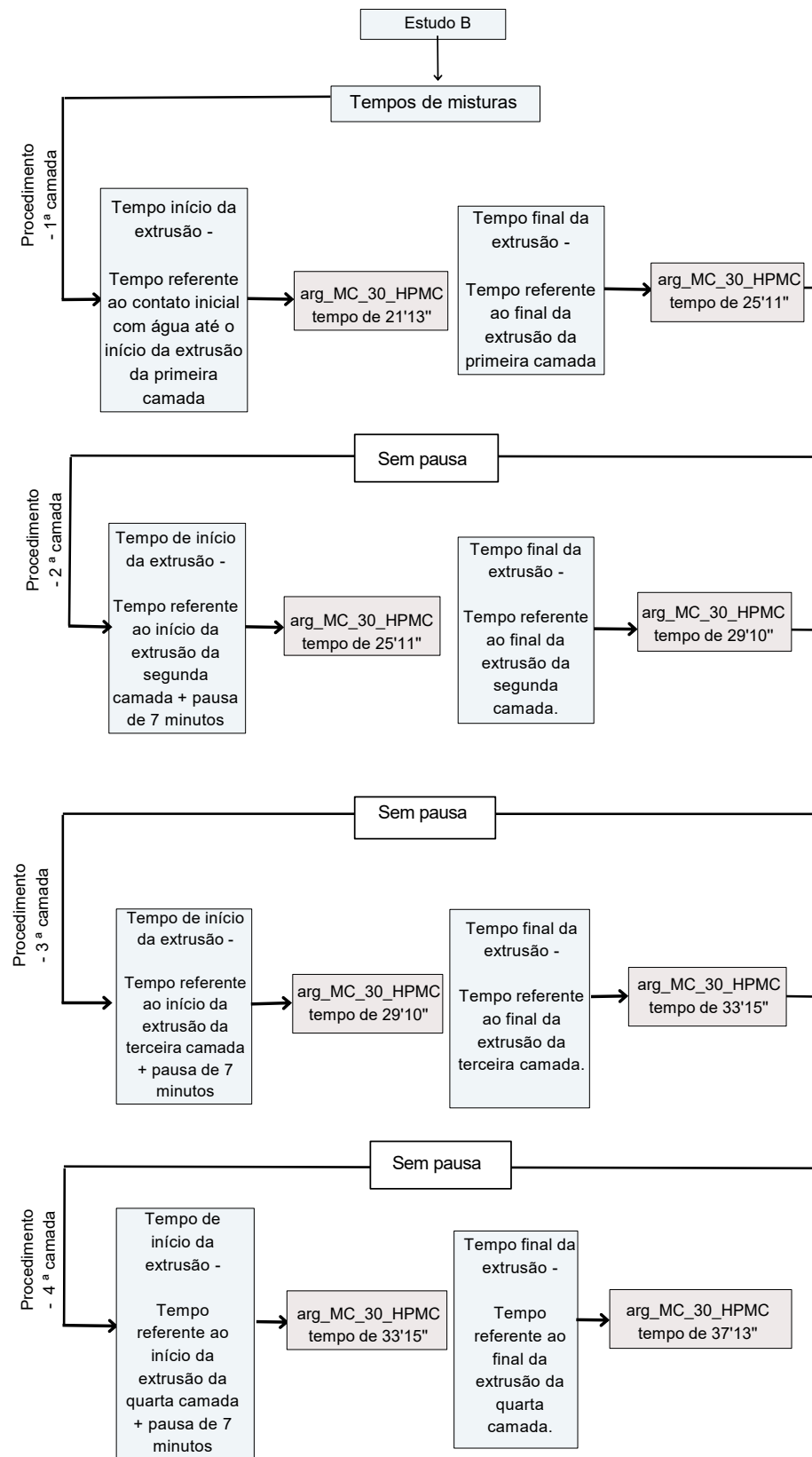
Na Figura 75, nota-se que foi possível a extrusão de até quatro camadas para cada uma das argamassas ensaiadas em função da capacidade de volume do misturador de 90 litros. E verifica-se que o tempo de extrusão de cada uma das camadas extrudadas para atingir o comprimento de 1600 mm foi de aproximadamente 4 minutos. A vazão de impressão foi de 2,46 L/min e com velocidade de 50 mm/s, parâmetros pré-fixados no sistema de impressão.

Observa-se diferenças entre o tempo de início de extrusão das primeiras camadas, sendo que a argamassa com maior tempo foi a arg_HPMC com 20 minutos e 42 segundos e a com menor tempo foi a arg_MC_5_HPMC com 8 minutos e 51 segundos. Esta diferença de tempo de início de extrusão deve-se à operação do maquinário e à análise visual da mistura até a argamassa ser considerada apta para ser extrudada.

E, ainda, as argamassas arg_HPMC e arg_MC_10_HPMC foram as que obtiveram resultados próximos de tempo final de extrusão das quatro camadas, sendo de 57 minutos e 59 segundos e de 57 minutos e 2 segundos, respectivamente. Pode-se se concluir que é possível a extrusão de até quatro camadas pelo maquinário no tempo aproximado de 1 hora.

A arg_MC_30_HPMC foi ensaiada e foram obtidos os resultados referentes aos tempos das misturas (a partir do contato inicial com água) até o início e fim da extrusão, sendo as camadas extrudadas de forma contínua. Os resultados podem ser visualizados na Figura 76.

Figura 76 - Resultados obtidos referentes aos tempos de mistura da arg_MC_30_HPMC



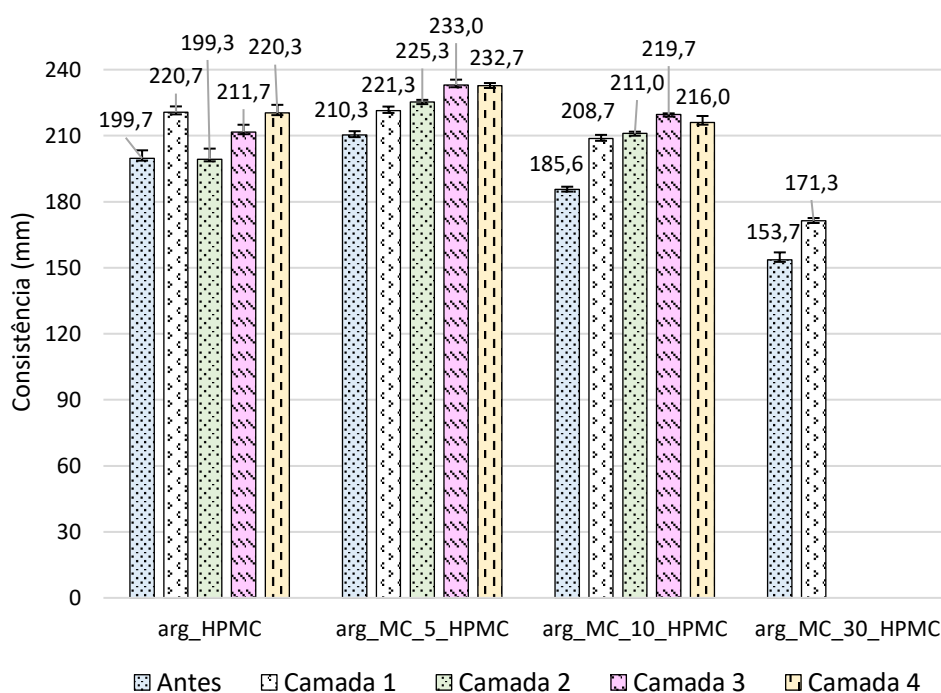
Fonte: A autora.

Na Figura 76, verifica-se que, para a arg_MC_30_HPMC, foi possível a extrusão de até quatro camadas. O tempo de início da extrusão da primeira camada foi de 21 minutos e 13 segundos e o tempo final da extrusão da quarta camada foi de 37 minutos e 13 segundos. As quatro camadas da arg_MC_30_HPMC foram extrudadas em menor tempo quando comparadas com as demais argamassas ensaiadas devido a não possuírem pausas de 7 minutos entre a extrusão de suas camadas.

O tempo de extrusão de cada uma das camadas extrudadas para atingir o comprimento de 2400 mm foi de aproximadamente 4 minutos, com uma vazão de 2,46 L/min e a velocidade de 50 mm/s. É possível concluir que não houve alteração significativa do tempo de extrusão das camadas para os comprimentos de 1600 mm (arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC) e de 2400 mm (arg_MC_30_HPMC).

Para a caracterização das argamassas ensaiadas em relação ao índice de consistência, amostras das argamassas foram coletadas antes e após a extrusão das camadas, para que fossem observadas possíveis alterações ocasionadas pelo bombeamento e pela extrusão. Por ser impressa de forma contínua, ou seja, sem pausas, para a arg_MC_30_HPMC os ensaios de consistência foram realizados antes e após a primeira camada. Os resultados podem ser observados na Figura 77.

Figura 77 - Resultados de consistência antes e após a extrusão das camadas



Fonte: A autora.

Na Figura 77 verifica-se um aumento em relação à consistência após a extrusão das argamassas, sendo que em relação à primeira camada extrudada o aumento foi de 10,52% para a arg_HPMC, de 5,22% para a arg_MC_5_HPMC, de 12,44% para a arg_MC_10_HPMC e de 11,5% para a arg_MC_30_HPMC. Estes resultados se justificam possivelmente devido a alterações reológicas ocorridas nos materiais cimentícios aos serem bombeados ocasionando aumento da fluidez e da tensão de escoamento.

A literatura científica aborda que concretos submetidos ao bombeamento apresentam diminuição da viscosidade e aumento da tensão de escoamento devido à alta pressão e taxa de cisalhamento. E que a hidratação cimentícia de forma acelerada e a tixotropia são os principais mecanismos que influenciam a mudança na reologia (LI *et al.*, 2022b).

Constata-se ainda que o aumento da porcentagem de (MC) nas argamassas provocou menores resultados das consistências antes e após a extrusão, sendo este comportamento justificado devido à elevada área superficial e composição química do MC. Estes resultados corroboram com a literatura científica, em que se observou decréscimo na consistência com o aumento da porcentagem de MC e da tensão de escoamento. (BOHUCHVAL *et al.*, 2020).

Kaushik *et al.* (2022) estudaram os efeitos de nanoargilas em misturas cimentícias aplicadas a impressão 3D desenvolvidas cinza volante e fibras basálticas. Os autores observaram redução da consistência conforme o aumento da quantidade de nanoargilas nas misturas, sendo este comportamento justificado devido ao tamanho da partícula de nanoargila, que é menor quando comparada a cinza volante e ao cimento e sua elevada área superficial.

Observa-se que a arg_MC_5_HPMC obteve maiores resultados de consistência nas camadas antes e após a extrusão quando comparada as demais argamassas. Possivelmente, a adição de 5% de MC em substituição a massa de cimento, contribuiu com maior abertura da consistência da argamassa atuando como ‘partícula de rolamento’. E, a partir da adição de 10% o MC atuou como um filer preenchendo os vazios da argamassa, tornando a mistura coesa e por consequência diminuindo a sua consistência.

Rojo-López *et al.* (2022) analisaram os efeitos na reologia em concreto autoadensável desenvolvidos com 15% de MC e 25% de filer calcário, os autores concluíram que houve aumento da viscosidade e redução do volume de vazios da pasta de cimento produzindo um refinamento da estrutura porosa após atividade pozolânica devido ao MC.

Assim, a análise da consistência permitiu observar que houve aumento na consistência das argamassas após serem extrudadas, devido a possíveis alterações na

reologia ocasionadas pelo bombeamento. Além desta análise, torna-se importante verificar a extrudabilidade da primeira camada, para que, desta forma, seja possível verificar descontinuidades e alterações nas larguras em decorrência de diferentes porcentagens de MC.

4.2.3 Análise da extrudabilidade – primeira camada

A análise da extrudabilidade foi realizada após a extrusão da primeira camada das argamassas ensaiadas. O comprimento das camadas foi de 1600 mm para a arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC e de 2400 mm para a arg_MC_30_HPMC. A primeira camada de cada mistura foi analisada no que se refere à continuidade da camada, bordas visíveis e análise dos resultados de coeficiente de variação (CV) obtidas por meio das medidas das larguras. Na Figura 78, tem-se imagens da primeira camada extrudada das argamassas ensaiadas.

Figura 78 - Imagens da primeira camada extrudada das argamassas ensaiadas

arg_HPMC
(400 mm x 400 mm)



arg_MC_5_HPMC
(400 mm x 400 mm)



arg_MC_10_HPMC
(400 mm x 400 mm)



arg_MC_30_HPMC
(600 mm x 600 mm)



Fonte: A autora.

Verifica-se, por meio da Figura 78, a primeira camada extrudada das argamassas *arg_HPMC*, *arg_MC_5_HPMC*, *arg_MC_10_HPMC* e *arg_MC_30_HPMC*. Elas apresentam continuidade e bordas visíveis. Sobre a *arg_MC_30_HPMC*, foram verificados vincos ao longo do comprimento da camada. Este comportamento pode ser justificado devido a maior porcentagem de MC, de 30%, alterar de forma significativa a reologia do material, tornando necessário a adequação dos parâmetros de impressão para minimizar os vincos. Assim, ajustes relacionados à vazão e velocidade poderiam minimizar a ocorrência de vincos e melhorar a qualidade da camada impressa.

Tay; Li e Tan (2019) estudaram os efeitos dos parâmetros de vazão e velocidade em misturas cimentícias e concluíram que misturas impressas com maiores vazões e baixas velocidades podem melhorar a resistência mecânica, porém piorar a qualidade das superfícies das camadas. Por outro lado, baixas vazões e altas velocidades de impressão podem promover descontinuidades nas camadas.

Van der Putten *et al.* (2019) relataram que maior velocidade de impressão promoveu menor rugosidade superficial, e que este efeito se deve à maior energia cinética das partículas de areia e a maior força aplicada, fazendo com que as partículas de areia sejam aprofundadas no material e com isso tem-se uma concentração mais espessa de pasta sob a superfície superior da camada impressa.

Chen *et al.* (2020c) observaram que os parâmetros do sistema de impressão podem interferir na qualidade das camadas impressas, promovendo rupturas superficiais. Isto porque o aumento da porcentagem de HPMC levou ao aumento da tensão de escoamento e de pressão. Assim, foram necessários ajustes nos parâmetros relacionados a vazão e velocidade. sendo que para misturas desenvolvidas com 0,14 e 0,24% de HPMC, a vazão foi de 1,45 L/min e a velocidade de 45mm/s e para mistura com 0,48% de HPMC, a vazão foi de 0,65 L/min e a velocidade de 20 mm/s.

Nesta pesquisa, as argamassas foram desenvolvidas com adição de 0,3% de HPMC e foram impressas na vazão de 2,46 L/min e na velocidade de 50 mm/s, em que pode se concluir que a velocidade de 50 mm/s é considerada baixa para a vazão de 2,46 L/min, e que ajustes relacionados a aumento da velocidade ou menor vazão possivelmente contribuiriam para diminuir os vincos existentes.

Pode-se afirmar que todas as argamassas ensaiadas atenderam aos critérios 1 e 2 da metodologia - Qualidade de Impressão. Considerando o item 3 da metodologia – Qualidade de impressão, as argamassas foram analisadas acerca do coeficiente de variação (CV)

referentes as medidas das larguras. Na Tabela 19, é possível observar as quantidades de medidas que foram realizadas na primeira camada extrudada das argamassas, os resultados obtidos referentes às larguras, alturas, desvios padrões e coeficiente de variação (CV).

Tabela 19 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) da largura e altura da primeira camada das argamassas ensaiadas

Argamassas	Dimensões - objeto extrudado (mm x mm)	Início de extrusão (min)	Fim de extrusão (min)	Número de medidas em cada camada	Medidas - largura (mm)	Medidas - alturas (mm)
arg_HPMC	400 x 400	20'42''	24'58''	6	76,04	41,02
					73,44	41,38
					73,18	43,12
					73,10	37,44
					73,11	41,08
					70,82	41,44
Média (mm)					73,28	40,91
Desvio padrão (mm)					1,51	1,71
Coeficiente de variação (CV) (%)					2,07	4,17
arg_MC_5_HPMC	400 x 400	8'51''	12'18''	6	92	43,38
					91,62	44,81
					89,05	42,63
					94,58	41,3
					94,89	42,6
					97,99	41,8
Média (mm)					93,36	42,75
Desvio padrão (mm)					2,85	1,13
Coeficiente de variação (CV) (%)					3,05	2,65
arg_MC_10_HPMC	400 x 400	18'	22'12''	6	90,42	44,59
					88,35	44,95
					84,9	42,31
					89,7	42,91
					89,74	43,1
					90,15	42,4
Média (mm)					88,88	43,38
Desvio padrão (mm)					1,89	1,03
Coeficiente de variação (CV) (%)					2,13	2,37
arg_MC_30_HPMC	600 x 600	21'13''	25'11''	3	59,3	55,9
					58,45	55,9
					60,8	55,8
Média (mm)					59,52	55,87
Desvio padrão (mm)					0,97	0,05
Coeficiente de variação (CV) (%)					1,63	0,08

Fonte: A autora.

Na Tabela 19 constata-se que foram realizadas 6 medidas nas larguras das argamassas arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e na arg_MC_10_HPMC e 3 medidas na arg_MC_30_HPMC. A diferença no número de medidas realizadas justifica-se pela arg_MC_30_HPMC ter sido ensaiada em relação à extrudabilidade juntamente com o ensaio de construtibilidade - Estudo C.

A respeito dos coeficientes de variação (CV) obtidos referentes às larguras da primeira camada, verifica-se que a arg_MC_5_HPMC possui o maior (CV), de 3,05%, seguida pela arg_MC_10_HPMC com 2,13%, a arg_HPMC com 2,07% e a arg_MC_30_HPMC de 1,63%. Pimenta-Gomes (1985) propuseram uma classificação para o coeficiente de variação (CV), sendo que (CV) abaixo de 10% é considerado como baixo. Assim, conclui-se que houve baixa variabilidade nas medidas da primeira camada.

No que diz respeito às alturas, a arg_HPMC apresentou maior (CV) com 4,17% seguida pela arg_MC_5_HPMC com 2,65% e pela arg_MC_10_HPMC com 1,03% e por último a arg_MC_30_HPMC com 0,08%. Corroborando desta forma com os resultados obtidos nas larguras das camadas, em que houve uma baixa variabilidade.

Após as primeiras camadas terem sido analisadas quanto aos critérios de qualidade da extrudabilidade – continuidade, coesão e (CV) em relação as larguras, os resultados foram organizados na Tabela 20, no intuito de promover uma melhor compreensão da análise do ensaio.

Tabela 20 - Análise dos critérios de extrudabilidade da primeira camada das argamassas ensaiadas

Argamassas ensaiadas	Análise do quesito 1 – Continuidade	Análise quesito 2 – Bordas visíveis	Análise quesito 3 – (CV) da largura da primeira camada (%)
Arg_HPMC	Ok	Ok	2,07
Arg_MC_5_HPMC	Ok	Ok	3,05
Arg_MC_10_HPMC	Ok	Ok	2,13
Arg_MC_30_HPMC	Ok	Ok	1,63

Fonte: A autora.

Na Tabela 20, verifica-se que em relação aos critérios analisados na primeira camada extrudada das argamassas ensaiadas, todas foram consideradas aprovadas em relação aos quesitos 1 - continuidade e 2 - bordas visíveis. E que, em relação ao quesito 3 – Análise do

(CV), a arg_MC_5_HPMC demonstrou maior (CV) em relação às medidas das larguras, sendo de 3,05% e a arg_MC_30_HPMC obteve o menor resultado de (CV), de 1,63%, ambas demonstrando baixa variabilidade dos resultados obtidos. Pode-se afirmar, que em relação a primeira camada, as argamassas demonstraram ser promissoras para serem analisadas quanto a janela de impressão.

4.2.4 Ensaio - janela de impressão

Para a execução do ensaio de janela de impressão, a evolução do tempo ocorreu com pausas de 7 minutos na impressão das camadas para as argamassas arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC, e de forma contínua para a arg_MC_30_HPMC.

O ensaio possibilitou a análise de descontinuidades nas camadas extrudadas ao longo da evolução do tempo. A análise ocorreu de forma visual e por meio dos resultados obtidos em relação ao (CV) das medidas referentes às larguras das camadas extrudadas.

Em relação a largura foram obtidas 6 medidas nas camadas ao longo do comprimento de 1600 mm para a arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC e 3 medidas para as camadas extrudadas ao longo do comprimento de 2400 mm para a arg_MC_30_HPMC.

As camadas extrudadas das argamassas ensaiadas são possíveis de serem visualizadas na Figura 79.

Figura 79 - Camadas extrudadas das argamassas arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC

Arg_HPMC

Primeira camada
(400 mm x 400 mm)



Segunda camada
(400 mm x 400 mm)



Terceira camada
(400 mm x 400 mm)



Quarta camada
(400 mm x 400 mm)



Arg_MC_5_HPMC

Primeira camada
(400 mm x 400 mm)



Segunda camada
(400 mm x 400 mm)



Terceira camada
(400 mm x 400 mm)



Quarta camada
(400 mm x 400 mm)



Arg MC 10 HPMC

Primeira camada
(400 mm x 400 mm)



Segunda camada
(400 mm x 400 mm)



Terceira camada
(400 mm x 400 mm)



Quarta camada
(400 mm x 400 mm)



Arg_MC_30_HPMC

Primeira camada
(600 mm x 600 mm)



Segunda camada
(600 mm x 600 mm)



Terceira camada
(600 mm x 600 mm)



Quarta camada
(600 mm x 600 mm)



Fonte: A autora.

Na Figura 79, observa-se que para as argamassas arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC, arg_MC_10_HPMC foi possível a extrusão das quatro camadas com as pausas de 7 minutos. E, para a argamassa arg_MC_30_HPMC, verificou-se que não foi possível a extrusão completa da quarta camada. Este fato ocorreu devido ao mal posicionamento da mangueira em relação ao bico extrusor. Por conta deste fator, optou-se por realizar a análise da janela de impressão em relação as três primeiras camadas impressas para todas as argamassas.

Conforme os resultados apresentados na Figura 90, pode-se afirmar que as três camadas demonstraram continuidade nas camadas extrudadas ao longo do ensaio de janela de impressão. O aumento da porcentagem de MC, alterou a qualidade da impressão da camada por meio do aparecimento de vincos, mas não promoveu a ruptura na camada em relação a janela de impressão.

E ainda, o aparecimento de vincos ocorreu devido ao aumento do (MC) que possivelmente devido a alterações reológicas, tal como aumento da tensão de escoamento, alterou a qualidade da extrusão pelo equipamento, sendo que ajustes na vazão e velocidade são consideradas alternativas que promoveriam maior qualidade na arg_MC_30_HPMC por meio da minimização dos vincos.

Na literatura científica são relatados ajustes na velocidade e vazão em argamassas impressas com diferentes porcentagens de HPMC devido ao aumento de pressão no

equipamento (CHEN *et al.*, 2020c). Além disso, a substituição de cimento por (MC) promove impactos significativos no comportamento da argamassa, tornando a mistura cimentícia mais seca e com maior dificuldade de ser extrudada (BOHUCHVAL *et al.*; 2020)

Após serem extrudadas, as camadas foram medidas em relação às suas larguras e alturas para que dessa forma pudesse selecionar três argamassas para serem ensaiadas em relação à construtibilidade – Estudo C. As três argamassas foram selecionadas em relação a continuidade, bordas visíveis, menores resultados de (CV) em relação a largura e que sejam consideradas promissoras no aspecto sustentável, ou seja, que contenham maior porcentagem de (MC) e com isso possibilitem minimizar a emissão de CO₂ por meio da substituição do cimento Portland.

Argamassas com menores resultados de (CV) das larguras de suas camadas possivelmente promoverão maior estabilidade, devido ao fato de possuírem menor variabilidade nas medidas de suas larguras e com isso evitarem que a camada posterior ao ser sobreposta tenha diferentes alturas que ao serem acumuladas podem vir a colapsar.

Na tabela 21, são apresentados o tempo de início e fim de extrusão de cada uma das camadas extrudadas, as médias referentes às larguras e às alturas, o desvio padrão e o (CV) em relação às larguras.

Tabela 21 - Resultados do ensaio da janela de impressão

Materiais cimentícios	Dimensões - objeto extrudado (mm x mm)	Início de extrusão (min e segundos)	Fim de extrusão (min e segundos)	Nº da camada	Nº de medidas por cada camada	Média - larguras (mm)	Desvio padrão - larguras (mm)	CV - larguras (%)
arg_HPMC	400 x 400	20'42''	24'58''	1	6	73,3	1,51	2,07
		31'58''	35'58''	2		72,6	3,32	4,57
		42'58''	46'58''	3		78,3	1,91	2,44
arg_MC_5_HPMC	400 x 400	8'51''	12'18''	1	6	93,4	2,85	3,05
		19'18''	23'04''	2		92,0	1,01	1,10
		30'04''	34'59''	3		85,0	3,61	4,24
arg_MC_10_HPMC	400 x 400	18'	22'12''	1	6	88,9	1,89	2,13
		29'12''	33'27''	2		89,7	3,01	3,35
		43'27''	45'55''	3		85,8	2,81	3,27
arg_MC_30_HPMC	600 x 600	21'13''	25'11''	1	3	59,5	0,97	1,63
		25'11''	29'10''	2		53,9	4,16	7,73
		29'10''	33'15''	3		68,9	2,71	3,93

Fonte: A autora.

Observa-se na Tabela 21 que houve variações nas larguras das camadas extrudadas referentes ao diâmetro do bico extrusor, de aproximadamente 23 mm. Pode-se afirmar que

as camadas da arg_MC_30_HPMC foram extrudadas com largura 3 vezes maiores que o diâmetro do bico, enquanto as camadas da arg_HPMC com largura 3,5 vezes maiores e as camadas da arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC com larguras 4,5 vezes maiores.

O aumento nas larguras das camadas justifica-se devido aos parâmetros do equipamento, em que se tem uma elevada vazão, de 2,46 L/min, para uma baixa velocidade de extrusão, de 50 mm/s, acarretando uma maior deposição do material cimentício ao ser extrudado.

A literatura científica relata que é provável que a camada impressa tenha redução da largura, ou mesmo ocorra ruptura, com o aumento da velocidade do bico, e que menor velocidade de deslocamento pode causar maior deposição de material e maior deformação do material (PANDA *et al.*, 2017b; YANG *et al.*, 2023).

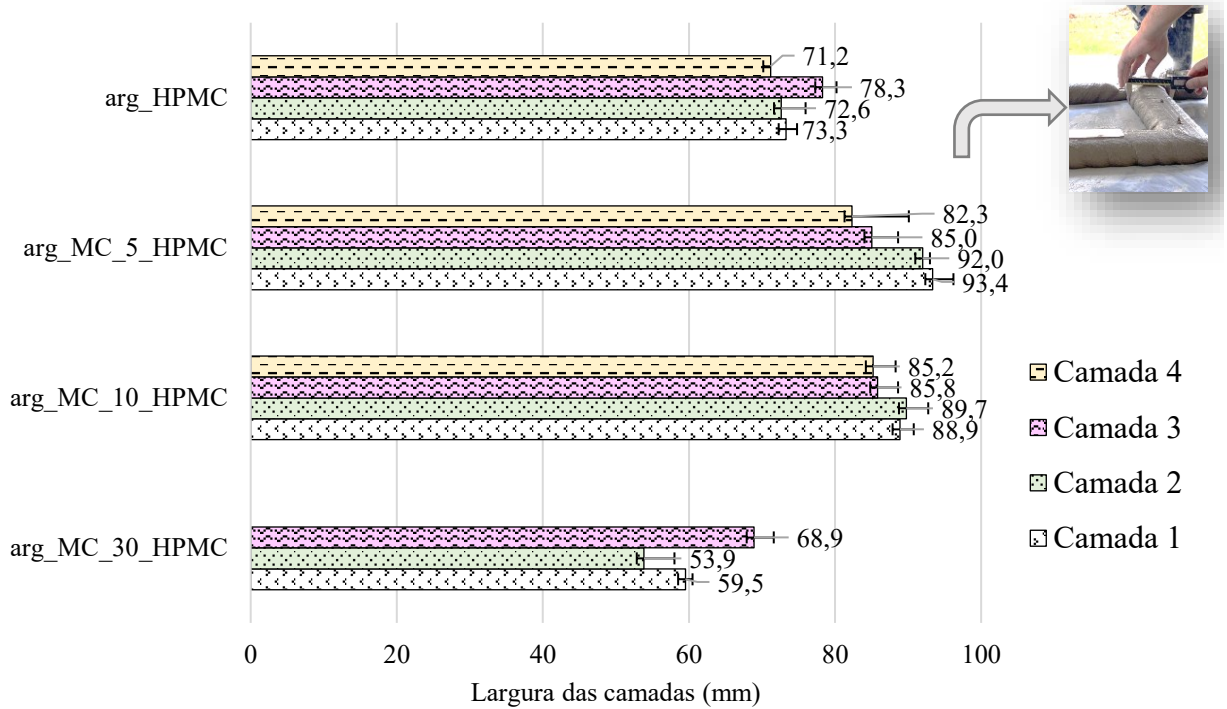
E verifica-se que a arg_MC_5_HPMC apresenta os maiores resultados das medidas das larguras. Estes resultados corroboram com os obtidos na consistência antes e após a extrusão, e são justificados possivelmente pelo (MC) atuar como partícula de rolamento nas argamassas quando adicionado em menores porcentagens.

Em relação aos resultados do coeficiente de variação (CV), verifica-se que o maior (CV) ocorreu na segunda camada da arg_MC_30_HPMC, com o resultado de 7,73%, e o menor (CV) na segunda camada da arg_MC_5_HPMC, com o resultado de 1,10%. E que, a arg_HPMC e a arg_MC_10_HPMC foram as argamassas que obtiveram resultados similares de (CV) na extrusão das três camadas.

Dessa forma, pode-se afirmar todas argamassas ensaiadas apresentarem pouca variabilidade em relação as medidas das larguras nas três camadas extrudadas, demonstrando ser promissoras para serem submetidas ao ensaio de construtibilidade.

Na Figura 80 observa-se as variações ocorridas referente às larguras das camadas extrudadas e suas respectivas argamassas.

Figura 80 - Resultados das médias das larguras das camadas



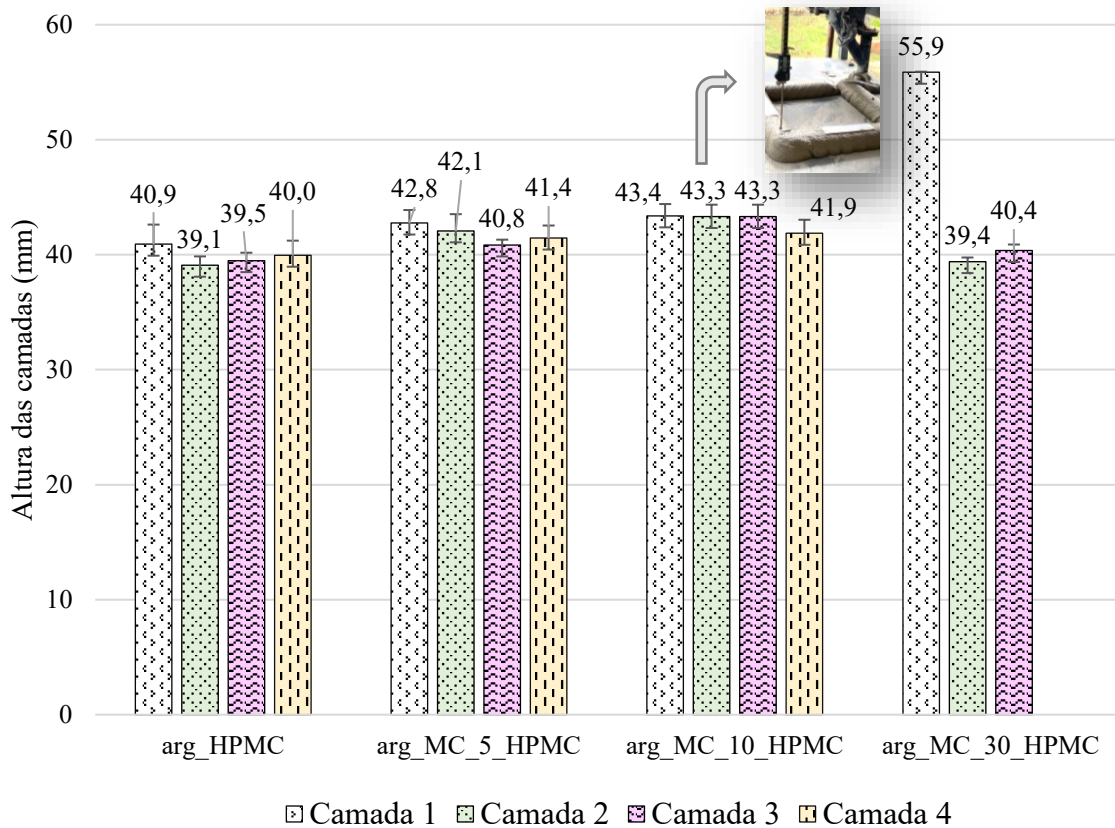
Fonte: A autora.

É possível observar na Figura 80 que, para a arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC, há decréscimo em relação às médias das larguras das quatro camadas extrudadas quando comparadas com a primeira camada. Este comportamento pode ser justificado devido à diminuição de volume de argamassa no sistema de impressão.

Em relação a arg_MC_30_HPMC, verifica-se um aumento da largura da camada 2, de 53,9 mm e para a largura da camada 3, de 68,9 mm. Este aumento considerável deve-se provavelmente ao aumento da porcentagem de (MC) que aumentou a tensão de escoamento e ocasionou problemas no bombeamento, e que colaborou com falha na extrusão da quarta camada.

Após serem medidas as larguras das camadas impressas foram obtidas as médias das alturas, conforme pode ser visualizado na Figura 81.

Figura 81 - Resultados das médias das alturas das camadas



Fonte: A autora.

É possível verificar, por meio da Figura 81, que a média das alturas das argamassas ensaiadas foram aproximadamente 2 vezes maiores que o diâmetro do bico extrusor, de 23 mm. Os resultados obtidos são referentes à altura pré fixada no equipamento de impressão 3D, que possibilitou a extrusão da camada sem comprimi-la e por consequência deformá-la.

A literatura aborda que menores distâncias entre o bico e a camada podem causar compressão na camada recém extrudada e com isso levar a cargas adicionais na superfície da argamassa em estado fresco. Consequentemente, uma distância inadequada do bico pode levar a instabilidade. (WOLFS *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2023).

Após serem analisadas as médias referentes das medidas das larguras e alturas das camadas extrudadas, os resultados obtidos em relação aos (CV) das larguras das quatro camadas extrudadas foram organizados de forma crescente para facilitar a análise e posteriormente a seleção das argamassas a serem submetidas aos ensaios no Estudo C – Construtibilidade e apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Coeficiente de variação (CV) da primeira camada das argamassas ensaiadas em ordem crescente

Materiais cimentícios	Nº da camada	Média - medidas das larguras (mm)	Desvio padrão – medidas das larguras (mm)	CV – Medidas das larguras (%)
arg_MC_30_HPMC	1	59,5	0,97	1,63
arg_HPMC		73,3	1,51	2,07
arg_MC_10_HPMC		88,9	1,89	2,13
arg_MC_5_HPMC		93,4	2,85	3,05
arg_MC_5_HPMC	2	92,0	1,01	1,10
arg_MC_10_HPMC		89,7	3,01	3,35
arg_HPMC		72,6	3,32	4,57
arg_MC_30_HPMC		53,9	4,16	7,73
arg_HPMC	3	78,3	1,91	2,44
arg_MC_10_HPMC		85,8	2,81	3,27
arg_MC_30_HPMC		68,9	2,71	3,93
arg_MC_5_HPMC		85,0	3,61	4,24

Fonte: A autora.

Na Tabela 22 verifica-se, em ordem crescente, os desvios padrões e (CV) em relação às medidas obtidas das larguras das três primeiras camadas extrudadas de cada uma das argamassas.

Em relação às três camadas impressas e aos resultados obtidos de (CV) na primeira camada extrudada, a argamassa com menor (CV) foi a arg_MC_30_HPMC, com 1,63% e a com maior a arg_MC_5_HPMC, com 3,05%. Estes dados demonstram que a arg_MC_30_HPMC teve menores dispersões dos resultados quanto às medidas das larguras e que menores variações podem significar maior capacidade de sobreposição das camadas extrudadas devido a promover estabilidade ao serem sobrepostas.

Em relação aos resultados obtidos de (CV) da segunda camada extrudada, a argamassa com menor (CV) foi a arg_MC_5_HPMC, com 1,10% e a com maior a arg_MC_30_HPMC, com 7,73%. E para a terceira camada, a argamassa arg_HPMC teve o menor (CV), de 2,44% e a arg_MC_5_HPMC o maior com 4,24%.

Verifica-se que as três camadas analisadas possuem resultados de coeficiente de variação (CV) baixos, sendo estes menores que 10%, demonstrando pouca variabilidade dos resultados obtidos para todas as argamassas. Assim, para os ensaios do Estudo C, selecionou-se as argamassas arg_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC devido a estas apresentaram continuidade nas camadas extrudadas e bordas visíveis.

A arg_MC_5_HPMC não foi selecionada devido a esta argamassa possuir resultados aproximados ao da arg_MC_10_HPMC, em relação ao tempo de início e fim de pega. E ainda, pela arg_MC_10_HPMC possuir maior percentual de (MC) em substituição ao cimento, sendo dessa forma, considerada promissora em relação a sustentabilidade, devido ao processo produtivo de calcinação do (MC) ser com temperaturas menores quando comparado ao do cimento Portland e com isso emitir menores quantidades de CO₂.

4.2.5 Considerações parciais Estudo B

Pode-se concluir com base nos resultados obtidos no Estudo B que houve aumento nas relações água/cimentícios à medida que se aumenta a porcentagem de substituição de MC, variando de 0,372 para a arg_HPMC a 0,419 para a arg_MC_30_HPMC, corroborando com os resultados obtidos de consistência normal do Estudo A.

Verificou-se que a capacidade máxima de extrusão em número de camadas quanto ao volume do misturador, de 90 litros, é de quatro camadas por argamassa ensaiada. Já referente ao tempo de extrusão para as camadas de 1600 mm de comprimento (arg_HPMC, arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC) e de 2400 mm (arg_MC_30_HPMC) foi de aproximadamente 4 minutos, para uma vazão de 2,46 L/min e uma velocidade de 50 mm/s.

No ensaio de janela de impressão, foi observado que as argamassas arg_HPMC e arg_MC_10_HPMC obtiveram resultados próximos de tempo final de extrusão de quatro camadas, incluindo as pausas de 7 minutos, sendo de 57 minutos e 59 segundos e de 57 minutos e 2 segundos, respectivamente. Pode-se concluir que é possível a extrusão de até quatro camadas pelo maquinário de impressão 3D utilizado nesta pesquisa, com o tempo aproximado de 1 hora.

As primeiras camadas extrudadas das argamassas ensaiadas foram analisadas quanto à extrudabilidade nos quesitos referentes a continuidade, bordas visíveis e coeficiente de variação (CV). A primeira camada das argamassas ensaiadas demonstrou ter continuidade, coesão e bordas visíveis.

A respeito do (CV) referente a largura da primeira camada, a arg_MC_5_HPMC obteve o maior (CV), sendo de 3,05% e a arg_MC_30_HPMC o menor (CV), de 1,63%. Assim, pode-se afirmar que todas as argamassas possuíram baixa variabilidade nas medidas

referentes à largura da primeira camada, sendo consideradas promissoras para serem ensaiadas em relação a janela de impressão.

Em relação ao ensaio de janela de impressão, foi verificado problemas no bombeamento e na extrusão, por meio do mau posicionamento da mangueira no bico ao ser extrudada a quarta camada da arg_MC_30_HPMC, e com isso optou-se por ser analisada a janela de impressão das três camadas extrudadas para todas as argamassas ensaiadas. Em que, foi verificado continuidade e bordas visíveis para todas as camadas extrudadas.

O aumento da porcentagem de (MC) provocou vincos nas camadas extrudadas, sendo as camadas da arg_MC_30_HPMC com maior predominância de vincos e as camadas da arg_HPMC com menor. Este comportamento pode ser justificado devido ao (MC) alterar a reologia das argamassas no que concerne à viscosidade e tensão de escoamento. Dessa forma, são necessários ajustes no equipamento relacionado a vazão e velocidade.

Em comparação às médias das larguras das camadas e o diâmetro do bico, a arg_MC_30_HPMC obteve resultados 3 vezes maiores, a arg_HPMC 3,5 vezes maiores e as arg_MC_5_HPMC e arg_MC_10_HPMC 4,5 vezes maiores. Sendo que o aumento nas larguras das camadas justifica-se devido aos parâmetros do equipamento, em que se tem uma elevada vazão, de 2,46 L/min, para uma baixa velocidade de extrusão, de 50 mm/s, acarretando uma maior deposição do material cimentício ao ser extrudado.

E, verifica-se que em relação aos resultados de (CV) das larguras das três camadas extrudadas das argamassas ensaiadas, para todas as argamassas foram obtidos resultados de (CV) abaixo de 10%, demonstrando uma baixa variabilidade nos resultados.

Por fim, as argamassas arg_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC foram selecionadas para os ensaios no Estudo C – construtibilidade. A escolha deve-se ao fato das argamassas terem apresentado continuidade e coesão nas camadas, bordas visíveis, (CV) menores que 10%, demonstrando assim, pouca variabilidade nas dimensões das larguras e por possuírem maior porcentagem de (MC) quando comparadas a arg_MC_5_HPMC, sendo desta forma, consideradas promissoras em relação a sustentabilidade.

4.3 ESTUDO C

O estudo C teve como principal objetivo analisar a construtibilidade em argamassas consideradas extrudáveis pelo Estudo B. Este estudo foi realizado nas argamassas arg_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC. A arg_MC_5_HPMC não foi ensaiada pois optou-se por argamassas com maiores porcentagens de MC por serem mais sustentáveis e por se demonstrarem promissoras em relação aos resultados de extrudabilidade e janela de impressão obtidos no Estudo B.

As argamassas foram caracterizadas por meio dos ensaios de consistência e de densidade de massa. O ensaio de densidade de massa justifica-se pelo aumento do índice de consistência observado no estudo B, em decorrência do processo de bombeamento e extrusão das argamassas.

Após serem caracterizadas as argamassas foram submetidas ao ensaio de construtibilidade e sobreposição de camadas para análise de sua deformação. A quantidade de camadas sobrepostas foi definida devido a dois fatores: (1) capacidade máxima de extrusão de camadas em relação ao volume nominal do equipamento de impressão 3D (90 litros) e (2) à altura limitante do equipamento no eixo y.

Na tabela 23 é possível observar os resultados de relação água/cimentícios das três argamassas ensaiadas do Estudo C.

Tabela 23 - Relações água/cimentícios das argamassas ensaiadas

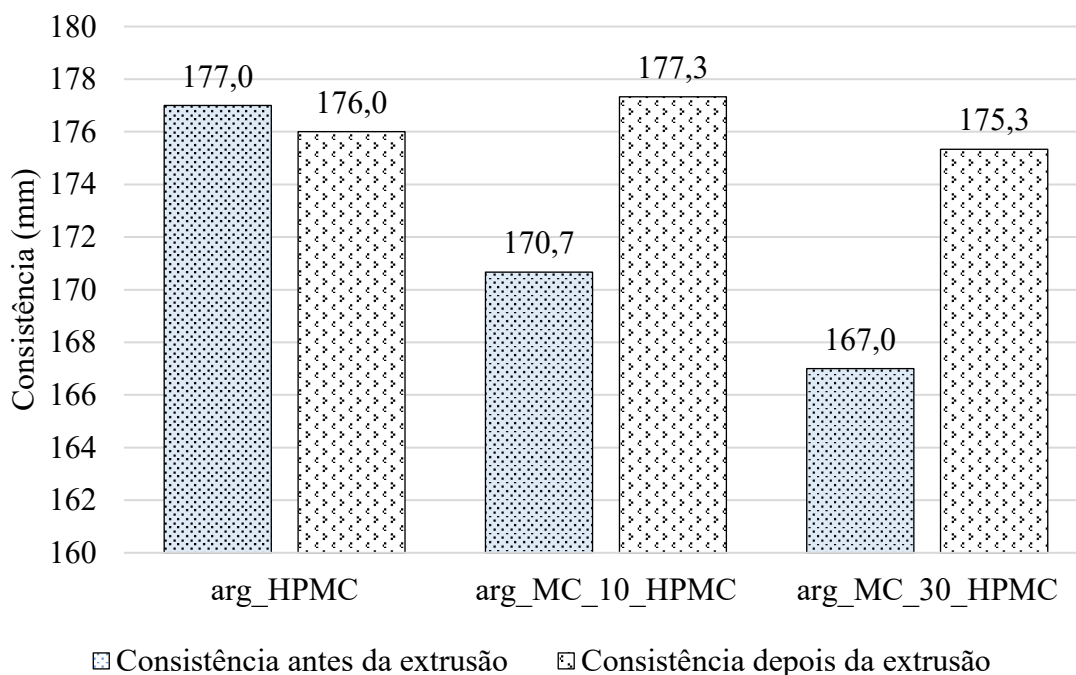
Argamassas	Relações água/cimentícios
arg_HPMC	0,367
arg_MC_10_HPMC	0,375
arg_MC_30_HPMC	0,431

Fonte: A autora.

Na tabela 23 verifica-se que dentre as argamassas ensaiadas, a arg_HPMC obteve o menor resultado de relação água/cimentício, sendo de 0,367. E que, conforme o aumento da porcentagem de MC, observa-se aumento das relações água/cimentícios, com resultados de 0,375 para a arg_MC_10_HPMC e 0,431 para a arg_MC_30_HPMC. Estes resultados corroboram com o comportamento observado no Estudo A – ensaio de consistência normal em pastas e no Estudo B – ensaio de extrudabilidade em argamassas.

Após a definição das relações água/cimentícios de cada uma das argamassas, estas foram caracterizadas em relação a consistência e a densidade de massa antes e após a extrusão das camadas. Os resultados de consistência das argamassas ensaiadas são apresentados na Figura 82.

Figura 82 - Resultados de consistência antes e após extrusão das argamassas



Fonte: A autora.

Verifica-se na Figura 82 que houve aumento da consistência nas argamassas após a extrusão, e que este se deu conforme o aumento da porcentagem de MC, sendo de 3,86% para a arg_MC_10_HPMC e de 4,97% para a arg_MC_30_HPMC, e que para a arg_HPMC não houve alterações significativas na consistência antes e após a extrusão, demonstrando que para nesta argamassa a incorporação do HPMC não foi influenciada pelo processo de bombeamento e extrusão.

Com base nestes resultados, é possível concluir que as argamassas com adição de MC são mais suscetíveis a alterações na consistência devido ao bombeamento, este comportamento é devido ao MC alterar as características reológicas de tensão de escoamento e de viscosidade quando adicionado em materiais cimentícios (HOU *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2020a).

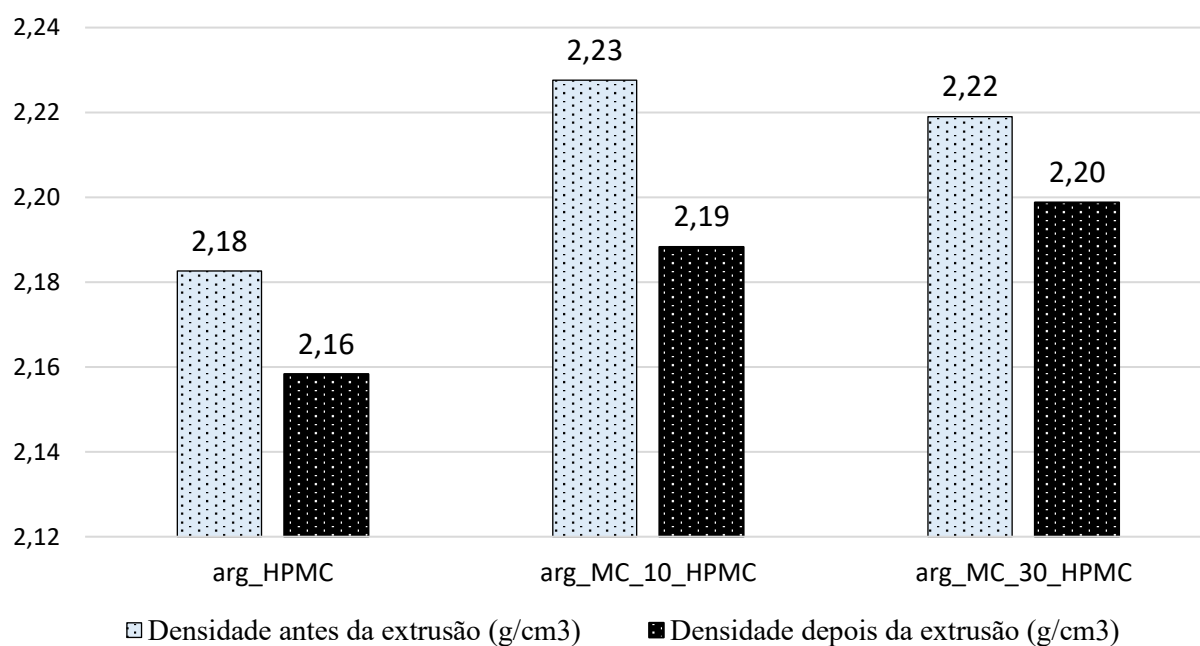
Liu *et al.* (2022) estudaram os efeitos da adição de MC em materiais cimentícios e observaram que conforme o aumento de MC (5% para 20%) a consistência diminui 2,4 a 48,8%, a tensão de escoamento aumenta de 5,1 a 234,2% e a viscosidade de 1,2 a 661,3% demonstrando relação entre a consistência e as propriedades reológicas.

Assim, a consistência pode estar relacionada com as propriedades reológicas de tensão de escoamento, viscosidade e fluidez, sendo que o maior resultado de consistência, de 177,3 mm, da arg_MC_10_HPMC, indica que esta argamassa possui maior fluidez quando comparada as demais argamassas ensaiadas, e com isso, pode ser considerada promissora em relação a extrudabilidade.

Em relação a arg_MC_30_HPMC verifica-se menor resultado de consistência, de 175,3 mm. Este resultado justifica-se devido à elevada área superficial do MC, que demanda maior quantidade de água livre e pelo mecanismo de floculação ocasionado pela menor distância entre partículas. Por um lado, menores resultados de consistência, podem indicar materiais potencialmente construtivos, e por outro lado podem estar relacionados a elevadas tensões de escoamento, exigindo adequações no maquinário para a extrusão.

De forma simultânea ao ensaio de consistência, foram coletadas amostras das argamassas para serem caracterizadas quanto a densidade de massa, em que os resultados são apresentados na Figura 83.

Figura 83 - Resultados de densidade de massa antes e após extrusão das argamassas



Fonte: A autora.

Na Figura 83 verifica-se que para todas as argamassas ensaiadas o bombeamento não promoveu alterações significativas em relação aos resultados de densidade de massa antes e após a extrusão. E que, após serem extrudadas os resultados foram de $2,16 \text{ g/cm}^3$ para a arg_HPMC, de $2,19 \text{ g/cm}^3$ para a arg_MC_10_HPMC e $2,20 \text{ g/cm}^3$ para a arg_MC_30_HPMC, em que é possível concluir que a arg_HPMC é considerada a argamassa menos densa. Estes resultados corroboram com os apresentados no Estudo A.

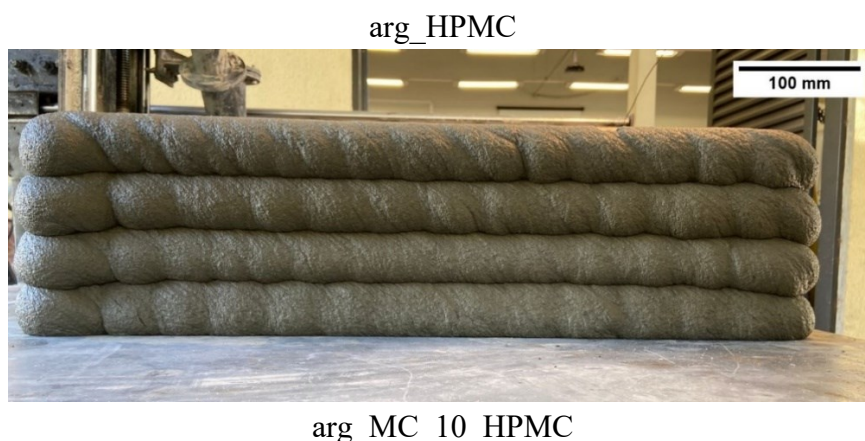
Menores resultados de densidade deve se ao fato de que ao ser adicionado em materiais cimentícios, o HPMC altera a reologia devido a formação do filme coloidal, coloidal, promovendo aumento de viscosidade e tensão de escoamento, e atua como um retentor, que diminui a quantidade de água na mistura cimentícia e consequentemente a densidade de massa.

Materiais cimentícios menos densos são considerados promissores para aplicação em impressão 3D, pois ao serem extrudados possibilitaram menores deformações nas camadas anteriores, afetando a construtibilidade, por meio de maior capacidade de sobreposição de camadas.

4.3.1 Construtibilidade em argamassas

Após serem caracterizadas em relação a consistência e densidade de massa, as argamassas foram ensaiadas em relação a construtibilidade, em que foi analisada a capacidade máxima de sobreposição das camadas (sólido 3D). Os resultados são apresentados na Figura 84.

Figura 84 - Resultados - ensaio de construtibilidade





arg_MC_30_HPMC



Fonte: A autora.

Verifica-se por meio da Figura 84, que as argamassas arg_HPMC e arg_MC_10_HPMC foram capazes de sobrepor quatro camadas, sendo este o limite máximo do equipamento em relação à altura e volume do misturador (90 litros). Além disso, observa-se que as camadas se apresentaram contínuas, e que este resultado pode contribuir com a estabilidade do sólido 3D.

Com relação a arg_MC_30_HPMC, esta foi capaz de sobrepor três camadas, devido a falha operacional no maquinário. Para que o processo de extrusão ocorra sem interrupções, é necessário que a mangueira esteja posicionada de forma vertical, pois qualquer inclinação, acarreta perda de material no encaixe da mangueira com o bico extrusor, comprometendo a extrusão da camada. Dessa forma, na arg_MC_30_HPMC houve inclinação na mangueira que comprometeu a extrusão da quarta camada.

Em relação a qualidade da camada extrudada da arg_MC_30_HPMC, é notória a maior predominância de vincos quando comparada as demais argamassas. Este aspecto se justifica devido a alterações reológicas ocorridas pela adição de MC tornando necessário para melhor qualidade de extrusão, ajustes no equipamento de impressão 3D, tais como aumento da velocidade.

De acordo com Raval e Patel (2022) a velocidade de impressão máxima deve ter um bombeamento ideal (constante e uniforme) de forma a não comprometer a qualidade de impressão da camada em um período de tempo mínimo. E ainda, Chen *et al.* (2020c) observaram que os parâmetros do sistema de impressão podem interferir na qualidade das camadas impressas, sendo necessário ajustes para que se tenha camadas sem rupturas superficiais.

Após serem analisadas de forma visual, as camadas foram medidas em relação as larguras e alturas, para que fossem verificadas alterações ocorridas após a extrusão. Na Tabela 24 é possível observar o tempo de execução de cada uma das argamassas e suas respectivas medidas.

Tabela 24 - Construtibilidade (600 x 600 mm)

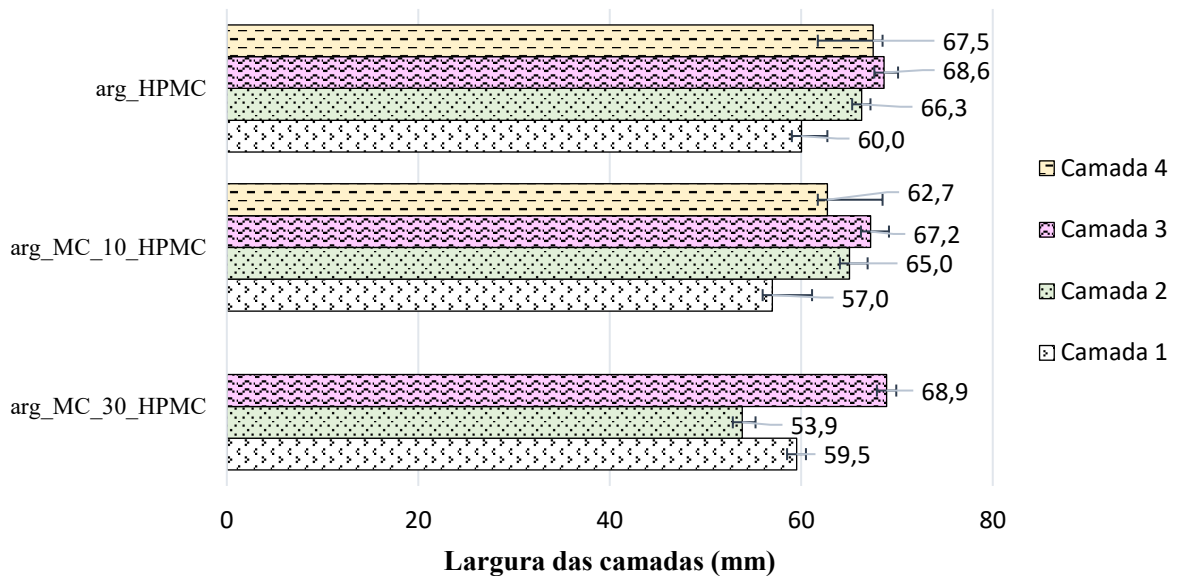
Argamassas	Tempo início de extrusão (min.)	Tempo final de extrusão (min.)	Nº da camada	Média largura (mm)	Média altura (mm)	Desvio padrão largura (mm)	CV da largura (%)	Desvio padrão altura (mm)	CV da altura (%)
arg_HPMC	16'04''	31'56''	1	60,01	53,15	1,02	1,70	1,04	1,95
			2	66,31	43,77	1,93	2,90	1,64	3,75
			3	68,63	38,57	1,47	2,15	0,56	1,44
			4	67,5	40,28	2,54	3,76	1,68	4,16
arg_MC_10_HPMC	18'25''	34'13''	1	56,96	54,23	1,37	2,41	0,62	1,15
			2	65,03	40,78	1,90	2,92	1,21	2,98
			3	67,23	40,70	0,91	1,35	0,71	1,75
			4	62,71	38,03	2,88	4,59	1,52	3,99
arg_MC_30_HPMC	21'13''	37'13''	1	59,51	55,86	0,97	1,63	0,05	0,08
			2	53,85	39,40	4,16	7,72	0,36	0,90
			3	68,90	40,37	2,71	3,93	0,52	1,28

Fonte: A autora.

Na Tabela 24 verifica-se que os tempos de início para a extrusão entre as argamassas ensaiadas foram de 16 minutos e 4 segundos para a arg_HPMC, de 18 minutos e 25 segundos para a arg_MC_10_HPMC e de 21 minutos e 13 segundos para a arg_MC_30_HPMC. As diferenças dos tempos de início são em decorrência do bombeamento e da análise visual da argamassa, pelo teste da mão, para que fosse considerada apta para extrusão.

Na Figura 85 observa-se os resultados referentes as larguras das camadas das argamassas ensaiadas.

Figura 85 - Largura das camadas (n=4 para a arg_HPMC e arg_MC_10_HPMC e n=3 para a arg_MC_30_HPMC)



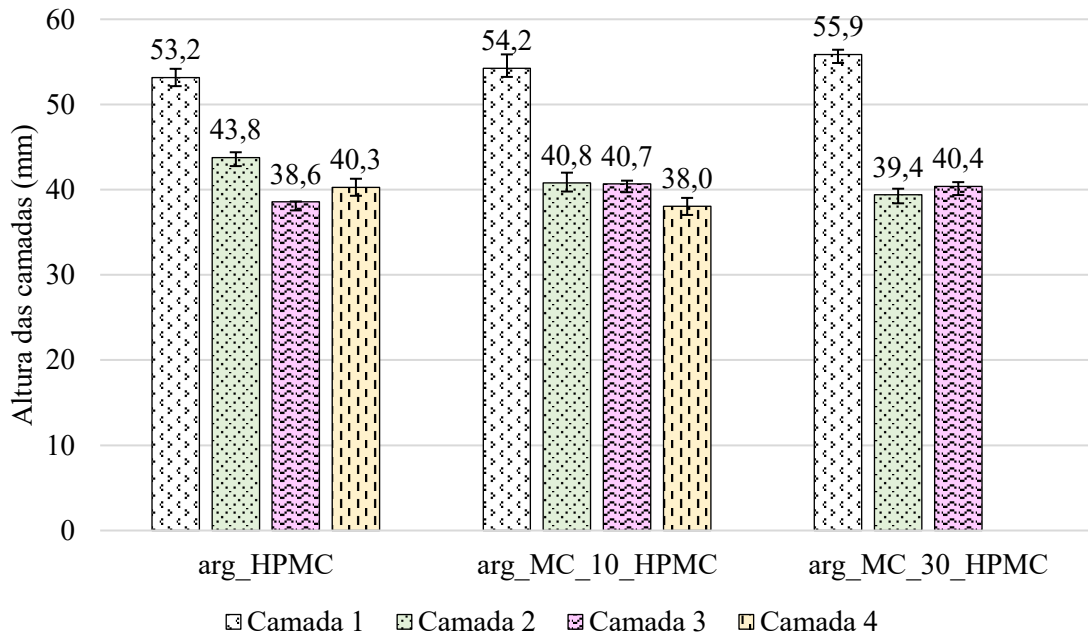
Fonte: A autora.

Observa-se que em relação a largura da primeira camada, a arg_HPMC obteve resultado de 60 mm, a arg_MC_10_HPMC de 57 mm e a arg_MC_30_HPMC, de 59,5 mm. É possível afirmar que entre os resultados obtidos não houve alterações significativas, porém em relação ao diâmetro do bico extrusor, estes são cerca de 2,6 vezes maiores. Este aumento deve-se a baixa velocidade do maquinário (50 mm/s) em relação a sua vazão (2,46 L/min) possibilitando que ao ser extrudada, a argamassa aumente a largura das camadas.

Verifica-se ainda um comportamento característico da largura das camadas em função da extrusão do equipamento, em que as terceiras camadas extrudadas possuem os maiores resultados, de 68,6 mm para a arg_HPMC, de 67,2 mm para a arg_MC_10_HPMC e de 68,9 mm para a arg_MC_30_HPMC quando comparada as demais camadas. Estes resultados podem ser justificados devido a mangueira já estar lubrificada e com isso não haver perda de material ao ser extrudado.

Os resultados obtidos das alturas das camadas podem ser observados na Figura 86.

Figura 86 - Altura das camadas (n=4 para a arg_HPMC e arg_MC_10_HPMC e n=3 para a arg_MC_30_HPMC)



Fonte: A autora.

Na Figura 86 observa-se, que para todas as argamassas, as maiores alturas são referentes as primeiras camadas, sendo que, ao se comparar com as alturas das segundas camadas, tem-se uma diferença de 9,4 mm para a arg_HPMC, de 13,4 mm para a arg_MC_10_HPMC e de 16,5 mm para a arg_MC_30_HPMC. Possivelmente estes resultados são ocasionados pelos parâmetros do maquinário, de bombeamento e extrusão, que interferem na quantidade do material extrudado em cada camada.

Por fim, verifica-se que a arg_MC_30_HPMC sofreu maiores variações entre as medidas de suas camadas, obtendo a maior diferença da altura da primeira para a segunda camada, com 16,5 mm. Esta diferença decorre da maior predominância de vincos e alterações reológicas provocadas pela maior porcentagem de MC, quando comparada as demais argamassas, demonstrando ser necessário, adequações no maquinário em relação a parâmetros de extrusão (velocidade e vazão) para melhor qualidade na camada.

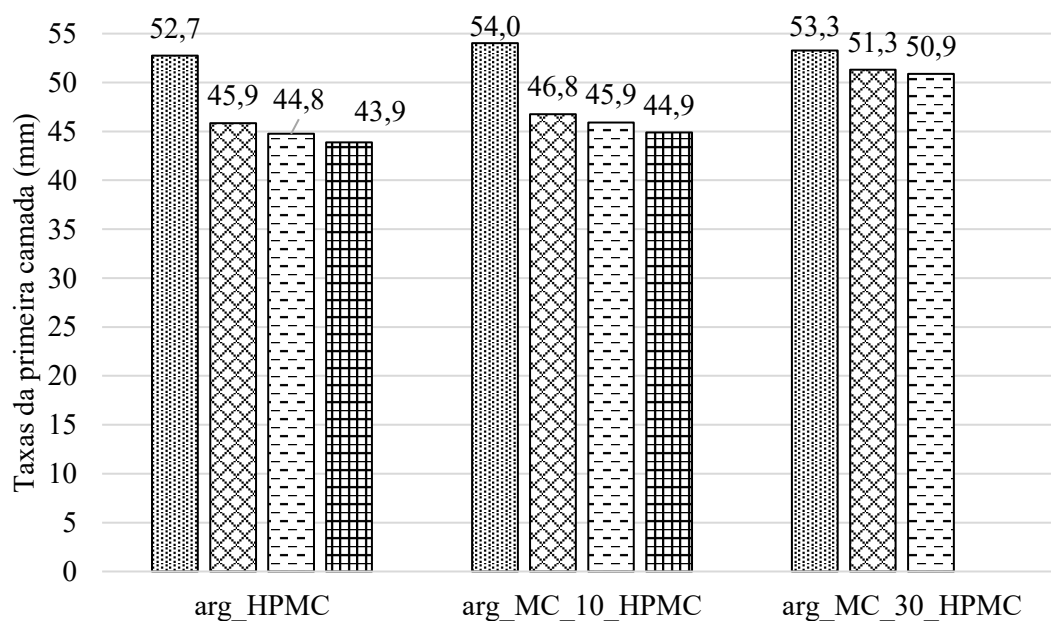
4.3.2 Análise da deformação de camadas por meio do processamento de imagens

A análise da taxa de deformação, em milímetros, foi realizada por meio do processamento de imagens no software Image J, nas camadas descritas a seguir:

- Primeira camada extrudada antes e após a sobreposição da segunda, terceira e quarta camada,
- Segunda camada extrudada antes e após a sobreposição da terceira e quarta camada,
- Terceira camada extrudada antes e após a extrusão da quarta camada.

As taxas de deformação foram obtidas na região central das camadas, sendo que para isso foram calculadas as áreas em função do comprimento de 400 mm, e posteriormente as taxas de deformações. Na Figura 87 tem-se os resultados das taxas de deformações da primeira camada extrudada das argamassas ensaiadas.

Figura 87 - Resultados - taxas de deformação da primeira camada das argamassas ensaiadas



- ▣ Taxa sem a sobreposição das camadas (mm)
- ▤ Taxa após a sobreposição da segunda camada (mm)
- ▥ Taxa após a sobreposição da terceira camada (mm)
- ▧ Taxa após a sobreposição da quarta camada (mm)

Fonte: A autora.

Verifica-se na Figura 87, que houve um decréscimo da taxa ao se sobrepor a segunda camada, sendo de 6,8 mm para a arg_HPMC, 7,2 mm para a arg_MC_10_HPMC e de 2 mm para a arg_MC_30_HPMC. Em que, pode-se afirmar que o aumento da porcentagem de MC promoveu menores deformações, isto deve-se ao fato de o MC promover alterações na tixotropia dos materiais cimentícios, minimizando deformações nas camadas (MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2020; BEIGH *et al.* 2019).

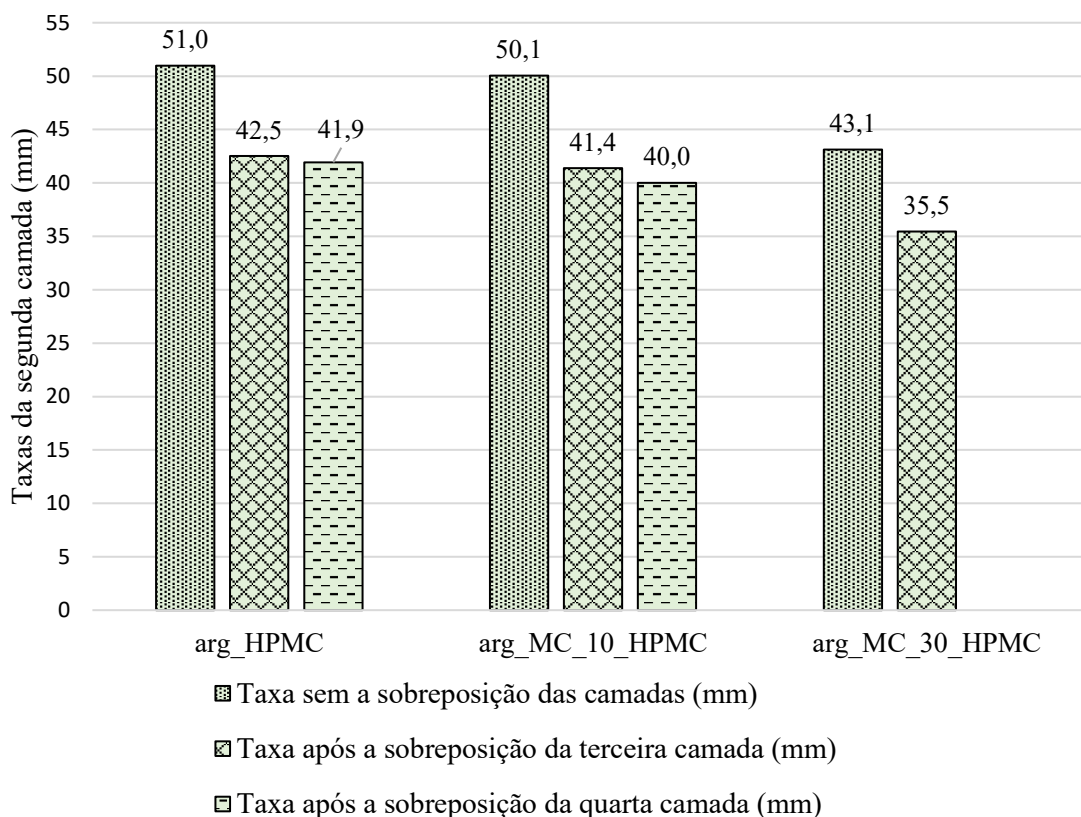
Ao se sobrepor a terceira camada, observa-se um decréscimo de taxa de 7,9 mm para a arg_HPMC, de 8,1 mm para a arg_MC_10_HPMC e de 2,4mm para a arg_MC_30_HPMC em relação a primeira camada sem sobreposição. Verifica-se que para todas as primeiras camadas das argamassas ensaiadas as deformações foram menores quando comparadas as deformações ao se sobrepor a segunda camada.

Este fato pode ser justificado devido a terceira camada ser extrudada posteriormente a segunda, possibilitando maior ganho de resistência inicial devido ao maior tempo para que as reações químicas sejam intensificadas nas argamassas. Resultados aproximados foram obtidos ao serem sobrepostas as quartas camadas, sendo de 8,8 mm para a arg_HPMC e de 9,1 mm para a arg_MC_10_HPMC. Dessa forma, é possível concluir que com a evolução do tempo, o ganho de resistência em estado fresco das argamassas evolui, minimizando deformações.

É importante ressaltar que no ensaio de construtibilidade desta pesquisa, as camadas foram extrudadas sem janela de impressão, ou seja, em cenário desfavorável e diferente do que apresenta na literatura em que se tem evolução da taxa de estruturação (ALBAR *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2020.a; MA; LI e WANG, 2018; KAZEMIAN *et al.*, 2017).

Após a primeira camada ser analisada das argamassas ensaiadas, foram obtidas as taxas de deformação das segundas camadas, antes e após a sobreposição das terceiras e quartas camadas, os resultados são apresentados na Figura 88.

Figura 88 - Resultados da taxa de deformação da segunda camada



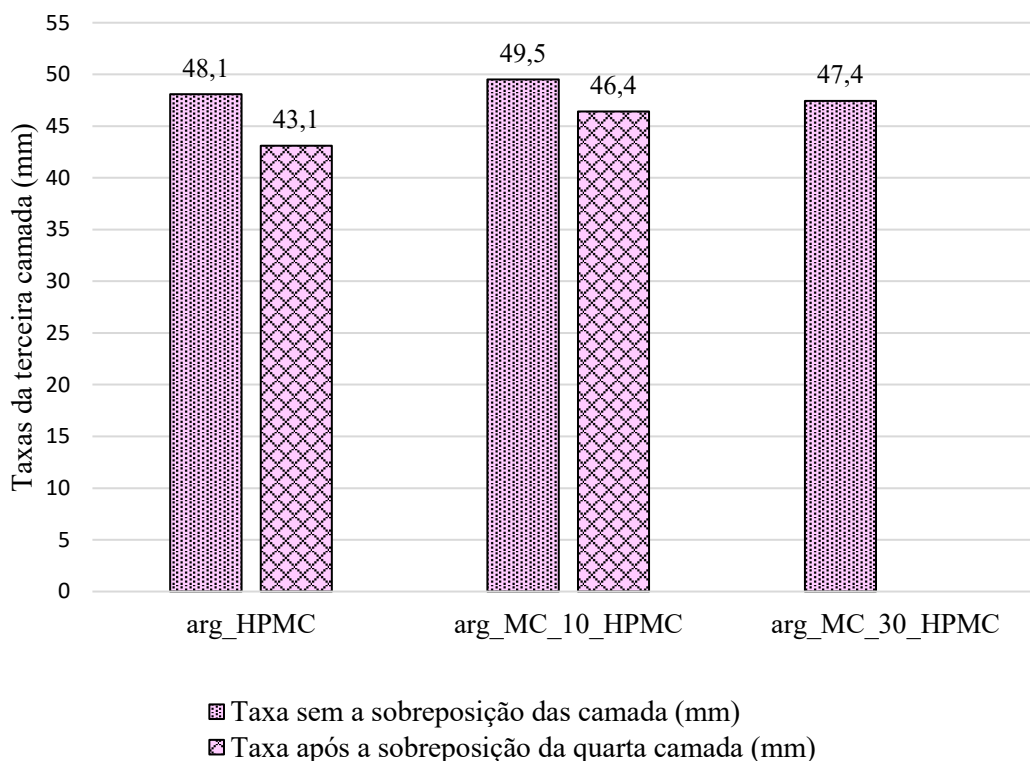
Fonte: A autora.

Na Figura 88 é possível observar um comportamento de decréscimo das taxas de deformação nas argamassas ensaiadas conforme a sobreposição das terceiras e quartas camadas, e que maiores resultados são encontrados após a sobreposição da terceira camada, sendo de 8,5 mm para a arg_HPMC, 8,7 mm para a arg_MC_10_HPMC e de 7,6 mm para a arg_MC_30_HPMC. Estes resultados corroboram com o comportamento das primeiras camadas, em que maiores porcentagens de MC minimizaram as deformações ocorridas.

Em relação a sobreposição das quartas camadas, verifica-se um decréscimo da taxa de deformação de 9,1 mm para a arg_HPMC e de 10,1 para a arg_MC_10_HPMC em relação à taxa sem a sobreposição das camadas. Estes resultados demonstram que maiores deformações nas camadas são ocasionadas após a sobreposição da terceira camada, corroborando com a análise de que a evolução da taxa de estruturação está relacionada a maiores tempos após a camada ser extrudada.

De forma sequencial foram analisados os resultados de taxas de deformação das terceiras camadas ensaiadas e apresentados na Figura 89.

Figura 89 - Resultados - Taxa de deformação da terceira camada



Fonte: A autora.

É possível verificar na Figura 89 que diferentemente das demais argamassas ensaiadas a arg_30_MC_HPMC não apresenta resultado de taxa de deformação, devido a quarta camada não ter sido extrudada pela operação do maquinário e mau posicionamento da mangueira no bico já justificados anteriormente.

Observa-se que em relação a terceira camada, houve decréscimo da taxa de extrusão de 5 mm para a arg_HPMC e de 3,1 mm para a arg_MC_10_HPMC quando comparada a camada sem a sobreposição. É possível concluir que houve menores resultados de taxa de deformação na terceira camada quando comparada as demais camadas analisadas anteriormente, sendo este comportamento justificado devido a evolução do ganho de resistência em função da terceira camada ser extrudada posteriormente as anteriores (aproximadamente 8 minutos), e ainda, que a terceira possui menor altura quando comparada as demais e por consequência provoca menores deformações.

Dessa forma, foram analisadas as taxas de deformação em relação as três camadas extrudadas antes e após a sobreposição. Na tabela 25 são apresentados todos os resultados obtidos em relação as taxas de deformação das camadas de todas as argamassas ensaiadas.

Tabela 25 - Resultados das taxas de deformação das camadas extrudadas

Argamassas	N. camada	Taxa antes da sobreposição (mm)	Taxa após sobreposição da segunda camada (mm)	Taxa após a sobreposição da terceira camada (mm)	Taxa após a sobreposição da quarta camada (mm)
arg_HPMC	1	52,75	45,86	44,76	43,89
arg_MC_10_HPMC		54,04	46,76	45,92	44,88
arg_MC_30_HPMC		53,28	51,32	50,89	-
arg_HPMC	2	50,99	-	42,52	41,94
arg_MC_10_HPMC		50,05	-	41,39	40,02
arg_MC_30_HPMC		43,12	-	35,45	-
arg_HPMC	3	48,08	-	-	43,11
arg_MC_10_HPMC		49,51	-	-	46,41
arg_MC_30_HPMC		47,43	-	-	-

Fonte: A autora.

Verifica-se que os maiores resultados das taxas de deformação ocorrem nas primeiras camadas após a sobreposição das segundas, devido a estas, quando comparadas as demais camadas, serem extrudadas em menor tempo decorrido desde a extrusão do material. Isto também se confirmou pelos menores resultados obtidos de taxas de deformação nas demais camadas. Assim, é possível concluir que a janela de impressão pode contribuir com menores deformações e por consequência influenciar na estabilidade em objetos impressos em 3D.

4.3.3. Análise da umidade superficial por termografia

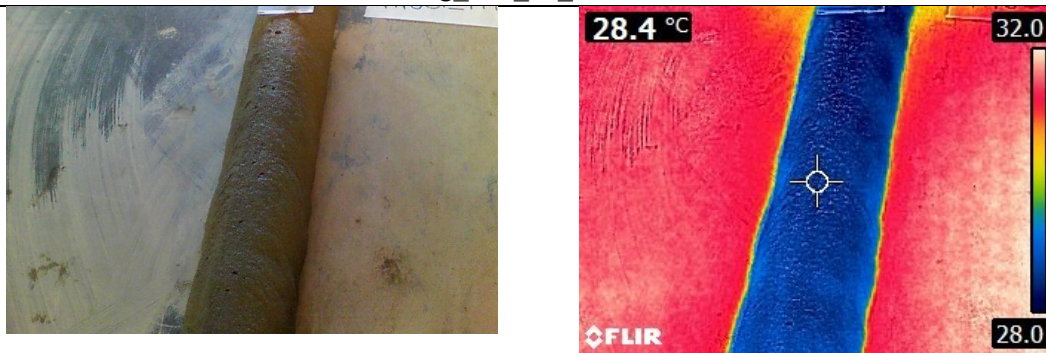
As argamassas ensaiadas foram analisadas quanto a umidade por meio da termográfica. Para esta análise, inicialmente foram obtidas imagens da primeira camada das argamassas ensaiadas por meio da câmera termográfica (Figura 90).

Figura 90 - Imagens termográficas da primeira camada das argamassas ensaiadas

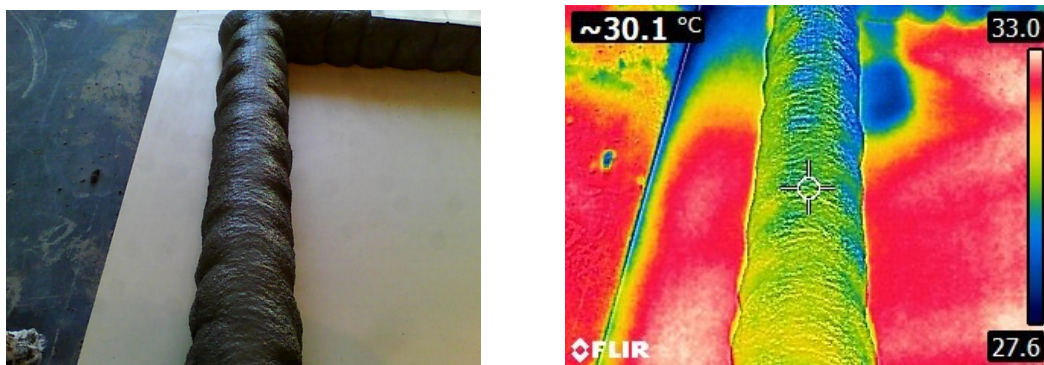
arg_HPMC



arg_MC_10_HPMC



arg_MC_30_HPMC



Fonte: A autora.

Na Figura 90 verifica-se nas imagens que a primeira camada da arg_HPMC e da arg_MC_30_HPMC obtiveram resultados de temperaturas aproximados, de 31°C e 30,1°C respectivamente, e que a arg_MC_10_HPMC obteve o menor resultado quando comparada as demais argamassas, sendo de 28,4 °C. A menor temperatura relativa a primeira camada da arg_MC_10_HPMC é confirmada pela cor azul, que se apresenta de forma intensa em

toda a camada, demonstrando ter menores temperaturas e predominância de umidade superficial.

Menores temperaturas estão relacionadas a maior predominância de umidade nas camadas extrudadas, sendo que a umidade se altera em função da composição da mistura (adição de HPMC, MC), relação água/cimentício, alterações reológicas e sua relação com bombeamento e extrusão.

Os efeitos do bombeamento pode estar relacionada com os resultados obtidos de consistência após extrusão, sendo de 177,3 mm da arg_MC_10_HPMC, de 176 mm da arg_HPMC e de 175,3 mm da arg_MC_30_HPMC. Isto porque possivelmente o maior resultado de consistência da arg_MC_10_HPMC, significa menor viscosidade e fricção para a saída do material cimentício, não elevando a sua temperatura.

Raval e Patel (2022) pesquisaram o bombeamento de materiais cimentícios desenvolvidos com adição de 30% de sílica ativa, 10% de cinza volante e fibra de polipropileno e concluíram que a fricção entre a interface do material cimentício e o polímero, que simula a constituição da mangueira, diminuiu com o aumento da relação água/cimento. E ainda, que maiores resultados de consistência possuem relação com menores viscosidades e atritos de interface.

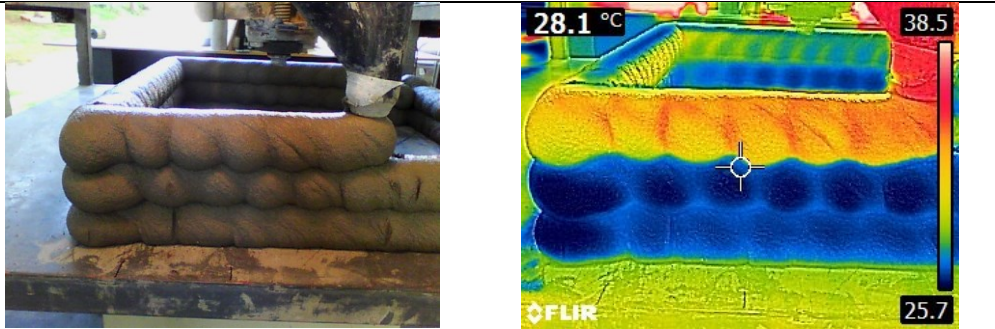
Verificou-se que na arg_HPMC houve a predominância da cor amarela ao longo da primeira camada em que é possível concluir que a adição de HPMC influenciou a perda gradativa de água para a superfície, retendo a umidade no interior da argamassa, e com isso não foi possível visualizar a umidade superficial nesta argamassa.

Com relação a arg_MC_30_HPMC observa-se a predominância da cor amarela na camada, em que há o efeito combinado da retenção ocasionada pelo HPMC e pela maior adição de MC, de 30%, que devido a elevada área superficial do MC, alterou a composição do material, e a sua perda gradativa de umidade para o meio externo.

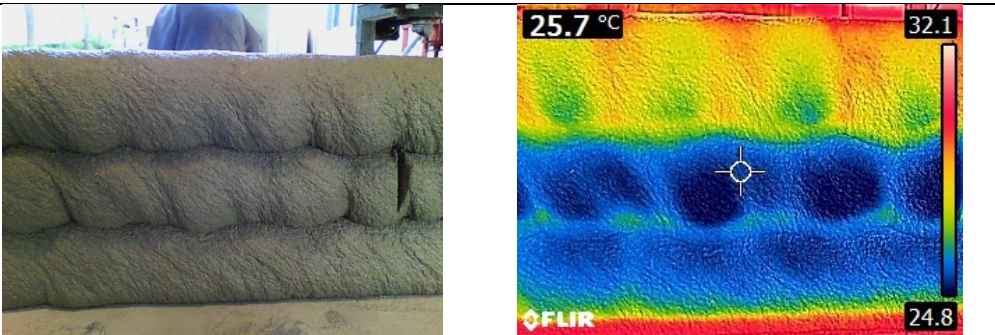
Após a primeira camada ter sido analisada em relação a umidade, deu-se sequência a sobreposição das camadas e com isso, foram obtidas imagens termográficas do objeto sólido 3D conforme apresentado na Figura 91.

Figura 91 - Imagens termográficas das camadas sobrepostas das argamassas ensaiadas

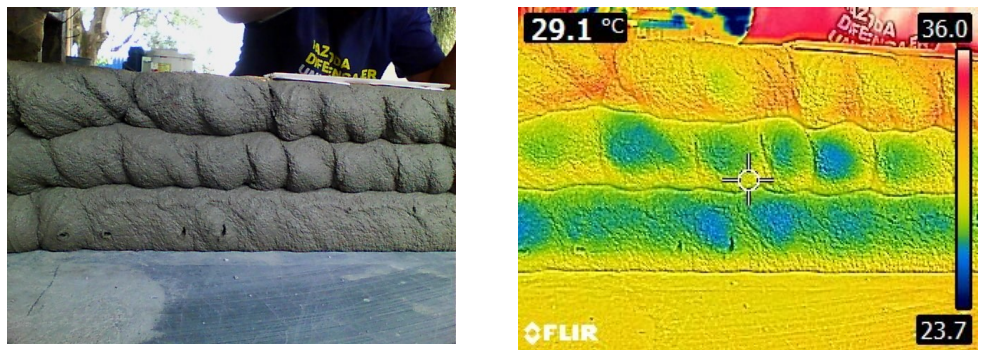
arg_HPMC



arg_MC_10_HPMC



arg_MC_30_HPMC



Fonte: A autora.

Na Figura 91 verifica-se que em relação as termografias obtidas do sólido 3D com a sobreposição de três camadas, que a arg_HPMC e a arg_MC_30_HPMC apresentaram resultados aproximados de temperatura, sendo de 28,1°C e de 29,1°C, respectivamente e a arg_MC_10_HPMC obteve a menor temperatura, referente a 25,7°C, corroborando com os resultados da primeira camada.

Na imagem termográfica da arg_HPMC verifica-se a predominância da cor vermelha no bico extrusor e a cor amarela presente na última camada extrudada, demonstrando que houve elevação de temperatura devido ao processo de bombeamento e extrusão, possivelmente desencadeado pelas alterações na reologia das argamassas (tensão de escoamento e viscosidade).

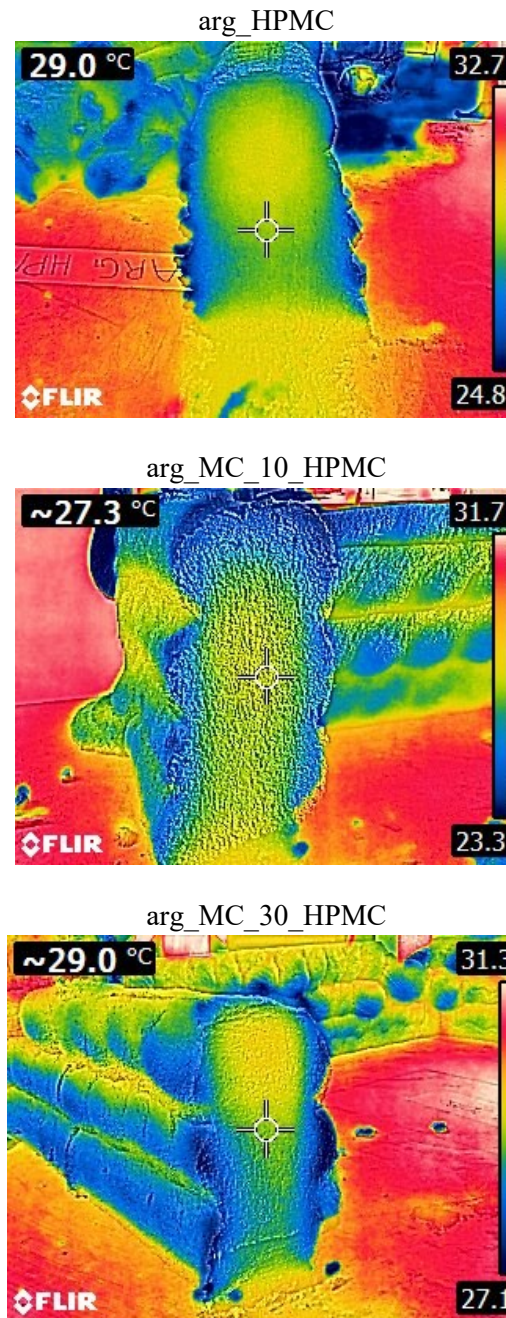
E ainda, é possível constatar que há predominância da cor azul nas primeiras camadas extrudadas, demonstrando maior predominância de umidade quando comparada a última camada, em que se tem a cor amarela. Este resultado está relacionado ao efeito retentor do HPMC, que ao ser adicionado em materiais cimentícios, possibilita a perda gradativa de água da camada.

Na arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC também se observa maior predominância de umidade nas primeiras camadas extrudadas, sendo que a perda gradativa ocorre de forma combinada pelas adições de MC e HPMC, sendo este efeito com maior intensidade na adição de 10% de MC, possivelmente devido a maior porcentagem de MC, de 30%, influenciar na umidade devido à elevada área superficial do MC.

E ainda, a adição de forma combinada de HPMC e MC pode promover alterações reológicas nas argamassas, relacionadas a maiores tensões de escoamento e viscosidade, fazendo com que interfira na capacidade de bombeamento e extrusão e ocasione elevações na temperatura da camada ao ser extrudada.

Após as argamassas serem analisadas em relação a temperatura e umidade dos sólidos 3D, foram obtidas imagens termográficas das seções transversais com a sobreposição de três camadas conforme pode ser observado na Figura 92.

Figura 92 - Imagens termográficas das seções das camadas extrudadas



Fonte: A autora.

Na Figura 92 verifica-se que em todas as argamassas ensaiadas menores temperaturas encontram-se na superfície das camadas extrudadas e maiores temperaturas no centro da seção. Dessa forma, pode-se concluir que em relação a seção do sólido 3D, este sofre esfriamento de forma gradativa, ocorrendo da parte externa para o centro da seção, preservando desta forma a umidade interna no material.

A perda gradativa da umidade e a permanência no centro da seção, deve-se a adição de HPMC que por ser um retentor de água celulósico, forma um filme coloidal, impedindo a evaporação de forma rápida da água e com isso colaborando com a cura interna do material que poderá influenciar nas propriedades mecânicas.

Em relação aos resultados obtidos de temperatura nas seções, verifica-se que a arg_MC_10_HPMC possui a menor temperatura, de 27,3°C, seguida pela arg_HPMC 28,9°C e pela arg_MC_30_HPMC, de 29 °C, confirmando os resultados obtidos anteriormente, em que as argamassas sofrem perda gradativa de água por meio da adição de HPMC.

Assim pode se concluir que o uso do HPMC em materiais cimentícios impressos é promissor pois ao manter a umidade nas camadas, colabora com a diminuição de temperatura e com o aparecimento de fissuras. Por outro lado, a umidade entre as camadas pode colaborar com a perda de resistência a tração entre as camadas, sendo que os resultados de propriedade mecânica serão apresentados e discutidos no Estudo D.

4.3.4 Considerações parciais do Estudo C

Pode-se concluir com base nos resultados obtidos no Estudo C que em relação as relações água/cimentícios a arg_HPMC obteve o menor resultado, de 0,367, seguida da arg_MC_10_HPMC, de 0,375 e da arg_MC_30_HPMC, de 0,431. Estes resultados corroboram com o comportamento observado no Estudo A, que o aumento da porcentagem de MC promove maiores resultados de relações água/cimentícios.

Em relação aos resultados de caracterização em estado fresco, verificou-se que não houve aumento da consistência após a extrusão da arg_HPMC, e que para a arg_MC_10_HPMC o aumento foi de 3,87 % e para a arg_MC_30_HPMC de 4,97%. Estes resultados demonstram que as argamassas com adição de MC são mais suscetíveis a alterações na consistência devido ao bombeamento, devido ao MC alterar as propriedades reológicas de tensão de escoamento e de viscosidade em materiais cimentícios.

No que se refere aos resultados de densidade de massa, para todas as argamassas ensaiadas o bombeamento não promoveu alterações significativas. Sendo que o menor resultado de densidade foi obtido na arg_HPMC, de 2,16 g/cm³. Este resultado justifica-se devido ao HPMC ser um retentor que ao ser adicionado em materiais cimentícios, diminui a

quantidade de água e com isso altera sua densidade. Materiais com menores densidades, possibilitam menores deformações nas camadas anteriores, devido ao menor peso, sendo dessa forma, considerados promissores.

Em relação a construtibilidade, observou-se que as argamassas arg_HPMC e arg_MC_10_HPMC foram capazes de sobrepor quatro camadas de forma contínua, sendo este o limite máximo do equipamento em relação à altura e do volume do misturador (90 litros). E que a arg_MC_30_HPMC foi capaz de sobrepor três camadas, devido a falha humana e de operação do maquinário.

Dessa forma, pode-se afirmar que a arg_HPMC e a arg_MC_10_HPMC demonstraram-se promissoras em relação a construtibilidade do sólido 3D, sendo que adequações relacionadas ao maquinário, em função de maior capacidade de extrusão e troca para bico retangular, possibilitariam a sobreposição de maior número de camadas. De acordo com Chen *et al.* (2020), a extrusão de materiais cimentícios desenvolvidos com MC em bico retangular (40x13,5) mm promoveu a sobreposição de 21 camadas enquanto para bico circular (\varnothing 15) mm de 18 camadas.

No que diz respeito a largura da primeira camada das argamassas ensaiadas, os resultados foram de 60 mm para a arg_HPMC, de 57 mm para a arg_MC_10_HPMC e de 59,5 mm para a arg_MC_30_HPMC, sendo estes resultados cerca de 2,6 vezes maiores do que o diâmetro do bico extrusor. Em que se concluiu que são necessárias adequações na velocidade do maquinário (50 mm/s) e na vazão (2,46 L/min), pois estas possibilitariam larguras mais aproximadas ao diâmetro do bico.

Foi observado que as terceiras camadas extrudadas das argamassas ensaiadas apresentaram os maiores resultados de largura, sendo de 68,6 mm para a arg_HPMC, de 67,2 mm para a arg_MC_10_HPMC e de 68,9 mm para a arg_MC_30_HPMC quando comparada as demais camadas. Estes resultados são justificados pela lubrificação da mangueira minimizando a perda de material ao ser extrudado.

As camadas foram analisadas quanto a deformação, e observou-se que o aumento da porcentagem de MC promoveu menores deformações, justificado pelo MC promover evolução da taxa de estruturação e alterações na tixotropia dos materiais cimentícios. E, camadas extrudadas em maiores tempos (terceiras e quartas camadas) apresentaram menores resultados de deformação devido à intensificação de reações químicas, possivelmente desencadeando maior enrijecimento em estado fresco.

Por meio da análise termográfica observou-se que dentre as argamassas ensaiadas, a arg_MC_10_HPMC obteve os menores resultados de temperatura na primeira camada extrudada e no sólido 3D, sendo de 28,4°C e 27,3°C respectivamente. Em que pode se concluir que a composição da mistura (adição de HPMC e MC), relação água/cimentício e consistência interferem na temperatura e umidade do material. Assim, maiores resultados de consistência possibilitam que a argamassa saia do bico extrusor com menor fricção em relação a parede da mangueira, minimizando temperatura e possibilitando a perda gradativa de umidade.

Por fim, nas seções dos sólido 3D observou-se que as menores temperaturas se localizam na face externa das seções e as maiores temperaturas no centro da seção, em que pode se concluir que devido ao filme formado pelo HPMC nos materiais cimentícios, este impediu a evaporação de água e forma rápida, interferindo na cura do material e por consequência em suas propriedades mecânicas, que serão analisadas e discutidas no Estudo D.

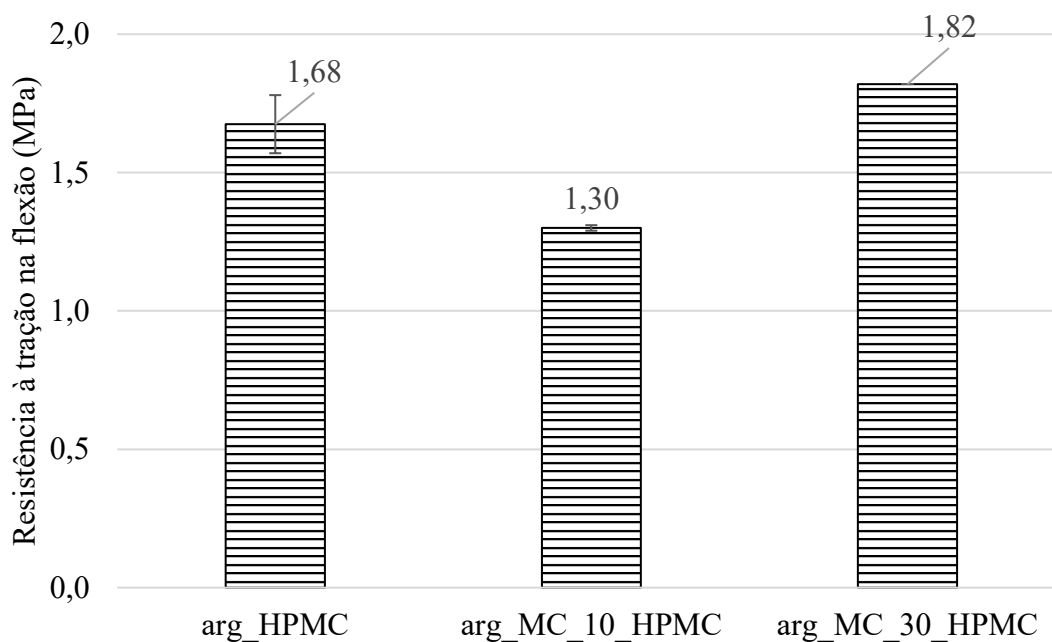
4.4 ESTUDO D

O Estudo D teve como principal objetivo analisar as propriedades mecânicas em argamassas consideradas extrudáveis e construtivas pelo Estudo B e C. Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos das argamassas arg_HPMC, arg_MC_10_HPMC e arg_MC_30_HPMC em relação as propriedades mecânicas de resistência a tração na flexão, a resistência a compressão, aderência entre camadas e de microtomografia computadorizada de raios-X (μ CT).

4.4.1 Resultados – Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado aos 63 dias com corpos de prova em camadas. Na Figura 93 verifica-se os resultados obtidos dos corpos de prova em camadas.

Figura 93 – Médias dos corpos de prova em camadas ensaiados a resistência à tração na flexão aos 63 dias



Fonte: A autora.

* Média realizada com dois corpos de prova por argamassa.

É possível observar por meio dos resultados apresentados na Figura 93, que a adição de 30% de MC em substituição a massa de cimento, contribuiu para um acréscimo de resistência a tração na flexão em camadas de 8,33% quando comparada a arg_HPMC e de 40% quando comparada a arg_MC_10_HPMC.

Hou *et al.* (2020) afirma que em proporção de substituição adequada, o (MC) promove o aumento da resistência à compressão e a flexão. Para Wild; Khatib e Jones (1996) o aumento da resistência pela adição de (MC) é possivelmente devido ao efeito filler, a aceleração da hidratação cimentícia e a reação pozolânica.

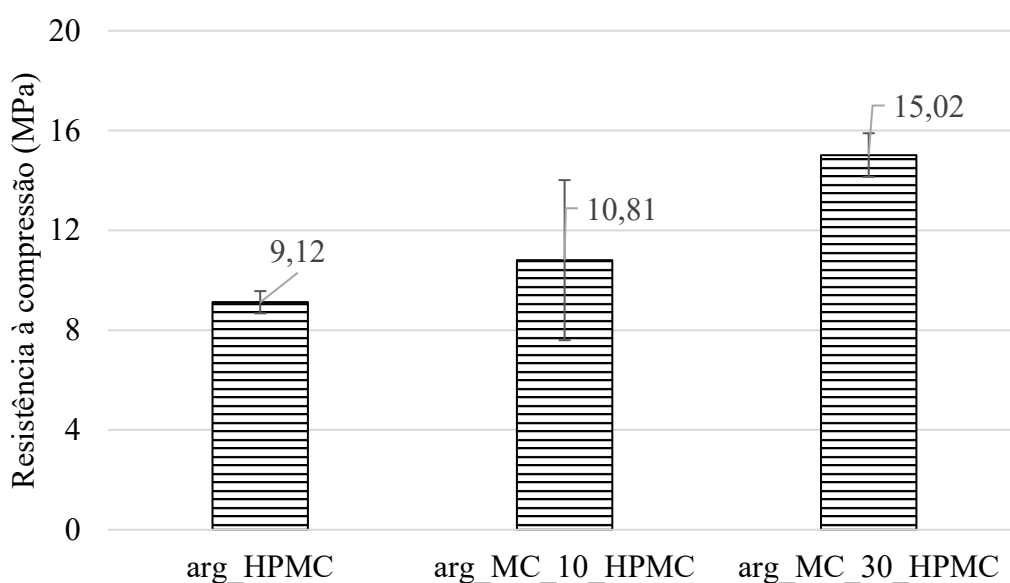
Observa-se que a arg_MC_10_HPMC obteve o menor resultado de resistência quando comparada as demais argamassas ensaiadas, sendo de 1,30 MPa. Filgueiras (2023) atribuiu este resultado devido a aplicação da carga, de forma perpendicular e localizada no centro de ligação das camadas, sendo esta uma região considerada como frágil e suscetível a umidade e a vazios, que desta forma podem ter influenciado na perda da resistência.

De forma sequencial, os corpos de prova foram ensaiados quanto a resistência a compressão, conforme apresentado na seção a seguir.

4.4.2 Resultados – Ensaio de resistência à compressão

As argamassas foram avaliadas quanto a resistência a compressão com corpos de prova em camadas, ensaiados aos 63 dias. Os corpos de prova em camadas foram obtidos por meio do ensaio de resistência à tração na flexão, sendo que os resultados podem ser observados na Figura 94.

Figura 94 – Média dos corpos de prova em camadas ensaiados a resistência à compressão aos 63 dias



Fonte: A autora.

* Média realizada com três corpos de prova por argamassa

Em relação aos resultados de resistência a compressão em camadas aos 63 dias, observa-se um ganho de resistência de 18,53% para a arg_MC_10_HPMC e de 64,70% para a arg_MC_30_HPMC quando comparada a arg_HPMC. Pode se concluir que o aumento da porcentagem de MC teve influência significativa na resistência a compressão, sendo este efeito possivelmente devido ao refinamento da estrutura porosa após atividade pozolânica do (MC) (ROJO-LÓPEZ *et al.*, 2022).

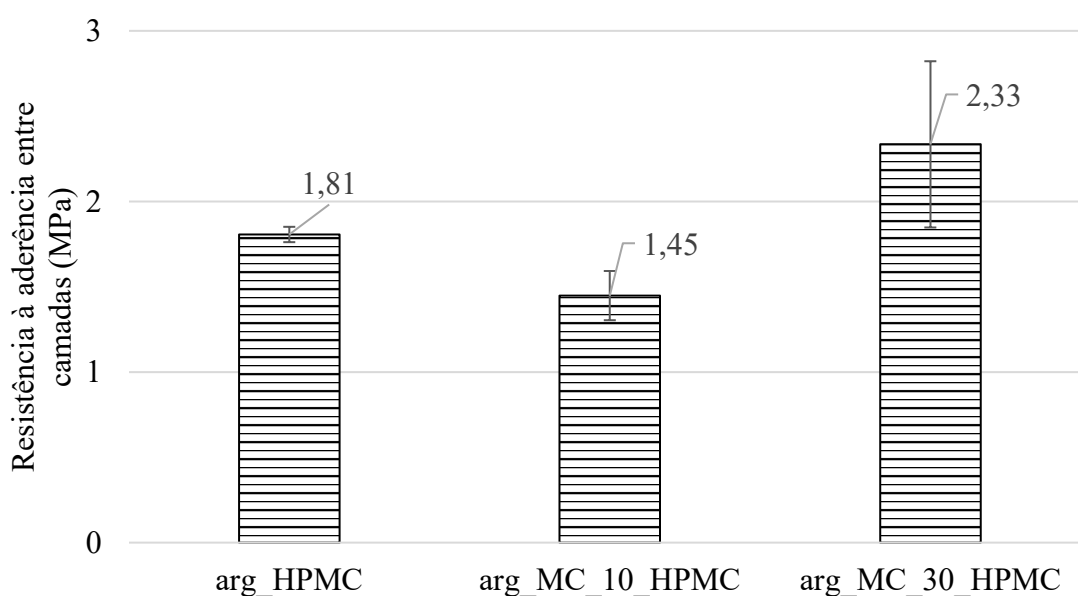
Demais autores observaram o aumento de resistência pela adição de (MC) em materiais cimentícios (CHEN *et al.*, 2019; VICENTINI, CAMARA, TASHIMA, 2016).

Ressalta-se que com a adição de (MC) nos materiais cimentícios, verifica-se o aumento dos resultados de propriedades mecânicas, relacionados a resistência a compressão, bem como alterações em sua reologia, relacionadas a tensão de escoamento e estruturação, e com isso pode melhorar a construtibilidade quando utilizado em materiais cimentícios aplicados a impressão 3D (CHEN *et al.*, 2020a; CHEN *et al.*, 2020b; Chen *et al.*, 2019).

4.4.3 Resultados – Ensaio de aderência entre camadas

As argamassas foram avaliadas quanto a resistência à aderência por meio do rompimento de três corpos de prova aos 165 dias. Na Figura 95 verifica-se os resultados obtidos e os respectivos desvios padrões dos corpos de prova em camadas.

Figura 95 – Média dos corpos de prova em camadas ensaiados à aderência entre camadas aos 165 dias



Fonte: A autora.

* Média realizada com três corpos de prova por argamassa.

A resistência a aderência entre camadas foi determinada por meio do ensaio de tração direta visando o rompimento e a análise da interface das camadas. Por meio dos resultados

obtidos na Figura 108, verifica-se que a arg_MC_30_HPMC obteve o maior resultado, de 2,33 MPa, seguido pela arg_HPMC, de 1,81 MPa e pela arg_MC_10_HPMC, de 1,45 MPa.

Estes resultados corroboram com os apresentados na literatura científica, Padilha (2020) obteve resultado de 1 MPa para corpos de prova ensaiados sem janela de impressão. Meurer e Classer (2021) verificaram que o maior resultado foi nos materiais ensaiados sem janela de impressão, referente a 2 MPa. Os autores afirmam que houve redução significativa da resistência a aderência nas camadas com a janela de impressão a partir de 10 minutos sendo este efeito relacionado a perda de umidade das interfaces.

Verifica-se que a arg_MC_10_HPMC obteve o menor resultado de aderência entre camadas quando comparada as demais argamassas ensaiadas, este resultado pode ser justificado devido a composição desta argamassa, com adição de 10% de MC e por esta ter apresentado maior predominância de umidade na superfície, conforme apresentado nas imagens obtidas por câmera termográfica e discutidos no Estudo C.

A umidade superficial pode influenciar os resultados de aderência entre camadas, sendo que ela é suscetível aos parâmetros de impressão, parâmetros do material, tais como composição do material e evaporação de água (SANJAYAN *et al.*, 2018). Van der Putten *et al.* (2019) observou uma maior perda de resistência entre camadas no intervalo de tempo de 0 a 10 min e, relacionou este efeito a maior evaporação da água ocorrida durante os primeiros 10 minutos após a impressão.

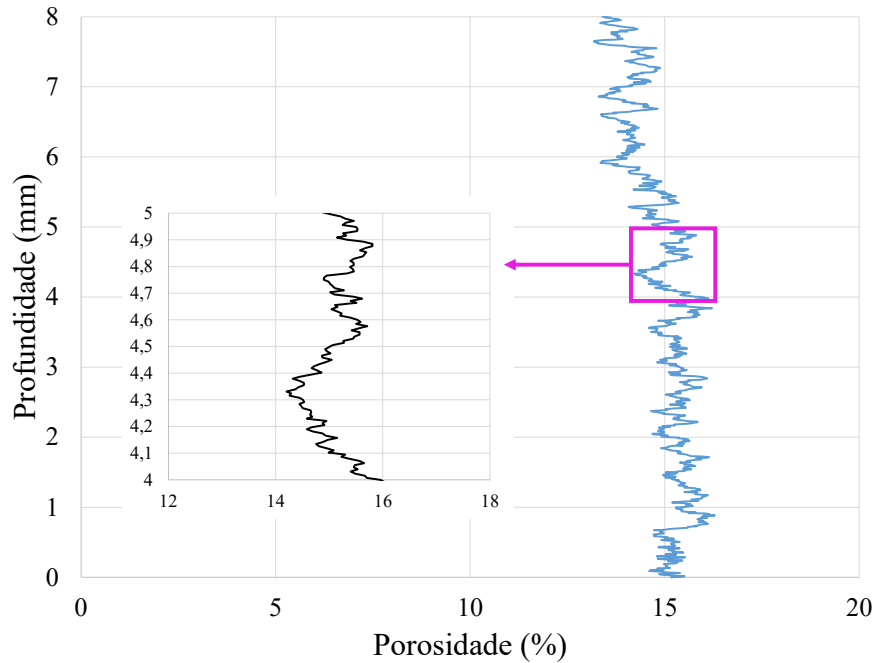
Para Filgueiras (2023) outros fatores como os tamanhos da amostra e porosidades diferentes nas camadas podem ter influenciado os resultados de aderência, sendo necessária a quantificação destes poros presentes na interface.

Visando compreender os efeitos da aderência em relação a porosidade nas interfaces das camadas foram realizados ensaios de quantificação dos poros por meio da microtomografia computadorizada de raios-X e estes são descritos na seção a seguir.

4.4.4 Resultados – Microtomografia computadorizada de raios-X (μ CT).

As argamassas foram analisadas quanto a porosidade existente na região da interface entre as camadas aos 165 dias, por meio de amostras de (8 x 5 x 5) mm e resolução de 8 μ m. Na Figura 96 verifica-se o resultado obtido para a arg_HPMC.

Figura 96 – Porosidade total e na faixa da interface da arg_HPMC aos 165 dias



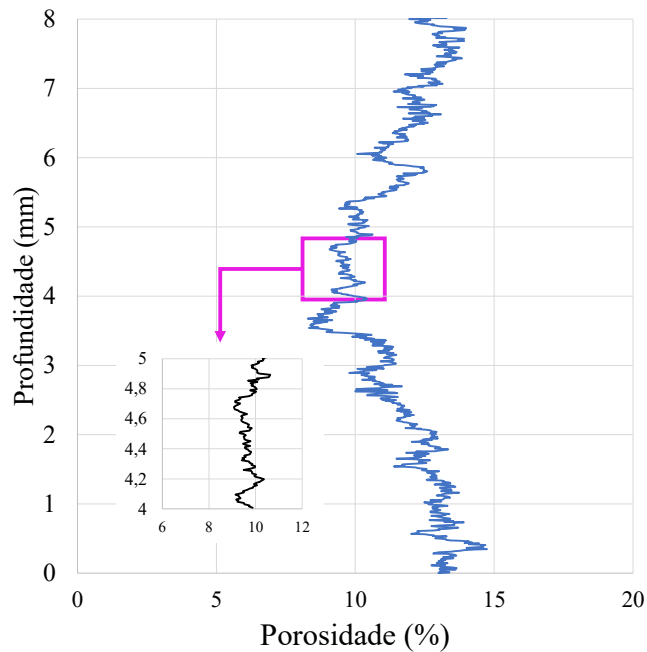
Fonte: A autora.

Verifica-se na Figura 96, o gráfico com os resultados obtidos da porosidade da arg_HPMC, sendo a porosidade total com um resultado de 13,96% e porosidade na faixa referente a interface das camadas, de 15%. Observa-se uma homogeneidade dos resultados, possivelmente este comportamento é devido a alteração da microestrutura da argamassa pela adição do HPMC.

Chen *et al.* (2020d) relata que em materiais cimentícios, o HPMC é adsorvido pelas partículas de cimento e areia formando um filme espacial capaz de influenciar na formação de uma distribuição de forma regular, alterando os canais internos relacionados a migração de água. Esta afirmação corrobora com os resultados obtidos no Estudo A, em que foram visualizados maiores resultados de retenção de água nas argamassas com adição de HPMC.

De forma sequencial as análises de porosidade, tem-se na Figura 97 a porosidade da arg_MC_10_HPMC.

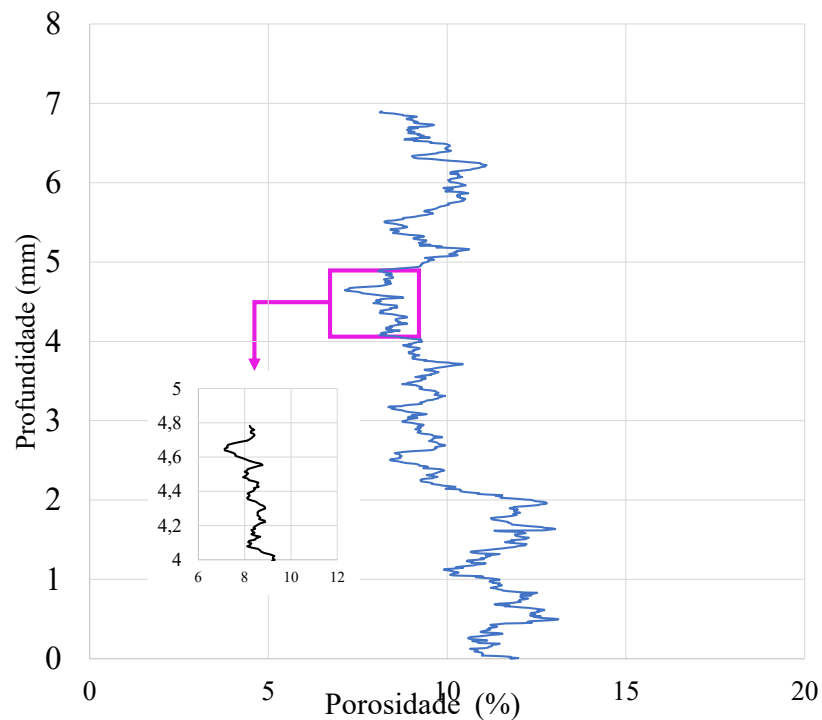
Figura 97 - Porosidade total e na faixa da interface da arg_MC_10_HPMC aos 165 dias



Fonte: A autora.

A arg_MC_10_HPMC obteve uma porosidade total de 11,03% e porosidade da região da faixa da interface das camadas de 9,72%. Em que, verifica-se uma redução da porosidade de 35,2 % na região da interface em relação a arg_HPMC. Este resultado deve-se a adição de MC que causa refinamento dos poros ao ser adicionado em materiais cimentícios (ROJO-LÓPEZ *et al.*, 2022). Menor porosidade também é observada na arg_MC_30_HPMC corroborando com o efeito do MC observado na arg_MC_10_HPMC (Figura 98).

Figura 98 - Porosidade total e na faixa da interface da arg_MC_30_HPMC aos 165 dias



Fonte: A autora.

A arg_MC_30_HPMC obteve uma porosidade total de 9,3% e na região da interface das camadas de 8,3%. Em que se verifica uma redução de 44,67% em relação a porosidade da região de interface da arg_HPMC, demonstrando que o aumento da adição de MC contribuiu com menores resultados de porosidade.

Dessa forma, pode se concluir que a adição de 30% de MC promoveu ganho de resistência a compressão, à tração na flexão e na aderência entre camadas, e interferiu na qualidade superficial das camadas, demonstrando alterações em sua reologia. Este efeito foi abordado por demais autorias e estão relacionados a atividade pozolânica do (MC) e ao efeito filer ocasionado em argamassas (HOU *et al.*, 2020; WILD; KHATIB E JONES, 1996; ROJO-LÓPEZ *et al.*, 2022; CHEN *et al.*, 2019).

4.4.5 Considerações parciais do Estudo D

Pode-se concluir com base nos resultados obtidos no Estudo D que em relação a adição de MC em substituição a massa de cimento, contribuiu para um acréscimo de resistência a tração na flexão em camadas aos 63 dias quando comparada a arg_HPMC.

A arg_MC_10_HPMC obteve o menor resultado de resistência à tração na flexão em camadas quando comparada as demais argamassas ensaiadas, de 1,30 MPa, sendo este resultado atribuído a aplicação perpendicular da carga em relação ao centro da ligação das camadas, considerada uma região fragilizada.

Verificou-se uma evolução da resistência a compressão conforme o aumento da adição de MC aos 63 dias para os corpos de prova em camadas, quando comparado com os resultados obtidos da arg_HPMC, este comportamento se justifica devido ao refinamento da estrutura porosa após atividade pozolânica do (MC).

Em relação a resistência a aderência entre camadas a arg_MC_30_HPMC obteve o maior resultado, de 2,33 MPa, seguido pela arg_HPMC, de 1,81 MPa e pela arg_MC_10_HPMC, de 1,45 MPa, sendo estes resultados significativos quando comparados com os obtidos em literatura científica. O menor resultado de aderência entre camadas com a adição de 10% de MC foi justificado devido a umidade na superfície, conforme constatado em resultados anteriores com análise das imagens por câmera termográfica e discutidos no Estudo C.

Observou-se por meio dos resultados obtidos de porosidade que nas interfaces das camadas a arg_HPMC, obteve o maior resultado de 15% e homogeneidade nos resultados, sendo atribuído a alteração da microestrutura da argamassa devido a adição do HPMC. Verificou-se uma diminuição da porosidade nas argamassas conforme o aumento da adição de MC, justificado devido ao MC promover refinamento nos poros quando adicionado em materiais cimentícios.

5 CONCLUSÕES

A impressão 3D é considerada uma tecnologia inovadora que tem potencial para revolucionar o setor da construção civil por meio da automatização. Neste contexto, o desenvolvimento de materiais cimentícios com adições minerais, como o (MC) aplicados a impressão 3D contribui para o avanço da tecnologia de forma sustentável. Contudo, para o uso do (MC) no desenvolvimento de materiais cimentícios, torna-se necessário o estudo aprofundado sobre os seus efeitos, devido ao (MC) alterar as propriedades em estado fresco e endurecido.

Assim, nesta tese, foram analisados os efeitos do (MC) e HPMC em materiais cimentícios aplicados a impressão 3D, por meio dos Estudos Experimentais, em que se concluiu que foi possível obter materiais cimentícios considerados promissores, com adição mineral de (MC) nas porcentagens de 0%, 10% e 30% em relação à substituição da massa de cimento e 0,3% de aditivo químico (HPMC).

A adição de HPMC nos materiais cimentícios aumentou a relação água/cimentícios em pastas, a retenção de água em argamassas e retardou o tempo de início de pega. Este resultado demonstra que materiais cimentícios desenvolvidos com HPMC poderão ser bombeados e extrudados em maior intervalo de tempo, possibilitando que as camadas adjacentes sejam aderidas às camadas anteriores.

O uso de (MC) aumentou as relações de água/cimentícios e acelerou o início de pega, devido à composição química do (MC), de silicatos e aluminados, que por meio de reação pozolânica, aceleram a hidratação cimentícia. Observou-se que o efeito acelerador do tempo de pega ocasionado pela adição de MC, foi minimizado com adição de HPMC, demonstrando que o uso combinado do (MC) e HPMC são considerados promissores.

Verificou-se que foi possível a extrusão de até quatro camadas em relação à capacidade máxima do volume do misturador, de 90 litros. E que o tempo de extrusão das camadas com comprimento de 1600 mm e 2400 mm foi de aproximadamente 4 minutos, para uma vazão de 2,46 L/min e uma velocidade de 50 mm/s.

No ensaio de janela de impressão foi possível a extrusão de todas as camadas no tempo de aproximadamente 1 hora. E, todas as argamassas ensaiadas foram consideradas aprovadas em relação à continuidade e bordas visíveis, obtendo coeficientes de variação menores que 10% em relação às larguras das camadas, demonstrando pouca variabilidade dos resultados.

O aumento da porcentagem de (MC) provocou vincos nas camadas extrudadas, ocasionados pelas alterações reológicas nas argamassas devido a adição, sendo necessário ajustes nos parâmetros pré-fixados do equipamento de impressão 3D, de velocidade e vazão, para minimização dos vincos e melhoria da qualidade superficial das camadas extrudadas.

Em relação a construtibilidade, verificou-se que as argamassas com adição de MC são mais suscetíveis a alterações na consistência antes e após o bombeamento, devido ao MC alterar as propriedades reológicas, de tensão de escoamento e de viscosidade, quando adicionado em materiais cimentícios. E que em relação a densidade de massa, para todas as argamassas ensaiadas o bombeamento não promoveu alterações significativas.

No que diz respeito a capacidade construtiva, a arg_HPMC e arg_MC_10_HPMC foram capazes de sobrepor quatro camadas de forma contínua, sendo este o limite máximo do equipamento em relação à altura e do volume do misturador (90 litros). E a arg_MC_30_HPMC foi capaz de sobrepor três camadas, devido a falha na operação do maquinário.

Em relação a deformação nas camadas, observou-se que o aumento da porcentagem de MC promoveu menores deformações e que camadas extrudadas em maiores tempos (terceiras e quartas camadas) apresentaram menores resultados de deformação, este efeito foi justificado devido ao maior tempo de extrusão possibilitar que as reações químicas se intensifiquem, possivelmente desencadeando maior evolução da taxa de estruturação.

A respeito da umidade nas camadas, estas foram verificadas por meio da termografia, e concluiu-se que dentre as argamassas ensaiadas, a arg_MC_10_HPMC obteve os menores resultados de temperatura e maior umidade, estes resultados foram justificados devido a composição da mistura, relação água/cimentício e consistência. Sendo que, materiais cimentícios com maiores resultados de consistência, poderão ter maiores viscosidade e com isso poderão ser bombeados com menores pressões minimizando a temperatura nas camadas.

Analisou-se os resultados de temperatura e umidade nas faces externas das seções transversais dos sólidos 3D (com sobreposição de três camadas), e concluiu-se que maiores temperaturas estão no centro da seção, demonstrando que a adição de HPMC, por meio do efeito retentor, possibilita uma perda gradativa da água a partir das faces externas, e que este efeito pode interferir no processo de hidratação cimentícia do material.

Em relação aos resultados obtidos de propriedade mecânicas pode se concluir que a maior adição de MC, de 30%, em substituição a massa de cimento, contribuiu para um acréscimo de resistência a tração na flexão aos 63 dias, a compressão aos 21 e 63 dias e na

aderência entre camadas aos 165 dias, sendo estes resultados justificados devido ao refinamento da estrutura porosa após atividade pozolânica do (MC).

Observou-se que a arg_MC_10_HPMC obteve o menor resultado de resistência à tração na flexão e na aderência entre camadas quando comparada as demais argamassas ensaiadas. Em relação ao resultado obtido da resistência a flexão, este foi atribuído à aplicação perpendicular da carga em relação ao centro da ligação das camadas, considerada uma região fragilizada. E em relação a aderência entre camadas, atribuiu-se o menor resultado a maior predominância de umidade presente na arg_MC_10_HPMC.

A análise de porosidade obtida por meio da microtomografia de raio-X, demonstrou que nas interfaces das camadas, a arg_HPMC, obteve maior resultado, de 15% e apresentou homogeneidade quando comparada as demais argamassas ensaiadas, sendo este efeito atribuído a alteração da microestrutura pela adição de HPMC e, menores resultados de porosidade foram encontrados nas argamassas conforme o aumento da adição de MC, justificado pelo MC promover compactidade e refinamento nos poros quando adicionado aos materiais cimentícios.

E, pode se observar que a incorporação de (MC) e HPMC demonstrou que adequações no maquinário relacionadas aos parâmetros de bombeamento, tais como, velocidade e vazão, e, mudança no bico extrusor para o formato retangular, poderiam contribuir para melhoria na qualidade das camadas e para o aumento da capacidade de sobreposição e formação de sólidos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Por meio do desenvolvimento desta tese, evidenciou-se a necessidade de pesquisas com materiais cimentícios produzidos por impressão 3D, com maior enfoque à investigação de materiais sustentáveis e promissores, neste sentido, sugere-se:

- Investigar as influências dos parâmetros de bombeamento e de extrusão do maquinário de impressão 3D, diferentes velocidades e vazões, em materiais cimentícios desenvolvidos com diferentes porcentagens de (MC) e HPMC, bem como as alterações nos parâmetros reológicos de tensão de escoamento e viscosidade;

- Pesquisar os impactos na sustentabilidade, com relação a geração de resíduos, mitigação de CO₂ e desempenho térmico em projetos e edificações desenvolvidas com materiais cimentícios com (MC) e HPMC;
- Investigar os efeitos em estado fresco e endurecido de materiais cimentícios desenvolvidos com HPMC e com (MC) em diferentes granulometrias e graus de calcinação;
- Estudar materiais cimentícios aplicados a impressão 3D desenvolvidos com diferentes retentores de água e seus efeitos no estado fresco e endurecido;
- Desenvolver projetos aplicados a tecnologia de impressão 3D com materiais cimentícios desenvolvidos com (MC) e HPMC aplicados a tecnologia BIM.

REFERÊNCIAS

3D natives. Disponível em: <https://www.3dnatives.com/>. Acesso em novembro de 2022.

3D PRINTED HOUSE, 2021. Disponível em: < <https://www.3dprintedhouse.nl/en/>>. Acesso em novembro de 2022.

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: <https://abcp.org.br/usp-e-abcp-criam-hub-de-inovacao-para-construcao-digital/>. Acesso em nov. de 2022.

APIS COR. Disponível em: <<https://www.apis-cor.com/>>. Acesso em março de 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13276: Material cimentício para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13277: Material cimentício para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13278: Material cimentício 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: Material cimentício para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência a compressão. Rio de Janeiro, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 16541: Material cimentício para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização dos ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

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

ALGHAMDI, H.; NAIR, S. A. O.; NEITHALATH, N. Insights into material design, extrusion rheology and properties of 3D printable álcali activated fly ash-based binders. **Materials and Design**. v. 167. 2019.

AHMAD, F. F.; GHENAI, C.; HAMID, A. K.; REJEB, O; BETTAYEB, M. Performance enhancement and infra-red (IR) thermography of solar photovoltaic panel using back cooling

from the waste air of building centralized air conditioning system. **Case studies in thermal engineering**. Case studies in thermal engineering, v. 24, 2021.

ASTM 52900: Standard terminology for additive manufacturing - General principles. Part 1: Terminology. West Conshohocken: p. 2015.

ASTM. C-150M. Standard Specification for Portland Cement. 2021.

ASTM. D7234. Standard Test Method for Pull-Off Adhesion Strength of Coatings on Concrete Using Portable Pull-Off Adhesion Testers. 2021.

AUSTIN, S.; GOODIER, C. L.; ROBINS, P. The rheological performance of wet-process sprayed mortars. **Magazine of Concrete Research**. 1999.

BAI, G.; WANG, L.; MA, G.; SANJAYAN, J.; BAI, M. 3D printing eco-friendly concrete containing under-utilised and waste solids as aggregates. **Cemente and Concrete Composites**. v. 120. 2021.

BARATA, M. S. **Aproveitamento dos resíduos cauliniticos das indústrias de beneficiamento de caulim da região amazônica como matéria-prima para fabricação de um material de construção (pozolanas)**. 396 f. Tese (Programa de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica). Belém, 2007.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S. Caracterização dos resíduos cauliniticos das indústrias de mineração de caulim da Amazônia como matéria prima para produção de pozolanas de alta reatividade. **Revista Cerâmica**. v. 58, 2012.

BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. M. S. F.; DELGADO, J. M. P. Q. Infrared thermography for assessing moisture related phenomenon in building components. **Construction and Building Materials**. 2016.

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

BEIGH, M.A.B.; NERELLA, V. N.; SCHROFL, C.; MECHTCHERINE, V. Studying the rheological behavior of limestone calcined clay cement (LC3) mixtures in the context of extrusion-based 3D-printing. **3rd International Conference Calcined Clays Sustain**. 2019.

BENHELAL, E.; ZAHEDI, G.; SHAMSAEI, E.; BAHADORI, A. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. **Journal of Cleaner Production**. p. 142-161. 2013.

BHATTACHERJEE, S.; BASAVARAJ S. A.; RAHUL, A. V.; SANTHANAM, M.; GETTU, R.; PANDA, B.; SCHLANGEN; E.; CHEN, Y.; COPUROGLU, O.; MA, G.; WANG, L.; ABDUL, M.; BEIGH, B.; MECHTCHERINE, V. Sustainable materials for 3D concrete printing. **Cement and Concrete Composites**. v. 122. 2021.

BOHUCHVAL, M., SONEBI, M., AMZIANE, S., PERROT, A. Effect of metakaolin and natural fibres on three-dimensional printing mortar. **Construction materials**. 2020.

BONG, S. H., XIA, M., NEMATOLLAHI, B., SHI, C. Ambient temperature cured ‘just-add-water’ geopolymer for 3D concrete printing applications. **Cement and concrete composites**. 2021.

BOS, F.; WOLFS, R.; AHMED, Z.; SALET, T. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. **Virtual and physical prototyping**. 2016.

BOS, F. P.; LUCAS, S. S.; WOLFS, R. J. M.; SALET, T. A. M. Properties of Composite Modified with Limestone Powder for 3D Concrete Printing. **RILEM Bookseries 28**, pp. 125–134, 2020.

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

CARVALHO, I. A. D. **Desenvolvimento da técnica “concreto fresco 2D – CF2D” para fabricação digital de artefatos de concreto**. Pós-Graduação em Engenharia Civil. Rio de Janeiro: UFRJ. 2018.

CASSAGNABERE, F.; DIEDERICH, P.; MOURET, M.; ESCADEILLAS, G.; LACHEMI, M. Impact of metakaolin characteristics on the rheological Properties of mortar in the fresh state. **Cement e Concrete Composites**. 2013.

CENTRALE, M. E. Mix suitable for concrete 3D printing: review. **Material Today: Proceedings**. 2020.

Contour Crafting Corporation. Disponível em: <https://www.contourcrafting.com/>. Acesso em novembro de 2022.

CORTIZO, E. C. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnostico de anomalias em edificações: ênfase em edificações do patrimônio histórico**. 178 f. Tese (Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais). Belo Horizonte, 2007.

CBIC. Informativo da indústria da construção civil. Construção atria startups 3D. Edição 18. 2015. Disponível em; <https://livrozilla.com/doc/531129/cbic-mais-edi%C3%A7%C3%A3o-%2318>. Acesso em nov. de 2022.

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

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

CHEN, M.; YANG, L.; ZHENG, Y.; HUANG, Y.; LAIBO, L.; ZHAO, P.; WANG, S.; LU, L.; CHENG, X. Yield stress and thixotropy control of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up. **Construction and Building Materials**. n. 252. 2020b.

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

CHEN, N.; WANG, P.; ZHAO, L.; ZHANG, G. Water Retention Mechanism of HPMC in Cement Mortar. **Materials**. 2020d.

CHEN, Y.; LI, Z.; FIGUEIREDO, S. C.; ÇOPUROGLU, O.; VEER, F.; SCHLANGEN, E. Limestone and calcined clay-based sustainable cementitious materials for 3D concrete printing: a fundamental study of extrudability and early-age strength development. **Applied sciences**. 2019.

CHEN, M.; LI, L.; ZHENG, Y.; ZHAO, P.; LU, LINGCHAO; CHENG, X. Rheological and mechanical properties of admixtures modified 3D printing sulphoaluminate cementitious materials. **Construction and Building Materials**. v. 189. 2018.

CRAVEIRO, F.; BARTOLO, H.; DUARTE, J. P.; BARTOLO, P. J. A strategy to locally optimize the material composition of AM construction elements. **Proceedings of the 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing**, p. 188-193. 2016.

CNET World's first 3D-printed apartment building constructed in China. Disponível em: < <https://www.cnet.com/news/worlds-first-3d-printed-apartment-building-constructed-in-china/>> Acesso em: 29 mar. 2020.

DAI, S.; ZHU, H.; ZHAI, M.; WU, Q.; YIN, Z.; QIAN, H.; HUA, S. Stability of steel slag as fine aggregate and its application in 3D printing materials. **Construction and Building Materials**. v. 299. 2021.

D-SHAPE. Disponível em: < <https://dshape.wordpress.com/company/company-history/>>. Acesso em dezembro de 2021.

DINI, E. 2009. D-Shape. Disponível em: <http://d-shape.com>>. Acesso em: 06 fev. 2019.

DONATO, H.; DONATO, M. Etapas da condução de uma revisão sistemática. **Acta médica portuguesa**. v. 32. n. 3. p. 227-235. 2019.

DONG, Y. H.; NG, S. T.; KWAN, A. H. K.; WU, S. K. Substituting local data for overseas life cycle inventories—A case study of concrete products in Hong Kong. **Journal Clean Production**. v. 87, 2015.

DUARTE, H. Descubra como surgiu a impressora 3D, TECMUNDO, 2014. Disponível em: < <http://www.techtudo.com.br/dicas-etutoriais/noticia/2014/04/descubra-como-surgiu-impressora-3d.html> > Acesso em: 28 mar. 2020.

FLORENCIO, E.; MARQUES, L. M. E. B.; CORSO, N. T. P.; LIMA, T. A. A.; UCHOA, S. B. B. Concreto para uso em impressora 3D e sua utilização na construção de edificações: um estudo prospectivo. **Cad. Prospec.** 2017. p. 578-589.

GALLO, G. **Aliado do cimento, metacaulim expande mercado no Brasil**. [Entrevista concedida a Altair Santos]. Cimento Itambé. 2012. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/aliado-do-cimento-metacaulim-expande-mercado-no-brasil/>. Acesso em 05 de out. 2021.

GHAFFAR, S. H., CORKER, J., FAN, M. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. **Automation in Construction**. V. 93. 2018.

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

HAGER, I.; GOLONKA, A.; PUTANOWICZ, R. 3D printing of buildings and building component as the future of sustainable construction? **Procedia Engineering**. v. 151. p. 292-299. 2016.

HAMIDI, F.; ASLANI, F. Additive manufacturing of cementitious composites: Materials, methods, potentials, and challenges. **Construction and Building Materials**. pp. 582-609. 2019.

HAN, X.; YAN, J.; LIU, M.; HUO, L.; LI, J. Experimental study on large-scale 3D printed concrete walls under axial compression. **Automation in Construction**. v. 133. 2022.

HASSE, J. A.; RUBIN, A. P.; QUINTANILHA, L. C.; REPETTE, W. L. Increasing structuration rate of 3D printable concretes: the effect of viscosity enhancing admixtures. **IBRACON Structural and Materials Journal**. 2020.

HOFFMAN, A. Watch Apis Cor 3d-print an Entire House in Just One Day. **Time magazine**. 2017. Disponível em <https://time.com/4692376/3d-printing-house-apis-cor/>. Acesso em fevereiro de 2023.

HOU, S.; DUAN, Z.; XIAO, J., YE, J. A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design. **Construction and Building Materials**. 2020.

HUANG, W. KAZEMI-KAMYAB, H., SUN, W., SCRIVENER, K. Effect of replacement of silica fume with calcined clay on the hydration and microstructural development of eco-UHPFRC, **Materials e Design**. 2017.

HUBIC. Disponível em: <https://hubic.org.br/sobre/>. Acesso em novembro de 2022.

HAN, F., HE, X., ZHANG, Z., LIU, J. Hydration heat of slag or fly ash in the composite binder at different temperatures, **Thermonical Acta**. v. 655. p. 202-210. 2017.

HOJATI, M.; LI, Z.; MEMARI, A. M.; PARK, K.; ZAHABI, M.; NAZARIAN, S.; DUARTE, J. P.; RADLINSKA, A. 3D-printable quaternary cementitious materials towards sustainable development: Mixture design and mechanical properties. Results in engineering. 2022.

IBRAHIM, K. A.; ZIJL, G. P. A. G.; BABAFEMI, A. J. Influence of limestone calcined clay cement on properties of 3D printed concrete for sustainable construction. **Journal of Building Engineering**. 2023.

ICON. Disponível em: <<https://www.iconbuild.com/about>> Acesso em: 28 mar. 2020.

IFPB. Disponível em https://www.ifpb.edu.br/joaopessoa/noticias/copy12_of_modelo-ano/05/pesquisadores-do-ifpb-desenvolvem-tecnologia-sustentavel-na-area-de-construcao-civil. Acesso em novembro de 2022.

INOVA HOUSE 3D. Disponível em: <https://www.inovahouse3d.com.br/>. Acesso em novembro de 2022.

JIANCHAO, Z., FARIED, T. Z. M. F.; WENGANG, C. 3D printing cement-based ink, and it's application within the construction industry. **MATEC Web of Conferences**. v. 120. 2017.

KARUPPANASAMY, J.; PILLAI, R. G. Statistical distributions for the corrosion rates of conventional and prestressing steel reinforcement embedded in chloride contaminated mortar. **Corrosion**. v. 73. n. 9. 2017.

KAUSHIK, S.; SONEBI, M.; AMATO, G.; PERROT, A.; DAS, U. K. Influence of nanoclay on the fresh and rheological behaviour of 3D printing mortar. **Materials Today: Proceedings**. 2022.

KAZEMIAN, A.; YUAN, X.; MEIER, R.; COCHRAN, E.; KHOSHNEVIS, B. **Construction-scale 3D printing: shape stability of fresh printing concrete**. 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference. 2017.

KAZEMIAN, A.; YUAN, X.; MEIER, R.; KHOSHNEVIS, B. Capítulo 2: Performance-Based Testing of Portland Cement Concrete for Construction-Scale 3D Printing. **3D Concrete Printing Technology**. 2019.

- KHALIL, N; AOUAD, G.; CHEIKH, K., REMOND, R. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D printing mortars. **Construction and Building Materials**, 157, 2017.
- KHATIB, J. M.; BAALBAKI, O.; ELKORDI, A. A. 15 – Metakaolin. **Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete**. p. 493-511. 2018.
- KHAN, M.; SANCHEZ, F.; ZHOU, H. 3-D printing of concrete: Beyond horizons. **Cement and Concrete Research**. v 133. 2020.
- KHOSHNEVIS, B, DUTTON, R. Innovate rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. **Matrice Technology**. 1998.
- KHOSHNEVIS, B. Automated Construction by Contour Crafting – Related Robotics and Information Technologies. **Automation in Construction – Special Issue**. v. 13, p. 5-19. 2004.
- KOCAK, Y. Effects of metakaolin on the hydration development of Portland-composite cement. **Journal of building engineering**. v.31, 2020.
- KONDRAIVENDHAN, B., BHATTACHARJEE, B. Flow behavior and strength for fly ash blended cement paste and mortar. **International Journal of Sustainable Built Environment**. 2015.
- KOTHMAN, I.; FABER, N. How 3D printing technology changes the rules of the game insights from the construction sector. **Journal of Manufacturing Technology Management**. V. 27. 2016.
- KRUGER, J., ZERANKA, S., ZIJL, G. V. 3D concrete printing: A lower bound analytical model for buildability performance quantification. **Automation in Construction**. 2019.
- LE, T. T., AUSTIN, S. A.; LIM, S.; BUSWELL, A R.; GIBB, A. G. F.; THORPE, T. Hardened properties of high-performance printing concrete. **Cement and Concrete Research**, 42, 558–566. 2012a.
- LE, T.T.; AUSTIN, S. A.; LIM, S.; BUSWELL, R. A.; GIBB, A. G. F.; THORPE, T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and Structures**. 45, 2012b.
- LI, Z.; JIN, Y.; LIANG, X.; ZENG, J. Thermography evaluation of defect characteristics of building envelopes in urban villages in Guangzhou, China. **Case studies in construction materials**, v. 17, 2022a.
- LI, F.; SHEN, W.; YUAN, Q.; HU, X.; LI, Z.; SHI, C. An overview on the effect of pumping on concrete properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 129, 2022b.

- LONG, W.; TAO, J.; LIN, C.; GU, Y.; MEI, L.; DUAN, H. Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing. **Journal of Cleaner Production**. v. 239. 2019.
- LIM S.; LE, T.; WEBSTER, J.; BUSWELL, R., AUSTIN, S., GIBB, A., THORPE, T. **Fabricating construction components using layer manufacturing technology**. Paper presented at the Global Innovation in Construction Conference, Loughborough University, Leicestershire, UK. 2009.
- LIM, S.; BUSWELL, R. A.; LE, T. T.; AUSTIN, S. A.; GIBB, A. G. F.; THORPE, T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. **Automation in construction**. v.21. p. 262-268. 2012.
- LI, Z., WANG, L., GUOWEI, M. Method for the enhancement of buildability and bending resistance of 3D printable tailing mortar. **International Journal of Concrete Structures and Materials**. 2018.
- 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. 2021.
- LIU, H.; WANG, Z.; TIAN, Z.; BU, J.; QIU, J. Effect and Mechanism of Metakaolin Powder (MP) on Rheological and Mechanical Properties of Cementitious Suspension. **Materials**. v. 15, 2022.
- LU, B.; WENG, Y.; LI, M.; QIAN, Y.; LEONG, K. F., TAN, M. J. A systematical review of 3D printable cementitious materials. **Construction and Building Materials**. V. 207. 2019.
- MA G.; WANG, L. A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing. **Frontiers Journals**. 2017.
- MA, G., LI, Z., WANG, LI. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion-based 3D printing. **Construction and Building Materials**. 2018.
- MA, G.; LI, Y., WANG, L., ZHANG, J., LI, Z. Real-time quantification of fresh and hardened mechanical property for 3D printing material by intellectualization with piezoelectric transducers. **Construction and Building Materials**. 2020.
- MA, B.; PENG, Y.; TAN, H.; JIAN, S.; ZHI, Z.; GUO, Y.; QI, H.; ZHANG, T.; HE, X. Effect of hydroxypropyl-methyl cellulose ether on rheology of cement paste plasticized by polycarboxylate superplasticizer. **Construction and Building Materials**. 2018.

- 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 and Design**. V. 169. 2019.
- MARCHMENT, T.; XIA, M.; DODD, E.; SANJAYAN, J.; NEMATOLLAHI, B. Effect of Delay Time on the Mechanical Properties of Extrusion-based 3D Printed Concrete. **34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction**. 2017.
- MARCHON, D.; KAWASHIMA, S.; BESSAIES-BEY, H.; MANTELLATO, S.; NG, S. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. **Cement and Concrete Research**. P. 96-110. 2018.
- MARIJNISSEN, M. P. A. M; ZEE, A. V. D. 3D Concrete printing in architecture – a research on the potential benefits of 3D concrete printing in architecture. **Material studies – methodologies**. p. 299-308. v.2. 2017.
- MARYNOWICZ, A.; KUCHARCZYK, A. Determination of the water absorption and water diffusion coefficients by means of infrared thermography measurements. **Measurement** **185**. 2021.
- MECHTCHERINE, V., NERELLA, V. N., WILL, F., NATHER, M., OTTO, J., KRAUSE, M. Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. **Automation in construction**. 2019.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4ª Edição. McGraw-Hill Education, 2013.
- MARLIERE, C.; MABROUK, E.; LAMBLET, M.; COUSSOT, P. How water retention in porous media with cellulose ethers works. **Cement and Concrete Research**. 2012.
- MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e Hidróxido de Cálcio**. 2011. 134p. Dissertação (mestrado). Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MEURER, M.; CLASSEN, M. Mechanical properties of hardened 3d printed concretes and mortars—development of a consistent experimental characterization strategy. **Materials**, v. 14, n. 4, 2021.
- MOEINI, M. A.; HOSSEINPOOR, M.; YAHIA, A. Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing. **Construction and Building Materials**. v. 257. 2020.
- MOHAN, M. K.; RAHUL, A. V.; TITTELBOOM, K. V.; SCHUTTER, G. Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content. **Cement and Concrete Research**. V. 139. 2021.

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

NERELLA, V. N.; NATHER, M.; IQBAL, A.; BUTLER, M.; MECHTCHERINE, V. Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction. **Cement and Concrete Composites**. V. 95. 2018.

PADILHA, V. Z. **Avaliação das propriedades mecânicas de elementos de concreto produzidos por impressão 3D**. Florianópolis, SC: Dissertação de Mestrado (UFSC), 2020. 118 p.

PAN, T.; JIANG, Y.; HE, H.; WANG, Y.; YIN, K. Effect of Structural Build-Up on Interlayer Bond Strength of 3D Printed Cement Mortar. **Materials**. v. 14. 2021.

PANDA, B.; TAN, M. J. Material properties of 3D printable high-volume slag cement. **1st International Conference on 3D Construction Printing (3DCP)**. 2018a.

PANDA, B.; TAN, M. J. Rheological behavior of high-volume fly ash mixtures containing micro silica for digital construction application. **Materials letters**. 2018b.

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

PANDA, B., PAUL, S. C., HUI, L. J., TAY, Y. D., TAN, M. J. Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. **Journal of Cleaner Production**. v. 167. 2017a.

PANDA, B.; PAUL, S. C.; MOHAMED, N. A. N., TAY, Y. W. D. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar. **Measurement**, v. 113, 2017b.

PATURAL, L., MARCHAL, P., GOVIN, A., GROSSEAU, P., RUOT, B., DEVES, O. Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars. **Cement and concrete research**. v. 41. 2011.

PAUL, S. C.; YI, W. D. T.; BIRANCHI, P.; MING, J. T. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. **Archives of civil and mechanical engineering** **18**. p. 311-319. 2017.

PAUL, S.C.; TAY, Y.W.D.; PANDA, B; TAN, M.J. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**. 2018.

PAULA, A. C. de. **Expansão Automática de query baseada em vocabulário para busca de código**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação). Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia. 2014. 55f.

- PEDRAM, M.; TAYLOR, S.; HAMILL, G.; ROBINSON, D.; OBRIEN, E. J. UDDIN, N. Experimental evaluation of heat transition mechanism in concrete with subsurface defects using infrared thermography. **Construction and Building Materials**, v. 360, 2022.
- PEGNA, J. Exploraty investigation of solid freeform construction. **Automation in construction** **5**. p. 427 – 437.1997.
- PETRICK, I. J., SIMPSON, T. W. 3D printing disrupts manufacturing: how economies of one create new rules of competition. **Journal Research-Technology Management**. v. 56. 2013.
- PIMENTA-GOMES, F. P. **Curso de Estatística Experimental**. Nobel: São Paulo, 1985.
- POINOT, T.; GOVIN, A.; GROSSEAU, P. Impact of hydroxypropylguars on the early age hydration of Portland cement. **Cement and concrete research**. 2013.
- POURCHEZ, J.; PESCHARD, A.; GROSSEAU, P.; GUYONNET, R.; GUILHOT, B.; VALLÉE, F. HPMC and HEMC influence on cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 36, 2006.
- POURCHEZ, J.; GROSSEAU, P.; RUOT, B. Changes in C3S hydration in the presence of cellulose ethers. **Cement and Concrete Research**, v. 40, 2010.
- PRENTICE, S. The five SMART technologies to Watch. **Gartner, Connecticut**, 21 fev. 2014. Disponível em: <<https://www.gartner.com/doc/2669320?ref=unauthreader>>. Acesso em 28/12/2018.
- QAIDI, S.; YAHIA, A.; TAYEH, B. A.; UNIS, H.; FARAJ, R.; MOHAMMED, A. 3D printed geopolymer composites: A review. **Materials Today Sustainability**. 2022.
- RAHEEM, A. A.; ABDULWAHAB, R.; KAREEM, M. A. Incorporation of metakaolin and nanosilica in blended cement mortar and concrete- A review. **Journal of cleaner production**. v. 290. 2021.
- RAHUL, A. V.; SANTHANAM, M. MEENA, H.; GHANI, Z. 3D printable concrete: Mixture design and test methods. **Cement and Concrete Research**. 2019.
- RAHUL, A.V., SHARMA, A., SANTHANAM, M. A desorptivity-based approach for the assessment of phase separation during extrusion of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**. 2020.
- RAMEZANIANPOUR, A. A.; KAZEMIAN, A.; NIKRAVAN, M.; MOGHADAM, M. A.; Influence of a low-activity slag and silica fume on the fresh properties and durability of high performance self-consolidating concrete. **International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies**. 2013.

RAVAL, A., PATEL, C. G. Estimation of interface friction and concrete boundary layer for 3D printable concrete pumping. **Materials Today: Proceedings**. 2022.

REHMAN, A. U.; KIM, J. H. 3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics. **Materials**. v. 14. 2021.

REZENDE, L. C. S. H. Comissão Permanente de Seleção de Projetos de Ciência, Tecnologia e Inovação da Fundação Araucária (CPSP). **Chamada Pública 10/2020 – Programa de Pesquisa e Inovação em Design**. Fundação Araucária – Apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico do Paraná. 2020. Disponível em: http://www.fappr.pr.gov.br/sites/fundacaoaraucaria/arquivos_restritos/files/documento/2020-11/atocpsp_021_2020_cp_10_2020_design_merito.pdf.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do Metacaulim de alta Reatividade**. Dissertação de Mestrado – Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. UFMG. 96 f. 2005.

ROCHA, T. S.; DIAS, D. P.; FRANÇA, F. C. C.; MONTEIRO, S. N.; AZEVEDO, A. R. G.; GUERRA, R. R. S. Influência da calcinação completa do metacaulim na resistência mecânica de materiais cimentícios geopoliméricas. 72º Congresso Anual da ABM. v. 72, n.1. 2017.

ROCHA, J. H. A.; SANTOS, C. F.; OLIVEIRA, J. B.; ALBUQUERQUE, L. K. S.; PÓVOAS, Y. V. Detecção de infiltração em áreas internas de edificações com termografia infravermelha: estudo de caso. **Ambiente construído**, v. 18, 2018.

ROJO-LÓPEZ, G.; FONTEBOA, B. G.; ABELLA, F. M. TABOADA, I. G. Rheology, durability, and mechanical performance of sustainable self-compacting concrete with metakaolin and limestone filler. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, 2022.

ROUSSEL, N. Rheological requirements for printable concretes. **Cement and Concrete Research**. 2018.

RUBIN, A. P. **Influência da taxa de estruturação nas propriedades reológicas, físicas e mecânicas de concretos para impressão 3D (3DCP)**. Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina). Florianópolis, 2021.

SAKAMOTO, C. A.; FIORITI, C. F. Estudo de parâmetros relevantes na obtenção de termogramas para diagnóstico de problemas patológicos. **Revista eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, 2017.

SALMAN, N. M.; MA, G.; IJAZ, N.; WANG, L. Importance and potential of cellulosic materials and derivatives in extrusion-based 3D concrete printing (3DCP): Prospects and challenges. **Construction and Building Materials**. 2021.

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

SANTOS, C. F.; ROCHA, J. H. A.; PÓVOAS, Y. V. Utilização da termografia infravermelha para detecção de focos de umidade em paredes internas de edificações. **Ambiente Construído**, v. 19, p. 105-127. 2019.

SCHUTTER, G., LESAGE, K., MECHTCHERINE, V., NERELLA, V., 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.

SEFFF, L., BARBETTA, P. A., REPETTE, W. L., HOTZA, D., PAIVA, H., FERREIRA, V. M., LABRINCHA, J. A. Mortar composition defined according to rheometer and flow table tests using factorial designed experiments. **Construction and Building Materials**. 2009.

SÉRGIO FILHO, J.; SINHORELLI, K.; MEDEIROS, G. AZEREDO, A.; AZEREDO, G. Estudo da reologia de pastas cimentícias contendo resíduo de tijolo cerâmico moído e metacaulim. **Matéria**. v. 25. 2020.

SHARANOVA, A. V.; TOVPINETS, A. O.; DMITRIEVA, M. A. Application of sea sand for 3D concrete printing. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**. V. 597. 2019.

SIDDIQUE, R.; KLAUS, J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied clay science**. v. 43. p. 392-400. 2009.

SIKORA, P.; CHUNG. S. Y.; LIARD, M.; LOOTENS, D.; DORN, T.; KAMM, P. H.; STEPHAN, D. ELRAHMAN, M. A. The effects of nanosilica on the fresh and hardened properties of 3D printable mortars. **Construction and Building Materials**. v. 281. 2021.

SILVA, G. C., SILVA, J. V. L. O., CASTRO, S. B. M. N., OLIVEIRA, T. P. Estudo sobre o uso da impressão 3D na construção civil. **VI Semana da engenharia do maranhão**. UFMA. 2018.

SILVA, M. D. L. **Desenvolvimento e validação de um protótipo de impressora 3D em escala de bancada visando aplicação na construção civil**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Tecnologias Limpas da Universidade Cesumar – Unicesumar). Maringá, 2022.

SOUZA, M. T.; SIMÃO, L.; MORAES, E. G.; SENFF, L.; PESSÔA, J. R. de C.; RIBEIRO, M. J.; OLIVEIRA, A. P. N. Role of temperature in 3D printed geopolymers: Evaluating rheology and buildability. **Materials Letters**. n. 293. 2021.

SQ4D. Disponível em: <[https://www.sq4d.com/proof-of-concept/#lightbox\[gallery_image_1\]/1](https://www.sq4d.com/proof-of-concept/#lightbox[gallery_image_1]/1)>. Acesso em novembro de 2022.

STARR, M. World's first 3D-printed apartment building constructed in China. Disponível em: <<https://www.cnet.com/news/worlds-first-3d-printed-apartment-building-constructed-in-china/>> Acesso em: 29 mar. 2020.

SUSTENTARQUI. Disponível em: <https://sustentarqui.com.br/primeira-casa-impressa-em-3d-no-brasil-fica-no-nordeste/>. Acesso em novembro de 2020.

TAO, D.; XIAO, J.; ZOU, S.; YU, J. Flexural properties of 3D printed fibre-reinforced concrete with recycled sand. **Construction and Building Materials**. 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**, vol. 12, no. 3, pp. 261–276, 2017.

TAY, Y. W. D.; LI, M. Y. TAN, M. J. Effect of printing parameters in 3D concrete printing: Printing region and support structures. **Journal of materials processing tech**. 2019.

TELEDYNE FLIR. Disponível em: <https://www.flir.com.br/products/e6-xt/?vertical=condition+monitoring&segment=solutions>. Acesso em jan. de 2023.

THOMMES, M.; KANEKO, K.; NEIMARK, A. V.; OLIVIER, J. P.; RODRIGUEZ-REINOSO F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. S. W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (iupac technical report).

IUPAC Technical Report. **Pure Appl. Chem.**, n.87, p. 1051-1069. 2015.

UFSM. Disponível em: <https://www.ufsm.br/2022/06/02/grupo-de-pesquisa-da-ufsm-realiza-impressoes-3d-em-concreto/>. Acesso em novembro de 2022.

UP, 2020. Disponível em: <https://www.unp.br/noticias/primeira-casa-construida-com-impressora-3d-no-brasil-sera-no-rn/>. Acesso em novembro de 2022.

VAN DER PUTTEN, J.; DEPREZ, M.; CNUUDE, V.; SCHUTTER, G.; TITTELBOOM, K. V. Microstructural characterization of 3D printed cementitious materials. **Materials**. 2019.

VERATTI, A. B. **Slide 1 - As paletas e a interpretação visual dos termogramas**. ICON Tecnologia Termográfica e Engenharia Consultiva Ltda. 2015.

VICENTINI, A. H., CAMARA, T. A., TASHIMA, M. M. Estudo do Teor de Metacaulim em Concretos de Alto Desempenho. **Revista Científica ANAP Brasil**, v.9, n.17, 2016.

VOIGT, T.; MBELE, J. J.; WANG, K.; SHAH, S. P. Using fly ash, clay, and fibers for simultaneous improvement of concrete green strength and consolidatability for slip-form pavement, **J. Mater. Civ. Eng.** p. 196–206. 2010.

WANGLER, T. P.; LLORET, E.; REITER, L.; HACK, N. Digital concrete: opportunities and challenges. In: **RILEM Technical Levertters**, v.1, 2016.

WATASE, A.; BIRGUL, R.; HIASA, S.; MATSUMOTO, M.; MITANI, K.; CATBAS, F. N. Practical identification of favorable time windows for infrared thermography for concrete bridge evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 1016-1030. 2015.

WASP. Disponível em <https://www.3dwasp.com/chi-siamo/#>. Acesso em novembro de 2022.

WILD, S.; KHATIB, J. M.; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, 1996.

WINTER, S.; HENKE, K.; TALKE, D. **Additive fertigung frei geformter bauelemente durch numerisch gesteuerte extrusion von holzleichtbeton**. Relatório de pesquisa da Universidade Technische de Munique. 2016.

WINSUN 3D. Disponível em: <http://www.winsun3d.com/En/About/> Acesso em: 29 mar. 2020.

WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P. STRIEN, E. C. F., SALET, T. A. M. A Real-Time Height Measurement and Feedback System for 3D Concrete Printing. **High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet**. 2018.

YANG, L.; SEPASGOZAR, S. M. E.; SHIROWZHAN, S.; KASHANI, A. Nozzle criteria for enhancing extrudability, buildability and interlayer bonding in 3D printing concrete. **Automation in Construction**, v. 146, 2023.

YUAN, Q.; LI, Z.; ZHOU, D., HUANG, T.; HUANG, H.; JIAO, D.; SHI, C. A feasible method for measuring the buildability of fresh 3D printing mortar". **Construction and building materials**, v. 227, 2019.

ZHANG, D.; WANG, D.; LIN, X.; ZHANG, T. The study of the structure rebuilding and yield stress of 3D printing geopolymers pastes. **Construction and Building Materials**. V. 184. 2018.

ZHANG, J.; WANG, J.; DONG, S.; YU, X.; HAN, B. A review of the current progress and application of 3D printed concrete. **Composites Part A**. 2019a.

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

ZHANG, J.; GAO, X.; YU, L. Improvement of viscosity-modifying agents on air-void system of vibrated concrete. **Construction and Building Materials**. v. 239. 2020.

ZHANG, C., NERELLA, V. N., KRISHNA, A., WANG, S., ZHANG, Y., MECHTCHERINE, V., BANTHIA, N. Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. **Cement and concrete composites**. V. 122. 2021.

ZHU, B.; NEMATOLLAHI, B.; PAN, J.; ZHANG, Y.; ZHOU, Z.; ZHANG, Y. 3D concrete printing of permanent formwork for concrete column construction. **Cement and Concrete Composites**. V. 121. 2021.

ZUO, Z.; GONG, J.; HUANG, Y.; ZHAN, Y.; GONG, M.; ZHANG, L. Experimental research on transition from scale 3D printing to full-size printing in construction. **Construction and Building Materials**. v. 208. p. 350-360. 2019.