



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

MONIQUE DE BRITO FILGUEIRAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
MATERIAL CIMENTÍCIO PRODUZIDO POR IMPRESSÃO 3D
COM FOCO NA ADERÊNCIA ENTRE AS CAMADAS**

MONIQUE DE BRITO FILGUEIRAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
MATERIAL CIMENTÍCIO PRODUZIDO POR IMPRESSÃO 3D
COM FOCO NA ADERÊNCIA ENTRE AS CAMADAS**

Dissertação de Mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Berenice Martins Toralles

Londrina
2023

MONIQUE DE BRITO FILGUEIRAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAL CIMENTÍCIO
PRODUZIDO POR IMPRESSÃO 3D COM FOCO NA ADERÊNCIA ENTRE AS
CAMADAS**

**Evaluation of the mechanical properties of cementitious material produced
by 3D printing with focus on layer adhesion.**

Dissertação de Mestrado apresentado
como requisito para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil do Programa
de Pós Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Estadual de Londrina.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Berenice Martins Toralles

LONDRINA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

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

Filgueiras, Monique de Brito .

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAL CIMENTÍCIO PRODUZIDO POR IMPRESSÃO 3D COM FOCO NA ADERÊNCIA ENTRE AS CAMADAS / Monique de Brito Filgueiras. - Londrina, 2023.
176 f.

Orientador: Berenice Martins Toralles.

Dissertação (Mestrado 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 aplicados à impressão 3D - Tese. 2. Propriedades mecânicas - Tese. 3. Ensaio de tração direta para aderência entre camadas - Tese. 4. Microtomografia computadorizada de raio-X - Tese. I. Toralles, Berenice Martins. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 62

MONIQUE DE BRITO FILGUEIRAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
MATERIAL CIMENTÍCIO PRODUZIDO POR IMPRESSÃO 3D
COM FOCO NA ADERÊNCIA ENTRE AS CAMADAS**

Dissertação de Mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof^a. Dr^a. Berenice Martins
Torales
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Francisco Morato Leite
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei
Universidade Estadual de Maringá – UEM

Londrina, 27 de fevereiro de 2023.

Aos meus queridos e amados pais.

AGRADECIMENTOS

Obrigada meu Deus por estar comigo nesta caminhada, me fortalecendo dia após dia, iluminando os meus caminhos e me permitindo concluir esta etapa tão linda e importante em minha vida e obrigada infinitamente por todas as pessoas incríveis que fizeram parte disto.

Agradeço à minha querida orientadora, Prof^a Dr^a Berenice Martins Toralles, por toda a atenção, tempo, ensinamentos, dedicação, paciência e conselhos, por todos os conhecimentos transmitidos, pelos momentos compartilhados, pela participação e cuidado com o meu trabalho, sempre será minha referência como profissional incrível, engenheira, professora e a terei sempre como fonte de inspiração.

À doutoranda e amiga Lívia Fernanda Silva, por fazer parte deste trabalho, tornando-o possível e viabilizando a nossa pesquisa, por estar comigo em todas as etapas, por todo o companheirismo, paciência, amizade, parceria e pelo estudo e ensinamentos compartilhados, por todo apoio acadêmico e emocional e incentivo a vencer cada obstáculo do trabalho com excelência, tornando tudo mais leve e grandioso.

Aos meus pais, Elizabete G. de Brito Filgueiras e José Aparecido Filgueiras, por possibilitarem mais um sonho em minha vida, por todo apoio, incentivo, gestos e palavras de amor e carinho e por serem a minha base e suporte durante todos esses anos, principalmente quando escolhi estudar e trabalhar em cidades longe deles, por nunca me deixarem desistir.

Ao professor Francisco Morato Leite, pela disponibilidade e todo o auxílio e atenção com o meu trabalho, orientação na montagem dos esquemas de ensaio, desenho das peças e manuseio da prensa, ao técnico do laboratório de maquetes da UEL, Carlos Alberto Duarte, pela confecção dos acessórios de madeira e suporte com a manutenção dos materiais e ferramentas ao longo dos ensaios, aos técnicos do laboratório de materiais de construção civil (LabMat) da UEL, André e Anderson, pelo suporte com o uso da prensa.

Ao grupo de pesquisa do programa de Tecnologias Limpas da Unicesumar (Maringá-PR), à professora Luciana Cristina Soto Herek Rezende e ao pesquisador Maicon Douglas Leles da Silva, que gentilmente disponibilizaram o maquinário de impressão e ofereceram todo o suporte para a operação do mesmo. Ao SENAI (Maringá-PR), pelo auxílio na caracterização do material. À MC Química pelo suporte e fornecimento do (HPMC) que foi fundamental para a pesquisa.

Aos alunos do grupo de pesquisa da UEL: Ester e Gustavo, pela contribuição com o tema de tecnologia de impressão 3D em materiais cimentícios, à Lauane Trinetto Costa por toda parceria e ajuda com os ensaios, aos alunos de iniciação científica, Sara Campos Souza e Pedro Henrique Vieira dos Santos pela disponibilidade, apoio e parceria na realização dos experimentos finais, à todos estes por tornar o dia a dia no laboratório mais leve e dar força em cada etapa da pesquisa.

À TEC Engenharia (Londrina - PR) e à marmoraria Arte Perfeita (Cambé - PR), pela retificação e corte das amostras, por toda disponibilidade e prontidão com a minha pesquisa,

à metalúrgica do campus da UEL pela ajuda com as peças metálicas. Ao professor Eduardo Inocente Jussiani, pela disponibilidade e atenção quanto à microtomografia e auxílio com os resultados e ao professor Romel Dias Vanderlei pelo aceite em fazer parte da banca, por toda a contribuição e atenção com o meu trabalho.

Ao meu querido amigo Carlos Humberto Lazari, pela amizade e carinho, pelo apoio e parceria com a pesquisa e com a minha chegada em Londrina e também aos meus queridos amigos do programa de pós-graduação da UEL, Isabela, Maurício, Henrique, David, Renan e Rael, que vivenciaram esta etapa tão importante comigo, por sempre oferecerem ajuda, compreendendo os desafios que essa fase exige, agradeço por facilitarem o meu caminho no mestrado e por toda amizade.

Aos meus queridos amigos e parceiros de trabalho do escritório Projetek-UEL, Leonardo, Felipe e Giovanna, por ouvirem pacientemente as histórias desta pesquisa, pela amizade, conversas, apoio, força, palavras de carinho e conforto, pela companhia diária e ajuda no laboratório e no transporte de materiais, tornando a jornada mais tranquila e feliz.

Por fim, à todos os meus amigos e familiares, que sempre foram o meu apoio, que sempre direcionaram bons pensamentos e boas palavras para o meu mestrado, por me apoiarem e me incentivarem e por estarem comigo, por todo amor e carinho e por todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, com este trabalho tornando tudo possível.

Muito obrigada.

"A mente humana foi projetada para ser tanto cientista quanto advogado, tanto um buscador consciente da verdade objetiva quanto um advogado inconsciente e apaixonado por aquilo em que quer acreditar. Essas duas abordagens juntas competem para criar a nossa visão de mundo."
(MLODINOW, 2012)

FILGUEIRAS, MONIQUE B. 176 páginas. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAL CIMENTÍCIO PRODUZIDO POR IMPRESSÃO 3D COM FOCO NA ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023.

RESUMO

A utilização da impressão 3D aplicada à construção civil é uma das inovações mais promissoras na indústria construtiva trazendo otimização da produção, eficiência e sustentabilidade, sendo alvo de pesquisas por todo o mundo. Um dos maiores desafios para a difusão desta tecnologia é que o material cimentício seja extrudável e construtivo. Além disso, durante o processo de extrusão, o composto perde umidade superficial na interface fazendo com que a aderência entre as camadas impressas seja prejudicada, o que também afeta o comportamento mecânico da estrutura. Porém, o estudo deste desempenho se limita pela falta de uma metodologia de avaliação das propriedades mecânicas do produto da impressão. Assim, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento de materiais cimentícios impressos em impressora 3D de bancada quanto as propriedades mecânicas, estudando a influência da incorporação de metacaulim (MC) nas porcentagens de 0, 10% e 30% em substituição da massa de cimento e o uso do aditivo químico hidroxipropilmetilcelulose (HPMC). Para isso o programa experimental se dividiu em três campanhas, sendo a primeira de desenvolvimento dos materiais cimentícios extrudáveis por meio da determinação da consistência normal da pasta e do início e fim de pega que condicionou a seleção das argamassas promissoras para o processo de extrusão. A segunda, correspondeu a avaliação da incorporação dos materiais suplementares utilizados, por meio de ensaios para a caracterização da argamassa e avaliação da umidade superficial com o uso da termografia. Por fim a terceira, versou sobre os ensaios de compressão axial e tração na flexão e elaboração de um procedimento de ensaio de tração direta para determinar a resistência de aderência entre as camadas. Os resultados mostraram que misturas com (MC) e (HPMC) são promissoras para a impressão 3D e que a resistência à compressão foi aumentada com o aumento do teor de metacaulim, sendo de 64,7% maior para o material impresso em duas camadas com 30% de substituição de (MC) em relação a amostra sem essa adição. Quanto a resistência à tração na flexão, as amostras moldadas apresentaram valor cerca de três vezes maior do que as amostras impressas em duas camadas e entre este grupo, a amostra com 30% de substituição (30MC) foi a com maior resistência, na ordem de 40% em relação a amostra com 10% de substituição (10MC), com a menor resistência. Os resultados de aderência entre camadas seguiram a metodologia de ensaio estabelecida nesta pesquisa e tiveram a mesma tendência da tração na flexão, com resistência da amostra 30MC 61,37% maior do que a amostra 10MC que foi menor em 24,83% em relação a amostra sem (MC), sendo a 30MC de 2,34 MPa. Além disso, o material 10MC também apresentou maior umidade superficial. Por fim, conclui-se que a amostra 30MC é imprimível e a mais resistente mecanicamente, além de ter adquirido a microestrutura mais otimizada com menor percentual de porosidade como verificado por meio da microtomografia computadorizada de raio-X.

Palavras-chave: Impressão 3D; Materiais cimentícios; Propriedades mecânicas; Aderência entre camadas.

FILGUEIRAS, MONIQUE B. 176 pages. EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENTITIOUS MATERIAL PRODUCED BY 3D PRINTING WITH FOCUS ON LAYER ADHESION. Dissertation (Master in Buildings and Sanitation Engineering) - State University of Londrina, Londrina, 2023.

ABSTRACT

The use of 3D printing applied to construction is one of the most promising innovations in the construction industry, bringing optimization of production, efficiency and sustainability, and is the target of research around the world. One of the biggest challenges to the diffusion of this technology is that the cement material is extrudable and constructive. Furthermore, during the extrusion process, the compound loses surface moisture at the interface, causing adhesion between the printed layers to be impaired, which also affects the mechanical behavior of the structure. However, the study of this performance is limited by the lack of a methodology for evaluating the mechanical properties of the printed product. Thus, this research aimed to evaluate the behavior of cement-based materials printed on a 3D desktop printer in terms of mechanical properties, studying the influence of incorporating metakaolin (MK) at percentages of 0, 10% and 30% as a substitute for the cement mass and the use of the chemical additive hydroxypropylmethylcellulose (HPMC). For this, the experimental program was divided into three campaigns, the first of which was the development of extrudable cement materials through the determination of the normal consistency of the paste and the beginning and end of setting, which conditioned the selection of promising mortars for the extrusion process. The second, corresponded to the evaluation of the incorporation of the supplementary materials used, through tests to characterize the mortar and evaluate surface moisture with the use of thermography. Finally, the third, dealt with axial compression and bending tensile tests and the elaboration of a direct tensile testing procedure to determine inter-layer adhesion strength. The results showed that mixtures with (MK) and (HPMC) are promising for 3D printing and that compression resistance was increased with increasing metakaolin content, being 64.7% higher for the material printed in two layers with 30% substitution of (MK) compared to the sample without this addition. As for tensile strength in bending, molded samples showed a value about three times greater than the samples printed in two layers and among these, the sample with 30% substitution (30MK) was the one with the highest resistance, in the order of 40% compared to the sample with 10% substitution (10MK), with the lowest resistance. Inter-layer adhesion strength results followed the testing methodology established in this research and showed the same trend as bending tensile strength, with the resistance of the 30MK sample 61.37% higher than the 10MK sample, which was 24.83% lower than the sample without (MK), with a strength of 2.34MPa. Furthermore, the 10MK material also showed higher surface moisture. Finally, it was concluded that the 30MK sample is printable and the most mechanically resistant, in addition to having acquired the most optimized microstructure with the lowest porosity percentage as verified by computed X-ray microtomography.

Keywords: 3D printing; Cement-based materials; Mechanical properties; Inter-layer adhesion

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de impressão FDM	27
Figura 2 – Tecnologia Contour Crafting: A) Parede de concreto armado extrudado; B) Construção modelo para missão Marte/Lua	27
Figura 3 – Sistema de construção automatizada de Estruturas Expedicionárias (ACES) (A) SkyBAAM da ORNL (B).	28
Figura 4 – Equipamento de impressão do sistema Concrete Printing	29
Figura 5 – Obras impressas pela empresa WinSun - Edifício A); Sobrado em andamento B).	30
Figura 6 – Fôrma utilizada para elemento estrutural sendo impresso pela empresa WinSun	30
Figura 7 – Obras realizadas pela empresa. A) Impressão 3D em chalé de luxo; B) Impressão 3D Harvard Red Cottage; C) Escritório do governo de Dubai	31
Figura 8 – Maior edifício residencial da Europa sendo construído com impressão 3D	31
Figura 9 – Instalações técnicas do edifício	32
Figura 10 – Projeto de impressão 3D de edifício com o auxílio da ferramenta BIM	32
Figura 11 – Construções com o uso da tecnologia de impressão 3D em concretos pelo mundo	34
Figura 12 – Primeira casa impressa no Brasil - Macaíba (RN)	35
Figura 13 – Economia média de custos de mão de obra e matérias-primas usando métodos convencionais de construção em comparação com a impressão 3D; (a) mão de obra; (b) matérias-prima.	36
Figura 14 – Comparativo de resistência a compressão entre os tipos de cimento	40
Figura 15 – Porcentagens ideais para substituição do metacaulim em relação a massa de cimento ao longo dos anos	41
Figura 16 – Relação do metacaulim com a deformação das camadas impressas	42
Figura 17 – Imagens por meio do (MEV) da interface com diferentes porcentagens de (HPMC)	44
Figura 18 – Continuidade da camada	45
Figura 19 – Arestas visíveis	45
Figura 20 – Conformidade geométrica	46

Figura 21 – Procedimento de projeto de mistura para materiais cimentícios imprimíveis em 3D.	47
Figura 22 – Espectro eletromagnético	49
Figura 23 – Representação da Lei de Fourier em um corpo cilíndrico	50
Figura 24 – Imagem ótica e térmica de bloco de concreto seco e após 4 minutos de contato com água	51
Figura 25 – Métodos de ensaio para a determinação das propriedades mecânicas do material cimentício impresso	52
Figura 26 – Ensaio de compressão entre amostras impressas e moldadas	54
Figura 27 – Ensaio de compressão entre amostras impressas em paralelo e perpendicular	55
Figura 28 – Ensaio de resistência à tração na flexão e orientação de amostras para análise	56
Figura 29 – Ensaio de resistência à flexão na amostra de referência	56
Figura 30 – Dispositivo para Ensaio de Tração Direta do Concreto	58
Figura 31 – Dispositivo para Ensaio de Tração Direta do Concreto por FURNAS	59
Figura 32 – Método de corte para ensaio de tração intercamada	59
Figura 33 – Método de ensaio de tração direta por Sanjayan <i>et al.</i> (2018)	60
Figura 34 – Ruptura após ensaio de tração direta	60
Figura 35 – Método de ensaio de tração direta por Padilha (2020)	61
Figura 36 – Interface da camada observada por meio de microscopia eletrônica de varredura para a mesma mistura em 1 A); e 28 dias B).	62
Figura 37 – Esquema de funcionamento do microtomógrafo	64
Figura 38 – Fluxograma do Programa Experimental	66
Figura 39 – Curva granulométrica da areia	68
Figura 40 – Fluxograma da Campanha Experimental 1	72
Figura 41 – Misturador Mecânico	74
Figura 42 – Aparelho Vicat A); Pasta pronta para o ensaio B)	74
Figura 43 – Equipamento com a pasta pronta para o ensaio de tempos de pega	75
Figura 44 – Impressora 3D	77
Figura 45 – Misturador e sistema de bombeamento	78
Figura 46 – Mecanismo do bocal da impressora	79
Figura 47 – Impressão do material	79
Figura 48 – Medidas após a extrusão	80

Figura 49 – Fluxograma da Campanha Experimental 2	81
Figura 50 – Coleta da argamassa para o ensaio de consistência.	82
Figura 51 – Equipamentos para o ensaio de consistência A); Argamassa pronta para a medição B).	82
Figura 52 – Câmera termográfica FlirE6®	84
Figura 53 – Câmera termográfica pronta para as imagens de termografia	85
Figura 54 – Posição das imagens das amostras feitas por meio da câmera. A) Superfície da camada; B) Posição transversal; C) Comparação entre as amostras.	85
Figura 55 – Fluxograma da Campanha Experimental 3	86
Figura 56 – Projeto para cortadores metálicos do ensaio	87
Figura 57 – Cortadores metálicos utilizados para coleta. A)Cortador com 4 células; B) Cortador com 1 células; C) Vista superior dos cortadores	88
Figura 58 – Amostras sendo cortadas	88
Figura 59 – Amostras impressas em placa de madeira	89
Figura 60 – Fôrmas de madeira para os corpos de prova de compressão	89
Figura 61 – Fôrmas de madeira para os corpos de prova de tração na flexão	89
Figura 62 – Coleta das amostras extrudadas e moldadas	91
Figura 63 – Amostras extrudadas e moldadas armazenadas aguardando realização dos ensaios.	91
Figura 64 – Amostra pronta para o ensaio de compressão axial	92
Figura 65 – Calibração do software Image J por meio da informação das medidas conver- tidas em pixels	93
Figura 66 – Obtenção da área por contorno da figura e comando "Measure"	94
Figura 67 – Corpos de prova armazenados aguardando realização dos ensaios (A); Amostra após o corte pronta para a compressão axial (B)	95
Figura 68 – Ensaio de compressão axial	95
Figura 69 – Coleta das amostras extrudadas e moldadas	96
Figura 70 – Amostras impressas e moldadas aguardando a realização do ensaio	96
Figura 71 – Amostra impressa e moldada no ensaio de tração na flexão	97
Figura 72 – Corpos de prova armazenados aguardando realização dos ensaios	98
Figura 73 – Amostra aguardando a realização do ensaio	99
Figura 74 – Corpos de prova cortados para o ensaio de aderência ainda em estado fresco	100

Figura 75 – Esquemas de ensaio	101
Figura 76 – Acessórios para o ensaio de aderência entre camadas	102
Figura 77 – Acessórios para o ensaio de aderência entre camadas montados na prensa	102
Figura 78 – Amostra retificada	103
Figura 79 – Corpos de prova aguardando o ensaio de aderência entre camadas	103
Figura 80 – Acessórios e novo esquema de ensaio	104
Figura 81 – Amostra pronta para o ensaio de aderência entre camadas	104
Figura 82 – Corte das amostras e abertura do chanfro	105
Figura 83 – A) Amostras cortadas prontas para a realização do ensaio; B) Abertura do chanfro.	106
Figura 84 – Amostras prontas para a colagem nas pastilhas	106
Figura 85 – Amostra após colagem e peso de 1Kg sobre elas	107
Figura 86 – A) Amostras coladas apoiadas sobre a segunda pastilha após 3 horas de início da colagem; B) Amostras apoiadas sobre as ripas de madeira após 6 horas de colagem.	108
Figura 87 – Amostra pronta para o ensaio de aderência entre camadas	109
Figura 88 – Microtomógrafo SkyScan-Bruker 1173	110
Figura 89 – Local de corte da amostra prismática submetida ao ensaio de μ -CT	110
Figura 90 – Curva a/c pasta p_ref	113
Figura 91 – Curva a/c pasta p_HPMC	114
Figura 92 – Curva a/c pasta p_5MC	115
Figura 93 – Curva a/c pasta p_10MC	116
Figura 94 – Tempos de pega da pasta p_ref	118
Figura 95 – Tempos de pega da pasta p_HPMC	118
Figura 96 – Tempos de pega da pasta p_5MC	119
Figura 97 – Tempos de pega da pasta p_10MC	119
Figura 98 – Tempos de pega da pasta p_30MC	120
Figura 99 – Largura da camada para cálculo do coeficiente de variação	122
Figura 100 –Espectro de cores da câmera termográfica	126
Figura 101 –Visualização das camadas para a imagem termográfica, A) HPMC; B) 10MC e C) 30MC.	126

Figura 102 –Temperatura superficial da primeira camada das amostras, A) HPMC; B) 10MC e C) 30MC	127
Figura 103 –Visualização das camadas para a imagem termográfica, A) HPMC; B) 10MC e C) 30MC.	127
Figura 104 –Temperatura superficial da segunda camada das amostras, A) HPMC; B) 10MC e C) 30MC	127
Figura 105 –Visualização transversal de duas camadas	128
Figura 106 –Visualização transversal de três camadas. A)HPMC; B)10MC; C)30MC.	128
Figura 107 –Visualização transversal de três camadas. A)HPMC; B)10MC; C)30MC.	129
Figura 108 –Umidade superficial entre as duas camadas. A)HPMC; B)10MC; C)30MC.	129
Figura 109 –Resistência à compressão média das amostras moldadas aos 21 e aos 63 dias	131
Figura 110 –Resistência à compressão média das amostras extrudadas em duas camadas aos 63 dias	132
Figura 111 –Amostra após o rompimento	133
Figura 112 –Resistência à tração na flexão média das amostras moldadas aos 63 dias	134
Figura 113 –Resistência à tração na flexão média das amostras em duas camadas aos 63 dias	135
Figura 114 –Momento do ensaio de tração na flexão.	136
Figura 115 –Ensaio de tração na flexão.	136
Figura 116 –Resistência de aderência média entre camadas aos 165 dias.	137
Figura 117 –Amostra após ser submetida à tração direta	138
Figura 118 –Amostra após ser submetida à tração direta	139
Figura 119 –Amostras após o rompimento	139
Figura 120 –Momento do rompimento da amostra	140
Figura 121 –Porosidade total da amostra HPMC e da faixa da interface	141
Figura 122 –Porosidade total da amostra 10MC e da faixa da interface	142
Figura 123 –Porosidade total da amostra 30MC e da faixa da interface	143
Figura 124 –Porosidade total das amostra e da faixa da interface	144
Figura 125 –Microtomografia de HPMC	145
Figura 126 –Microtomografia de 10MC	145
Figura 127 –Microtomografia de 10MC	146
Figura 128 –Comparação entre as imagens de microtomografia para as três amostras	146

Figura 129 –Gancho metálico "S"com a amostra pronta para o ensaio	158
Figura 130 –Gancho metálico com a amostra pronta para o ensaio	159
Figura 131 –Falha na solda	159
Figura 132 –Rompimento logo após a cola	159
Figura 133 –Legenda dos esquemas de ensaio	161
Figura 134 –Resistência à tração direta média das argamassas HPMC, 10MC E 30MC. . .	162
Figura 135 –Tipos de ruptura encontradas	163
Figura 136 –Rompimento na interface	163
Figura 137 –Interface de ruptura da argamassa HPMC	164
Figura 138 –Interface de ruptura da argamassa com 10% de metacaulim	164
Figura 139 –Interface de ruptura da argamassa com 30% de metacaulim	165
Figura 140 –Esquema ilustrativo da ocorrência das rupturas obtidas por meio do ensaio de resistência de aderência entre camadas pelo ensaio de tração	166
Figura 141 –Corpo de prova cúbico com ranhuras	167
Figura 142 –Corpo de prova cúbico com chanfro	167
Figura 143 –Ruptura com o método da ranhura	168
Figura 144 –Ruptura com o método do chanfro	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre amostras de Cimento Portland e Cimento Sulfo-Aluminoso	37
Tabela 2 – Materiais cimentícios e adições promissoras para a impressão 3D	38
Tabela 3 – Resultado dos ensaios de compressão axial com CP V, cal e metacaulim	43
Tabela 4 – Resistência de aderência obtida pelos autores	61
Tabela 5 – Características químicas e físicas do cimento Portland CP II F-40	67
Tabela 6 – Granulometria da areia	67
Tabela 7 – Ensaios e resultados do agregado miúdo	68
Tabela 8 – Caracterização químicas do metacaulim	69
Tabela 9 – Características físicas do metacaulim	69
Tabela 10 – Proporção dos materiais para as pastas	70
Tabela 11 – Proporção dos materiais para as pastas de caracterização	70
Tabela 12 – Proporção dos materiais para as argamassas	71
Tabela 13 – Quantidade dos materiais para as pastas	73
Tabela 14 – Resumo do experimento - Pasta	76
Tabela 15 – Quantidade dos materiais para as argamassas	76
Tabela 16 – Resumo de ensaios para caracterização da argamassa	83
Tabela 17 – Resumo dos ensaios de propriedades mecânicas	90
Tabela 18 – Dimensões das amostras destinadas aos ensaios de aderência entre camadas	100
Tabela 19 – Valores de água para a pasta p_ref	112
Tabela 20 – Valores de água para pasta p_HPMC	113
Tabela 21 – Valores de água para pasta p_5MC	114
Tabela 22 – Valores de água para a pasta p_10MC	115
Tabela 23 – Valores de água para a pasta p_30MC	116
Tabela 24 – Composição das pastas para realização do ensaio de início e fim de pega	117
Tabela 25 – Relação entre os tempos de pega das pastas	117
Tabela 26 – Relação entre os tempos de pega das pastas p_10 e p_30	121
Tabela 27 – Espessura da amostra HPMC - CAMADA 1	122
Tabela 28 – Espessura da amostra 10MC - CAMADA 1	123
Tabela 29 – Espessura da amostra 30MC - CAMADA 1	123
Tabela 30 – Caracterização das argamassas - Ensaio de Consistência	124

Tabela 31 – Densidade da massa e ar incorporado	124
Tabela 32 – Retenção de água das argamassas	125
Tabela 33 – Resistência à compressão média* das amostras moldadas aos 21 dias . . .	130
Tabela 34 – Resistência à compressão média* das amostras moldadas aos 63 dias . . .	131
Tabela 35 – Resistência à compressão média* das amostras impressas em duas camadas aos 63 dias	132
Tabela 36 – Resistência à tração na flexão média* das amostras moldadas aos 63 dias .	134
Tabela 37 – Resistência à tração na flexão média* das amostras impressas em duas camadas aos 63 dias	135
Tabela 38 – Resistência de aderência média* entre as camadas das amostras impressas aos 165 dias	137
Tabela 39 – Ensaio de tração direta para a aderência entre camadas	160
Tabela 40 – Média da resistência obtida no ensaio de tração direta	161
Tabela 41 – Áreas para as amostras moldadas e ensaiadas aos 21 dias pelo Image J . .	170
Tabela 42 – Áreas para as amostras moldadas e ensaiadas aos 63 dias pelo Image J . .	170
Tabela 43 – Áreas para as amostras em duas camadas e ensaiadas aos 63 dias pelo Image J	170
Tabela 44 – Medidas para o cálculo de resistência de tração na flexão para amostras moldadas	170
Tabela 45 – Áreas para as amostras do ensaio de aderência entre camadas após a metodologia de corte	171

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Preparo das pastas	73
Quadro 2 – Procedimento para a determinação dos tempos de pega com o uso do Vicatronic	75
Quadro 3 – Procedimento de mistura das argamassas	76
Quadro 4 – Qualidade de impressão.	80
Quadro 5 – Procedimentos para obtenção da área por meio do software Image J.	95
Quadro 6 – Metodologia de corte das amostras.	103
Quadro 7 – Procedimentos para o ensaio de tração direta para aderência entre camadas.	105
Quadro 8 – Resumo para o ensaio de aderência entre as camadas.	107

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa	20
1.2	Questão de pesquisa	22
1.3	Objetivos	22
1.3.1	Objetivo Geral	22
1.3.2	Objetivos Específicos	23
1.4	Delimitação de pesquisa	23
1.5	Contribuição esperada	23
1.6	Termos principais	23
1.7	Estrutura da dissertação	24
1.8	Grupo de pesquisa	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	Impressão 3D aplicada à construção civil	26
2.2	Materiais cimentícios para a impressão 3D	36
2.2.1	Cimento	38
2.2.2	Agregado	40
2.2.3	Adições minerais	41
2.2.4	Aditivos químicos	43
2.3	Propriedades de materiais cimentícios aplicados à impressão 3D	44
2.3.1	Propriedades de materiais cimentícios aplicados à impressão 3D em estado fresco	44
2.3.2	Estudo da umidade por meio da termografia	48
2.3.3	Propriedades de materiais cimentícios aplicados à impressão 3D em estado endurecido	51
2.3.4	Ensaio de compressão	53
2.3.5	Ensaio de tração na flexão	55
2.3.6	Ensaio de aderência entre camadas	57
2.3.7	Microestrutura das camadas de materiais cimentícios impressos	62
3	MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1	Materiais	66

3.1.1	Cimento Portland CP II F-40	67
3.1.2	Areia	67
3.1.3	Metacaulim	68
3.1.4	Aditivo Químico hidroxipropilmetilcelulose (HPMC)	69
3.1.5	Água	69
3.2	Misturas e proporções para os materiais cimentícios	70
3.3	Campanha Experimental	71
3.3.1	Campanha experimental 1	71
3.3.1.1	Ensaio em pasta	72
3.3.1.2	Ensaio em argamassa - Extrudabilidade e qualidade de impressão	76
3.3.2	Campanha experimental 2	81
3.3.2.1	Ensaio de consistência	81
3.3.2.2	Ensaio de densidade da massa e teor de ar incorporado	83
3.3.2.3	Ensaio de retenção de água	83
3.3.2.4	Termografia para análise de umidade superficial	84
3.3.3	Campanha Experimental 3	86
3.3.4	Resistência à compressão	90
3.3.5	Resistência à tração na flexão	95
3.3.6	Aderência entre camadas	99
3.3.7	Microtomografia computadorizada de raio - X (μ -CT)	109
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	112
4.1	Campanha experimental 1	112
4.1.1	Consistência Normal	112
4.1.2	Início e fim de pega	117
4.1.3	Extrudabilidade e qualidade de impressão - Argamassa	122
4.2	Campanha experimental 2	123
4.2.1	Consistência	123
4.2.2	Densidade de massa e ar incorporado	124
4.2.3	Retenção de água	125
4.2.4	Umidade superficial - Câmera termográfica	125
4.3	Campanha experimental 3	130
4.3.1	Ensaio de compressão axial	130

4.3.2	Ensaio de tração na flexão	133
4.3.3	Ensaio de aderência entre camadas	137
4.3.4	Microestrutura: Análise por microtomografia computadorizada de raios-X (μ -CT)	140
5	CONCLUSÃO	148
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	149
	REFERÊNCIAS	151
	 APÊNDICES	 157
	APÊNDICE A – ADAPTAÇÕES DO ENSAIO E TESTES	158
	APÊNDICE B – ÁREAS OBTIDAS PELO SOFTWARE IMAGE J E MEDI-	
	DAS UTILIZADAS PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLE-	
	XÃO E ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS	170

1 INTRODUÇÃO

Compostos cimentícios, como concreto e argamassa, são os materiais de construção mais utilizados em todo o mundo, porém com os avanços tecnológicos, as limitações da construção civil convencional foram evidenciadas, sendo esta indústria uma das mais atrasadas em termos de desenvolvimento tecnológico (WITZKE, 2018). Neste sentido se faz indispensável a inserção de mecanismos visando a inovação, produtividade, eficiência e sustentabilidade.

Neste contexto, o processo de impressão 3D vem como alternativa promissora para o cenário de construção civil, promovendo a fabricação de elementos construtivos de maneira automatizada sem custos extras e desperdícios, como mostram Salman *et al.* (2021), explicitando que a fabricação e instalação de formas juntamente com o custo de mão de obra representa cerca de 2/3 do orçamento total da construção, ou seja, reduzindo esse valor com o uso desta tecnologia é possível baratear significativamente a obra e diminuir os resíduos.

Essa necessidade foi evidenciada pela Nasa com o objetivo de construir uma base lunar com o uso de impressoras 3D para abrigar astronautas em futuras viagens ao espaço, criando uma tecnologia de proteção contra condições adversas, como temperaturas extremas, radiação e chuva de micrometeoritos (NOGUEIRA, 2020). Assim, Ballard (2020) destaca que construir o primeiro lar da humanidade em outro lugar será o projeto de construção mais ambicioso da história, levando ciência, engenharia, tecnologia e arquitetura a novas alturas.

O processo de impressão 3D proposto para a construção da base lunar aplicado a construção civil foi chamado de Contour Crafting (CC), que consiste em uma tecnologia de fabricação aditiva com objetivo de controlar de forma eletrônica a deposição de camadas criando superfícies planas (KAZEMIAN *et al.*, 2017), possuindo como vantagens o uso de matérias primas com baixa energia incorporada, redução do número de acidentes de trabalho, economia de tempo, com aspectos de inovação tecnológica e sustentabilidade (HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016).

Entre a matéria prima, o processo de impressão e o produto final, existe uma interdependência significativa, sendo ainda mais pronunciada em materiais cimentícios (REITER, 2018). A mistura para a obtenção de um concreto imprimível tem sido objeto de estudo por muitos pesquisadores, que se deparam com impasses a respeito dos requisitos que o material deve cumprir que garanta as características corretas de trabalhabilidade, construtibilidade e conformidade geométrica (PUTTEN *et al.*, 2019).

De acordo com Silva (2023), pesquisas existentes sobre os componentes do material cimentício, em sua maioria, tem focado no cimento Portland Comum (OPC) e ainda examinaram o efeito de diferentes adições como: controladores de tempo de pega, agentes dispersantes e superplastificantes, modificadores de viscosidade, bem como materiais cimentícios complementares e aditivos pozolânicos como sílica ativa, cinza volante e metacaulim (MC) (KHAN; SANCHEZ; ZHOU, 2020b).

A adição do (MC) à pasta cimentícia faz com que a construtibilidade do material seja melhorada (CHEN *et al.*, 2020). De acordo com Khan, Sanchez e Zhou (2020a) o efeito de retração também é mitigado e a adequada adição aumenta a resistência à compressão e tração na flexão do material, (CHEN *et al.*, 2020) também mostraram que a adição de metacaulim foi benéfica para diminuir a deformabilidade.

Com relação ao aditivo químico, têm-se informações de que o hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), éter de celulose não iônico, também favorece as propriedades mecânicas do material cimentício, sendo uma alternativa de adição promissora para materiais imprimíveis, ele tem uma capacidade de retenção de água que se mantém estável com pouca variação de temperatura em produtos à base de cimento e proporciona um aumento do tempo em aberto (GENG *et al.*, 2020).

Além disso, Geng *et al.* (2020) verificou por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) que a adição de (HPMC) otimiza a estrutura dos microporos do material, que influencia diretamente a ligação entre as camadas do composto impresso, este aditivo melhora a estrutura dos microporos, resultando em uma microfissura muito fina e alongada que faz com que haja maior aderência da interface.

A tecnologia de impressão 3D de materiais cimentícios sobrepõe o material camada por camada e este modo de deposição pode resultar em uma união fraca entre as camadas Sanjayan *et al.* (2018), Wolfs, Bos e Salet (2019), Padilha (2020), já que a ideia é não existir nenhum tipo de adesivo ou armadura e isto pode interferir no desempenho mecânico do elemento (GENG *et al.*, 2020). Portanto, conhecer os principais fatores que influenciam na ligação da interface da camada é importante para o desenvolvimento de mecanismos que fortaleçam essa ligação.

As principais propriedades mecânicas requeridas por elementos de concreto produzidos por impressão 3D ainda são pouco exploradas, deste modo não existem normas específicas para ensaios a fim de determinar a resistência da ligação das camadas impressas, compressão e testes de tração na flexão, sendo importante a determinação confiável destas propriedades, principalmente com a expansão de projetos de construções com o uso da tecnologia de impressão 3D (WOLFS; BOS; SALET, 2019).

Portanto, o presente trabalho propõe estudar estas propriedades com o uso de misturas promissoras para o processo de impressão 3D com adição de metacaulim (MC) e (HPMC) e desenvolver um método de ensaio de aderência entre camadas, visando diminuir a alta variabilidade de resultados obtidos por alguns autores como Sanjayan *et al.* (2018) e Padilha (2020) com adaptações do método da ASTM D724-12.

1.1 Justificativa

A tecnologia de impressão 3D aplicada à construção civil representa a automação desta indústria que visa a otimização da produção e diminuição dos impactos ambientais. A neces-

sidade de trazer para o setor essa tecnologia, que é um modelo de manufatura aditiva, se faz cada vez mais importante para a modernização das técnicas construtivas objetivando a sustentabilidade.

O processo produtivo de impressão 3D de estruturas se inicia basicamente no modelo digital em software de modelagem, onde o projeto é seccionado em diversas partes 2D e o programa, com as instruções, envia os comandos até a impressora que é responsável pela deposição do material camada por camada fazendo com que a construção tome forma. Vale destacar que a deposição acontece somente no local projetado evitando desperdícios.

Apesar do avanço deste processo e das vantagens de sua aplicação, estruturas construídas exclusivamente por impressão 3D ainda não são realidade comercial, as operações já desenvolvidas e documentadas, envolvem alguma etapa manual como transporte das peças ou montagem. De acordo Pileggi (2022), a empresa chinesa Winsun construiu 10 casas em um dia, com área de 195 m^2 a um custo de US\$ 4800 e um prédio em Dubai em 17 dias com 6,6 metros de altura, 10 metros de largura e 40 metros de comprimento com custo em torno de US\$ 140 mil.

Portanto, as principais vantagens do uso desta tecnologia correspondem a economia e otimização do tempo de construção, no Brasil existem duas startups que já construíram uma casa impressa em 3D, possuindo 66 m^2 com tempo de impressão de 48 horas (PILEGGI, 2022). Além disso, a não utilização de formas e elementos de ancoragem, menor consumo de recursos como mão-de-obra e energia, aumenta produtividade e contribui com o desenvolvimento sustentável.

Porém, para se obter um resultado de fato satisfatório, um dos fatores mais importantes é que o material seja imprimível, para isto é necessário estudar desde dosagem e a interação dos materiais até as propriedades mecânicas em estado endurecido, que corresponde a compressão, tração na flexão e aderência entre as camadas, é importante destacar que o tipos de materiais escolhidos para a mistura influenciam diretamente o comportamento mecânico.

De acordo com a literatura, autores como Khan, Sanchez e Zhou (2020c) e Tang *et al.* (2019) utilizaram no desenvolvimento de materiais aplicado a impressão 3D, o cimento sulfoaluminoso, que possui características que facilitam a impressão, com a não de comercialização deste no Brasil, seu uso se torna inviável, deste modo deve-se estudar a substituição e adequação dos cimentos nacionais comercializados afim de se obter características semelhantes.

O metacaulim (MC) é um composto mineral promissor para ser acrescentado ao material cimentício e de acordo com as suas características físico químicas, têm-se que sua substituição ou adição a depender das proporções utilizadas, pode promover uma redução na consistência e aumento no intervalo dos tempos de pega de concretos aplicados a impressão 3D, acarretando também em uma diminuição significativa do consumo de cimento (TANG *et al.*, 2019).

Além disso, Chen *et al.* (2020) pontua que a adição de (MC) ou substituição parcial do cimento em materiais cimentícios contribui para melhoria da tensão de escoamento, característica que faz com que o material suporte o próprio peso e diminui a deformação do produto

extrudado. O uso do aditivo químico (HPMC), influencia o índice de consistência e a retenção de água, que promove maior trabalhabilidade, melhor adesão e resistência, sendo características importantes para uma material imprimível.

Além de determinar a mistura cimentícia para que se estabeleça o melhor tipo de material a ser aplicado na impressora (que já possui variáveis como o bombeamento, bocal, velocidade), é importante o estabelecimento de parâmetros em estado endurecido desta mistura, neste sentido têm-se uma complexidade na determinação dos ensaios como compressão, tração na flexão e aderência entre camadas, comprovado com a alta variabilidade de resultados apresentados por Geng *et al.* (2020); Ma *et al.* (2020) ; Padilha (2020); Sanjayan *et al.* (2018); Wolfs, Bos e Salet (2019); Baz, Aouad e Remond (2020) e Le *et al.* (2012a).

Portanto, a falta de uma metodologia e avaliação do comportamento mecânico destes materiais, limita o uso da tecnologia de impressão 3D. Destaca-se ainda que durante a impressão podem surgir vazios entre as camadas, constatado por Geng *et al.* (2020), o que compromete diretamente a aderência e ligação interface e portanto, a estabilidade e durabilidade da estrutura. A determinação da resistência entre essas camadas impressas é um dos maiores obstáculos para a maior consolidação deste processo construtivo.

Neste sentido o estudo da composição e do processo de produção de materiais imprimíveis, desde as propriedades em estado fresco até endurecido se faz importante e necessário para estabelecer normas e parâmetros de impressão e possibilitar a difusão desta tecnologia como modelo de manufatura aditiva (que engloba a impressão 3D) em edificações maiores e em larga escala.

1.2 Questão de pesquisa

Qual a influência dos materiais utilizados na composição de compostos cimentícios desenvolvidos para a impressão 3D no que diz respeito as propriedades mecânicas e a aderência entre as camadas impressas?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho mecânico e a aderência entre camadas de materiais cimentícios impressos em impressora 3D de bancada com uso do aditivo químico hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e substituição de metacaulim (MC) em diferentes porcentagens em relação a massa de cimento.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver materiais cimentícios extrudáveis com (MC) e (HPMC);
- Avaliar a influência da incorporação das diferentes porcentagens de (MC) e do uso do (HPMC) na umidade superficial das camadas e na interface do material;
- Relacionar os resultados do ensaio de termografia com a umidade superficial das diferentes amostras;
- Elaborar um procedimento de ensaio de tração direta a fim de determinar a resistência de aderência entre as camadas impressas.
- Verificar a porosidade da interface para cada mistura por meio da microtomografia computadorizada de raio-X (μ -CT)

1.4 Delimitação de pesquisa

A pesquisa delimitou-se a estudar as propriedades mecânicas de materiais cimentícios impressos por meio de um protótipo com parâmetros pré fixados, com dimensão de 1 m^2 , traço de 1:1,5 em massa e adição mineral de metacaulim (MC) de 0, 10 e 30% em relação ao cimento e uso de 0,3% aditivo químico hidroxipropilmetilcelulose (HPMC).

1.5 Contribuição esperada

Fornecer insumos para novas ideias sobre materiais de impressão 3D que otimizem as propriedades mecânicas e contribuam com uma maior durabilidade da construção, com maior resistência entre camadas impressas, sendo verificada por meio de métodos de ensaio de compressão, tração na flexão e tração direta a fim de obter a resistência entre as camadas, que sejam facilitados e padronizados.

1.6 Termos principais

1. Manufatura aditiva: processo de manufatura 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. Contrutibilidade: 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 argamassas).
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.
7. Material extrudado moldado: material que passou pelo processo de impressão, saindo pelo bocal, sendo depositado em um molde;
8. Material extrudado em camadas: material impresso de acordo com o caminho de impressão definido;
9. Relação água/cimentício (a/cim): valor correspondente a água em relação a massa de cimento + metacaulim.

1.7 Estrutura da dissertação

No primeiro capítulo apresnetta-se a introdução e contextualização a respeito do tema, explicitando a importância e aspecto de inovação da impressão 3D, as principais vantagens de sua aplicação na construção civil, os desafios e principais problemas que podem surgir no que diz respeito a resistência e durabilidade da estrutura e justificando a necessidade da investigação das propriedades mecânicas deste material, no mesmo capítulo é apresentado os objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo compõe a revisão bibliográfica, apresentando os conceitos e difusão da impressão 3D no Brasil e no mundo, bem como os materiais promissores para a mistura do composto cimentício, a influência das adições neste material e as propriedades mecânicas a partir da micro e macroestrutura do elemento.

No terceiro capítulo é apresentada a descrição do método de caracterização, desde a determinação da relação água/cimentício da pasta para a obtenção do traço da argamassa, até a caracterização desta argamassa para a aplicação aos ensaios de umidade superficial, estado endurecido e microscopia eletrônica de varredura.

O quarto capítulo traz a apresentação dos primeiros resultados obtidos com a pesquisa e as discussões pertinentes.

O quinto capítulo será de conclusão deste documento, com base na relação dos objetivos propostos com os resultados obtidos.

Ao final da pesquisa é apresentada as referências bibliográficas consultadas e utilizadas, possibilitando o caminho e conclusão deste trabalho.

1.8 Grupo de pesquisa

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 os trabalhos:

- Trabalho de conclusão de curso da discente Ester Meira Ramos Amorim, com o título: “Avaliação no estado fresco de argamassas 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 argamassas 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".

E com a tese de doutorado qualificada e em andamento para a defesa da discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv) da UEL, Livia Fernanda Silva, com o título: "Materiais cimentícios suplementares desenvolvidos com metacaulim e HPMC para impressão 3D: influência nos aspectos de extrudabilidade e construtibilidade".

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”.

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 (Centro Universitário de Maringá) através do desenvolvimento dos ensaios experimentais e utilização do protótipo de impressão 3D em escala de bancada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo é apresentado o estado do conhecimento sobre a impressão 3D aplicada à construção civil. Primeiramente, é feita uma contextualização sobre o surgimento e difusão desta tecnologia ao redor do mundo e posteriormente são destacados os materiais suplementares promissores para construir um composto cimentício imprimível. Os tópicos finais deste capítulo se destinam as propriedades de materiais cimentícios aplicados à impressão 3D em estado fresco e em estado endurecido, bem como os principais ensaios e métodos utilizados para a verificação das propriedades mecânicas em macro e microestrutura.

2.1 Impressão 3D aplicada à construção civil

A impressão 3D é um modelo de tecnologia de manufatura aditiva (Additive Manufacturing - AM), que é um processo que opera diversas ferramentas) desenvolvida em 1980, sendo o primeiro maquinário produzido pela empresa 3D Systems, que hoje é referência neste mercado (BAZ; AOUAD; REMOND, 2020), com primeiro processo chamado Estereolitografia (Stereolithography, SLA) (BAZ; AOUAD; REMOND, 2020); (SANJAYAN *et al.*, 2018) e (WU; WANG; WANG, 2016a).

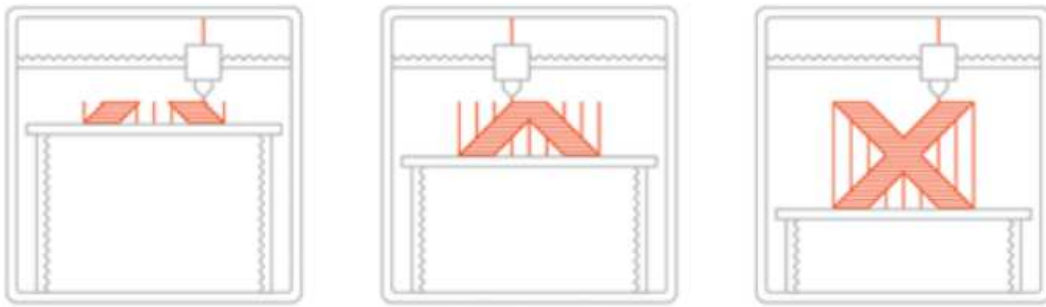
As principais técnicas de impressão utilizadas atualmente são subdivididas pela forma física com que são empregados os materiais (estado líquido, sólido ou em pó). O padrão ISO/ASTM 52900, criado em 2015, visa classificar cada um dos diferentes tipos de impressoras 3D, sendo os principais (tradução livre) (VEIT, 2018):

- Modelagem por Fusão e Deposição (FDM);
- Estereolitografia (SLA);
- Manufatura de Objetos Laminados (LOM);
- Sinterização Seletiva a Laser (SLS);
- Impressão 3D “jato de tinta” (3DP).

As técnicas mais difundidas na construção civil são: FDM, SLA e SLS. O (FDM) é o processo de impressão 3D em que um filamento do material é empurrado através de um bocal aquecido onde ocorre o derretimento e faz com que o material seja depositado em uma plataforma ao longo de um caminho pré estabelecido, assim o filamento fica trabalhável e se solidifica formando o objeto. É um dos poucos métodos aplicados a qualquer tipo de peça, inclusive concretos, com a única limitação de engessar o tamanho da impressão (ZAREIYAN; KHOSHNEVIS, 2017); (SANJAYAN *et al.*, 2018).

Na Figura 1 é possível observar de forma simplificada o processo de impressão (FDM).

Figura 1 – Modelo de impressão FDM



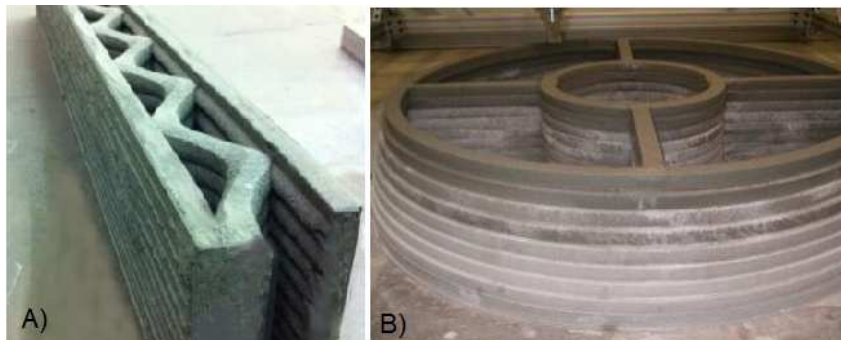
Fonte: Adaptado de 3DLAB (2022).

Assim como representado na figura, este processo se dá por extrusão, sendo mais explorado e viável para fabricação em larga escala, onde o material é extrudado por um bocal montado em pórtico, guindaste ou braço robótico, que imprime camada por camada da estrutura, fazendo com que o (FDM) seja um dos mais indicados para a construção (SANJAYAN *et al.*, 2018).

O processo Contour Crafting (CC) é semelhante ao (FDM) se diferenciando na fase de aquecimento e fusão durante a extrusão, que não ocorre no (CC). O sistema (CC) é comandado por um computador e também se constitui por um pórtico que transporta o bocal até o local da construção, se movimentando em duas faixas paralelas, que possibilita uma casa ou conjunto de casas, serem construídas automaticamente, em um único movimento do bocal.

A Figura 2, mostra a aplicação da Tecnologia Contour Crafting.

Figura 2 – Tecnologia Contour Crafting: A) Parede de concreto armado extrudado; B) Construção modelo para missão Marte/Lua



Fonte: Adaptado Lau (2014).

Na Figura têm-se os projetos que representam os estudos iniciais com o uso dessa tecnologia por extrusão, que atualmente está liderando o setor, com características de melhor qualidade de superfície e maior velocidade de fabricação (BUSWELL *et al.*, 2020).

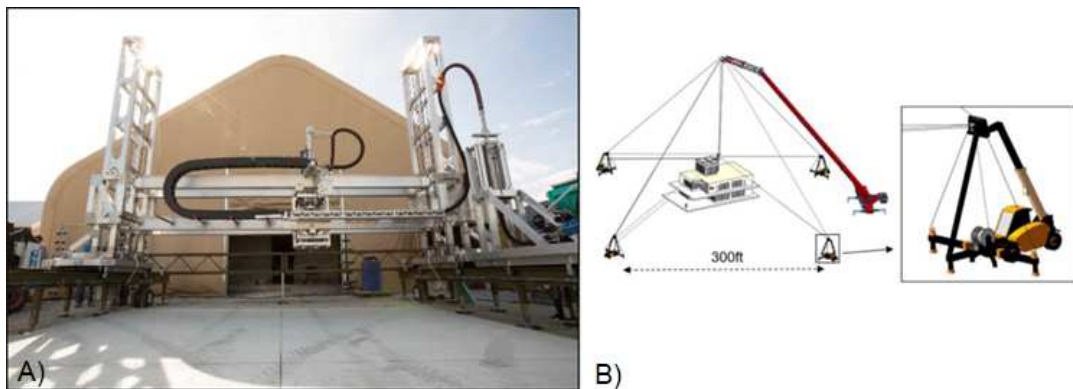
O laboratório de pesquisa United States Army Corps of Engineers (USACE) juntamente com o National Aeronautics and Space Administration (NASA), também utiliza a extrusão de materiais cimentícios, porém com foco na articulação tridimensional do equipamento, o que permite maior liberdade de geometrias e dimensões menores de bocais. O protótipo feito pela

(USACE) é chamado de Sistema de Construção Automatizada de Estruturas Expedicionárias (ACES) e conta com um pórtico robótico móvel que propõe otimizar o tempo de construção (MULLER et. Al, 2018).

Diferente dos sistemas de pórticos, pesquisadores do Oak Ridge National Laboratory's, (Tennessee, EUA), desenvolveram um sistema de deposição controlado por cabos visando permitir a construção por extrusão automatizada de edifícios, sistema conhecido como SkyBAAM, que consiste em eixos controlados por quatro estações base e suspenso por um único guindaste, sua instalação em obra é rápida e requer preparação mínima do local de obra (CHESSER BRIAN K. POST; GAUL, 2020).

A Figura 3 mostra este dois processos de construção.

Figura 3 – Sistema de construção automatizada de Estruturas Expedicionárias (ACES) (A) SkyBAAM da ORNL (B).

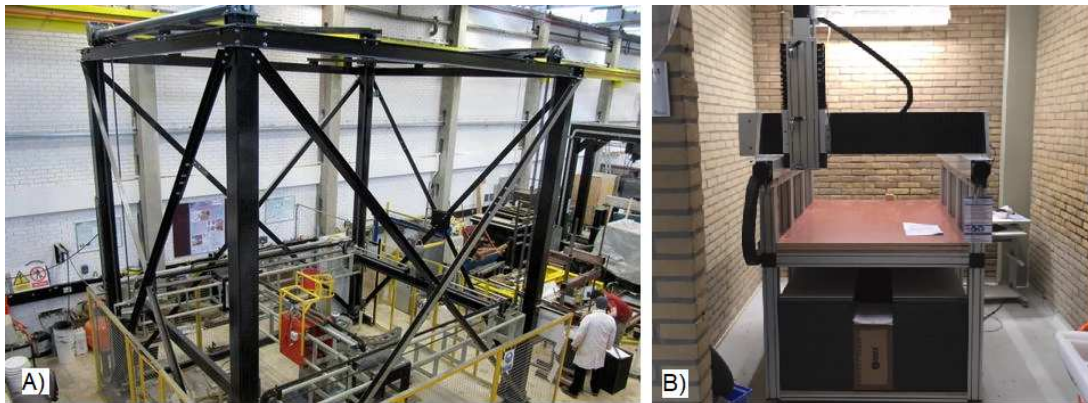


Fonte: Adaptado de Muller et al. (2018) e Cheesser (2018).

O sistema (ACES) é que o mais se parece com a tecnologia Concrete Printing (3DCP), da Universidade Loughborough, que também é dado por extrusão e permite maior liberdade geométrica e maior precisão das dimensões interna e externa das peças produzidas (LIM *et al.*, 2012).

A Concrete Printing é possível com uma impressora que possui um cabeçote controlado digitalmente para se movimentar nos três eixos por meio de três vigas de aço acionadas por corrente, no topo do cabeçote é acoplado um reservatório contendo o material e conectado a uma bomba que transportá-o até o bocal de impressão (LE *et al.*, 2012a), mostrado na Figura 4 a).

Figura 4 – Equipamento de impressão do sistema Concrete Printing



Fonte: Adaptado de (LE *et al.*, 2012a) e (LINDE *et al.*, 2022).

A Figura 4 b) mostra o equipamento de impressão da Concrete Printing de Linde *et al.* (2022). Para os dois maquinários este processo se dá em três etapas que correspondem a : modelagem de dados em Computer Aided Design (CAD), conversão no formato de arquivo específico para o software compatível com a impressora e envio das informações para a mesma, na Figura 4 a), o equipamento possui dimensões de (5,4 x 4,4 x 5,4) m (BUSWELL *et al.*, 2020) e em 4 b) possui capacidade de impressão em volume de (1 x 0,6 x 0,35) m (LINDE *et al.*, 2022).

Os processos de Concrete Printing e Contour Crafting são os principais métodos de impressão atuais, sendo pilotos para novas tecnologias aplicadas à construção civil que seguem etapas análogas a eles com diferença no maquinário e tipo de obra pretendida (BUSWELL *et al.*, 2020). A extrusão do material cimentício produz um filamento contínuo com velocidade e formato do bocal ajustáveis de acordo com a necessidade do projeto, podendo ser oval ou retangular e com taxas lineares de extrusão de 50 mm/s a 500 mm/s.

Além das técnicas citadas anteriormente, a empresa WinSun de Xangai, na China, utiliza o sistema chamado: WinSun 3D printed building system, sendo semelhante ao Contour Crafting, mas com espaço interno das paredes em forma de treliça com a finalidade de facilitar a instalação de tubulações e garantir maior resistência.

A WinSun (2022) afirma que usando tecnologias de impressão 3D, como impressora de (150 x 10 x 6,6) metros de dimensão foi possível imprimir um sobrado e um prédio de 5 andares. Os projetos demonstram a aplicabilidade da impressão 3D em edifícios de grande porte, a Figura 5 mostra a obra do do edifício A) e do sobrado B) em andamento.

Figura 5 – Obras impressas pela empresa WinSun - Edifício A); Sobrado em andamento B).



Fonte: Wu, Wang e Wang (2016b).

O prédio da Figura 5 A) é o primeiro do mundo feito por uma impressora 3D, as estruturas foram montadas e armadas no local e os pilares foram feitos a partir de uma forma impressa conforme a Figura 6. A resistência do concreto utilizado neste tipo de construção deve ser superior ao utilizado em obras convencionais, Wu, Wang e Wang (2016b) pontuam que para isto a WinSun já utilizou fibras de vidro e fibras de carbono, porém ainda é indispensável a armação de elementos estruturais como pilares e vigas em sobrados e edifícios, a vantagem é que as próprias fôrmas podem ser impressas eliminando resíduos da desmoldagem.

Figura 6 – Fôrma utilizada para elemento estrutural sendo impresso pela empresa WinSun



Fonte: Wu, Wang e Wang (2016b).

Além destes empreendimentos, a empresa WinSun, que é líder em arquitetura e impressão 3D mundialmente detendo de 325 patentes, entrega desde obras convencionais até construções de luxo, algumas das edificações realizadas estão na Figura 7.

Figura 7 – Obras realizadas pela empresa. A) Impressão 3D em chalé de luxo; B) Impressão 3D Harvard Red Cottage; C) Escritório do governo de Dubai



Fonte: WinSun (2022).

Vale destacar que a Figura 7 a) corresponde a uma casa de $1100m^2$ impressa em 1 dia contando com 3 trabalhadores, 1 guindaste e demais instalações previstas para serem concluídas em 3 dias (WINSUN, 2022).

Assim como a WinSun, a empresa alemã Heidelberg Cement imprimiu um edifício residencial com apartamentos de aproximadamente $330 m^2$, sendo o maior com o uso desta tecnologia na Europa (ENGENHOARTE,), em Wallenhausen. A Figura 8 mostra a vista frontal e superior deste edifício.

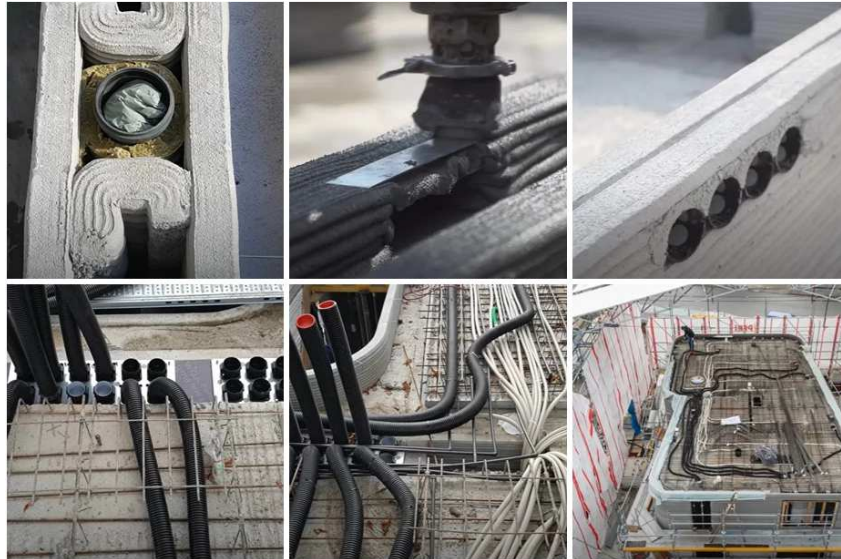
Figura 8 – Maior edifício residencial da Europa sendo construído com impressão 3D



Fonte: Engenho e Arte (2021).

As instalações elétricas e hidráulicas neste tipo de processo construtivo pode acontecer de duas formas: Com o espaçamento projetado no momento da impressão ou a partir de aberturas feitas nas paredes com o material ainda em estado fresco, para o edifício da Figura 8, foram projetadas aberturas no meio das paredes antes da impressão e previsto os caminhos dos eletrodutos na laje. A Figura 9 traz como se dá esse processo.

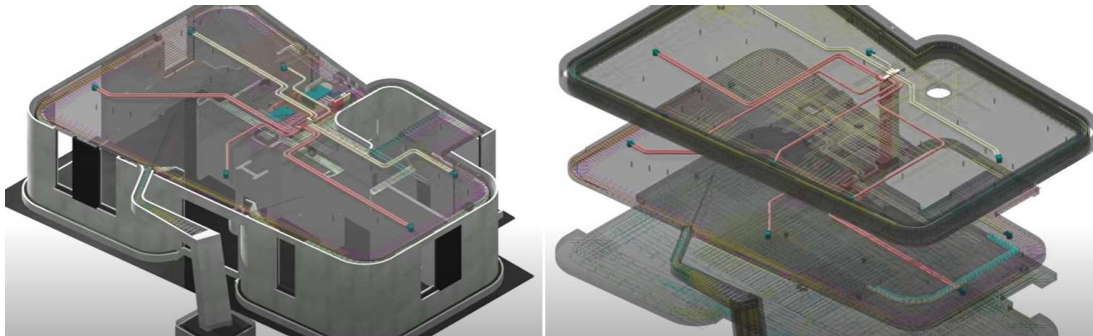
Figura 9 – Instalações técnicas do edifício



Fonte: Engenho e Arte (2021).

A determinação das instalações técnicas deve estar prevista em projeto, para facilitar a compatibilização conforme a Figura 9, o uso do conceito BIM (Modelagem de Informação da Construção) na impressão 3D tem a função de prevenir problemas quando todas as etapas forem executadas juntas e promover a alteração simultânea de projetos nos softwares.

Figura 10 – Projeto de impressão 3D de edifício com o auxílio da ferramenta BIM



Fonte: Engenho e Arte (2021).

Assim como exemplificado na Figura 10, é possível observar a junção de todas as etapas do projeto e verificar a posição das aberturas para as instalações. O BIM também permite que os usuários imprimam simplesmente clicando em um botão, assim como imprimir em uma folha de papel e possibilita a melhor comunicação entre os programas e as empresas (BUSWELL *et al.*, 2020).

Assim como citado anteriormente, o BIM nesse cenário traz mais possibilidades para a impressão 3D que incluem designs variados, facilidade de comunicação entre engenheiros projetistas e construtores e otimização com redução de desperdícios proporcionada pela integração dos projetos (LE *et al.*, 2012b).

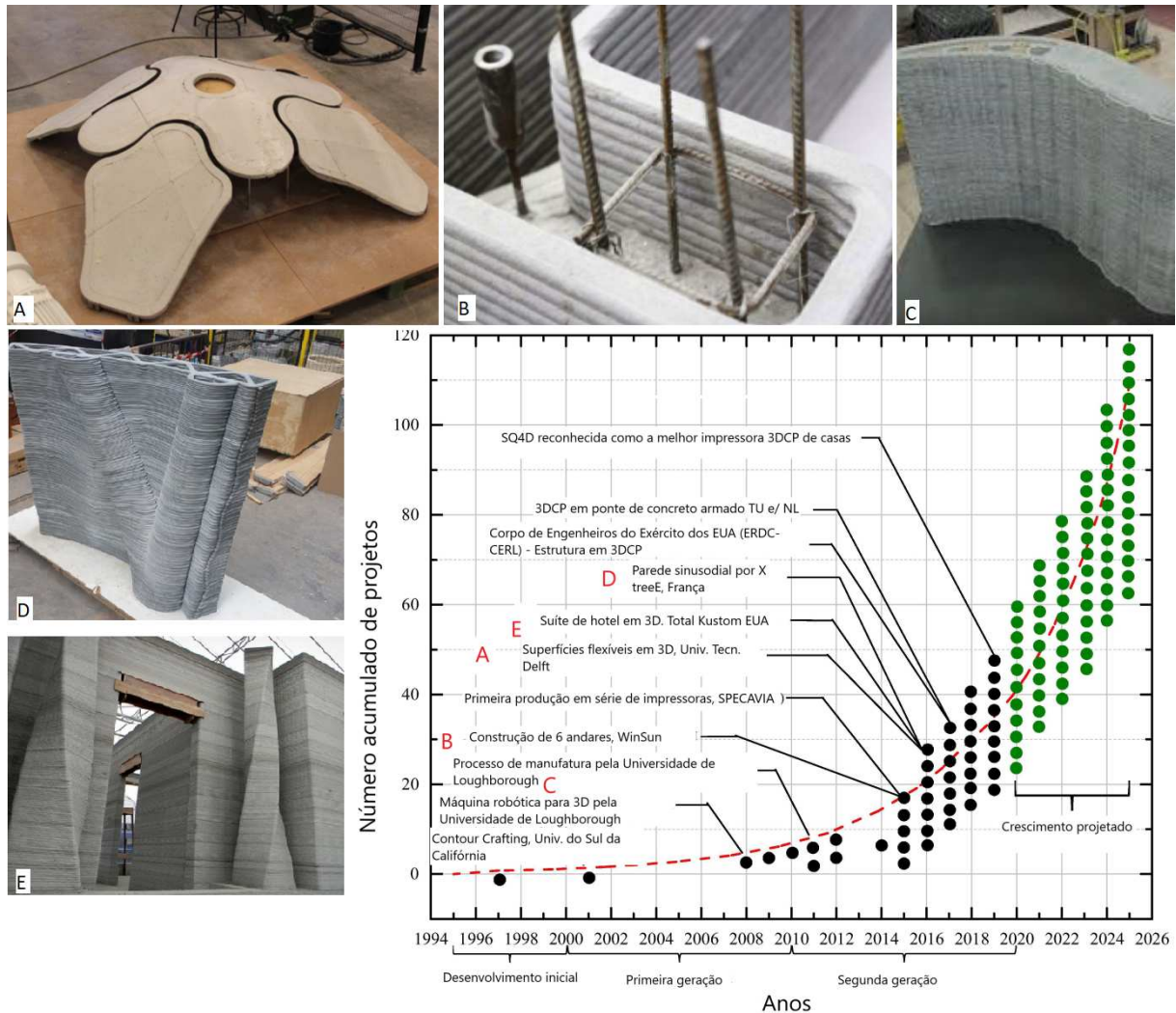
Ligada a ideia de maior possibilidade de personalização de projetos, houve um aumento da demanda de produtos impressos em 3D, o que culminou com alta competitividade, diminuição dos custos e difusão desta tecnologia de forma global (LE *et al.*, 2012b).

A impressão de concreto 3D Concrete Print por deposição de camadas, está em desenvolvimento nos últimos 10 anos, mais de 30 países estão atualmente desenvolvendo pesquisas e processos sobre isso (BUSWELL *et al.*, 2018); (SALMAN *et al.*, 2021). De acordo com Buswell *et al.* (2018) é possível construir:

- Elementos estruturais ao redor de armaduras (método mais próximo do convencional) - a) e b);
- Estruturas especiais - c) e d);
- Paredes e pilares - f).

A Figura 11 relaciona o crescimento destes processos construtivos com obras produzidas em todo mundo.

Figura 11 – Construções com o uso da tecnologia de impressão 3D em concretos pelo mundo



Fonte: Adaptado de Buswell *et al.* (2018) e Salman *et al.* (2021).

É possível observar com a Figura 11, a evolução dos materiais impressos ao longo dos anos desde os primeiros elementos estruturais até edifícios e obras de arte e a projeção desta expansão em quatro anos, que deve atingir ainda mais países.

Com isso, apesar do número de pesquisas reduzido no Brasil, a startup 3D Home Construction, projetou e executou uma casa por meio da tecnologia de impressão 3D, a casa tem $66,32 m^2$ e foi projetada para ser feita em dois dias, com dois quartos, sala, cozinha, banheiro, área de serviço e garagem.

A Figura 12 mostra a edificação sem a cobertura para possibilitar a visualização das divisões dos cômodos. O software da máquina replica a tecnologia da empresa chinesa citada anteriormente, a WinSun. O trabalho é resultado de um projeto de pesquisa na Universidade Potiguar desenvolvido pelos engenheiros civis Allyson Xavier e Iago Felipe Silva com orientação do prof. Dr. André Felipe Dantas, que fazem parte da startup. (MASSACINZENTA, 2020).

Figura 12 – Primeira casa impressa no Brasil - Macaíba (RN)



Fonte: Massa Cinzenta (2020).

Os pesquisadores responsáveis pela startup afirmam que há uma economia de cerca de 30% do valor de materiais com a casa-protótipo e que o custo por m^2 em 2020 chegou a ser em torno de 50 reais, mas que pode ainda ser reduzido com o aumento de pesquisas para otimizar a precisão e confiabilidade da impressora.

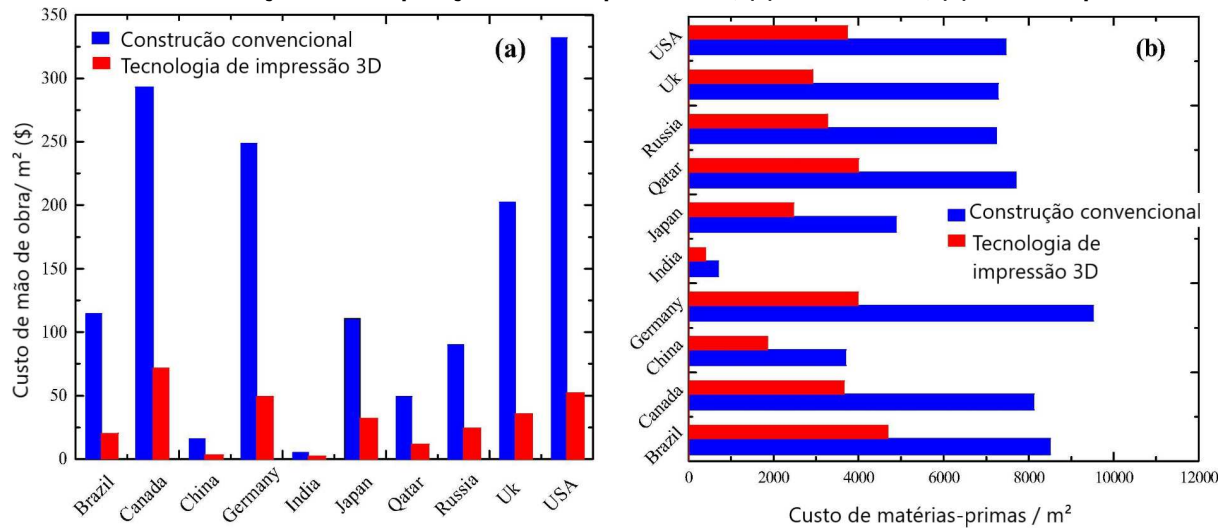
Salman *et al.* (2021) estudaram a redução do valor econômico da impressão 3D e afirmam que está ligado as propriedades mecânicas e a conformidade geométrica do projeto. Estruturas mais complexas ainda não são tão econômicas, sobretudo com o uso de materiais que envolvem aditivos químicos mais caros e design complexo.

Porém, com a otimização destes fatores juntamente com pesquisa e inovação, pode haver melhorias na metodologia construtiva e aliar-se a redução de custos de mão-de-obra e matéria-prima, causando grande impacto no orçamento da obra.

Estes valores podem ser reduzidos porque: 1- Poucos funcionários conseguem manusear o maquinário e o tempo de trabalho também é otimizado; 2- A maioria das empresas como a WinSun tem utilizado materiais sustentáveis e reciclados, como resíduos de construções locais e fibras vegetais (KIDWELL; OBISPOFOLLOW, 2017).

A Figura 2 traz um comparativo de custos de mão de obra (a) e matérias-primas (b) da impressão 3D com a construção convencional relacionando alguns países, inclusive o Brasil.

Figura 13 – Economia média de custos de mão de obra e matérias-primas usando métodos convencionais de construção em comparação com a impressão 3D; (a) mão de obra; (b) matérias-primas.



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

A partir dos gráficos da Figura 2, têm-se uma redução de 30 a 60 % das matérias-primas utilizadas na impressão 3D em relação a construção convencional e uma redução de até 80% com os custos de mão de obra.

Porém, definir os materiais cimentícios considerados imprimíveis e as matérias-primas promissoras é complexo, sendo o objeto de estudo de diversos autores como Wu, Wang e Wang (2016a), eles citam que estes materiais devem ser modificados para serem considerados aptos para este tipo de construção, possuindo uma construtibilidade suficiente quando impresso, capaz de receber as próximas camadas sem deformação ou ruptura.

2.2 Materiais cimentícios para a impressão 3D

Um dos principais pilares para o sucesso da impressão 3D de concretos se constituem dos materiais que irão compor a tinta (material cimentício) da impressão (KHALIL *et al.*, 2017a). O cimento deve constituir uma pasta com fluidez adequada, extrudabilidade e trabalhabilidade para atender aos requisitos do processo de impressão (BUSWELL *et al.*, 2020).

O melhor tipo de composição cimentícia para cada construção é a questão das pesquisas de impressão 3D atualmente com foco no controle da taxa de estruturação do material, garantindo a estabilidade e aderência das camadas impressas já que o produto é livre de fôrmas.

A adição de materiais minerais como: cinza volante, escórias e argilas também foi amplamente utilizada com a finalidade de controlar a fluidez da pasta, sabe-se que a seleção e proporção adequada de agregados, cimentos e minerais é importante para uma melhor distribuição do tamanho das partículas propiciando a ideal trabalhabilidade (NERELLA; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019).

Para a mistura visando atingir as propriedades requeridas para a impressão, de acordo com Ma *et al.* (2020), grande parte das pesquisas tem como foco o uso de materiais baseados em Cimento Portland Comum. Paul *et al.* (2018); Salman *et al.* (2021); Kazemian *et al.* (2017); Ma *et al.* (2020); Nicolas *et al.* (2022) utilizam o (OPC) como o principal aglomerante, sendo adicionado de 20% a 30% de material pozzolânico como: cinzas volantes (CV), sílica ativa (SA), escória de alto-forno granulada moída (ES)(NICOLAS *et al.*, 2022).

O cimento sulfo-aluminoso (CSA), que é produzido na China, possui tempo de início e fim de pega adiantados em relação ao (OPC), alta resistência no estágio inicial e boa trabalhabilidade, também foi muito citado como utilização para impressão 3D pela literatura, como Jianchao *et al.* (2017a). Ele pontua que estas propriedades são adequadas e desejáveis para o processo de impressão 3D.

Jianchao *et al.* (2017a) fizeram um comparativo entre amostras de Cimento Portland Comum e do Cimento Sulfo-Aluminoso a fim de comparar seus parâmetros de desempenho, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparativo entre amostras de Cimento Portland e Cimento Sulfo-Aluminoso

AMOSTRAS	CONSISTÊNCIA %	INÍCIO E FIM DE PEGA/MIN		ESTABILIDADE	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO/ (MPa)		RESISTÊNCIA À FLEXÃO/ (MPa)	
		Início	Fim		3d	28d	3d	28d
CSA	27,9	45	73	Qualificado	47,6	55,7	7,7	8,6
OPC	28,1	183	237	Qualificado	28,4	52,5	5,3	8,1

Fonte: Adaptado de Jianchao *et al.* (2017a).

De acordo com os resultados obtidos pelo autor, é possível concluir que além das propriedades em estado fresco do (CSA), as propriedades mecânicas também apresentaram valores favoráveis ao uso deste cimento, porém, por ser mais comumente industrializado no exterior, a presente pesquisa visou encontrar materiais suplementares em substituição e adição ao cimento Portland Comum, afim de obter características semelhantes as do cimento sulfo-aluminoso.

A esse respeito, a Tabela 2, apresenta os principais tipos de cimento utilizados no estudo de alguns autores para aplicação à impressão 3D .

Tabela 2 – Materiais cimentícios e adições promissoras para a impressão 3D

REFERÊNCIA	MATERIAIS CIMENTÍCIOS E ADIÇÕES	ÁGUA/CIMENTÍCIO
Ma, et al. (2020)	Cimento Portland Comum Cimento Sulfo Aluminoso Sílica ativa Sílica em pó Argila calcinada com calcário Areia	0,35
Rahul, et. al (2020)	Cimento Portland Comum Argila calcinada com calcário Areia	0,35
Paul, et. Al. (2018)	Cimento Portland Comum Cinza Volante Sílica Ativa Areia	0,5
Panda e Tan (2018)	Cimento Portland Comum Cinza Volante Microssílica	0,45
Kazemian, et. Al. (2017)	Cimento Portland Comum Nanoargila Areia	0,43

Fonte: Autoria própria (2023).

Portanto, com a Tabela 2 é possível concluir que existem vários tipos de misturas sendo pesquisadas para a aplicação ao processo de impressão 3D e contam com alguma substituição a depender dos objetivos a serem estudados e os critérios para extrusão e construtibilidade requeridos.

Deste modo, a mistura cimentícia deve ser compatível com a impressora 3D, com o bocal por onde o material será extrudado e com as propriedades em estado fresco como extrudabilidade, tempos de pega controláveis, trabalhabilidade, fluidez, construtibilidade (CHEN *et al.*, 2020), e garantir as propriedades em estado endurecido como compressão axial, tração na flexão e aderência entre camadas que assegura durabilidade da estrutura.

Neste tópico são apresentados os materiais cimentícios promissores para a formulação da argamassa com foco na utilização em impressora 3D.

2.2.1 Cimento

O cimento Portland é um material pulverulento que possui silicatos e aluminatos de cálcio em sua composição que ao entrar em contato com a água, hidratam-se e promovem resistência mecânica ao composto endurecido (Yu Wang, Yaqing Jiang, Tinghong Pan e Kangting Yin, 2019).

O processo de fabricação do cimento envolve extração, britagem, mistura das matérias-primas, homogeneização, queima, resfriamento, adições e moagens. As adições possibilitam a aplicação deste cimento em todas as obras, minimizando os efeitos causados por agentes agressivos por exemplo ou aumentando sua resistência.

A divisão e nomenclatura do cimento Portland nacional diz respeito a sua composição e classe de resistência, sendo chamado de: Cimento portland comum (CP-I), Cimento portland composto (CP-II), Cimento portland de alto forno (CP-III), cimento portland pozolânico (CP-IV), cimento portland de alta resistência inicial (CP-V ARI), cimento portland resistente a sulfatos (RS), cimento portland de baixo calor de hidratação (BC) e cimento portland branco (CPB) (ABNT NBR 16697/2018).

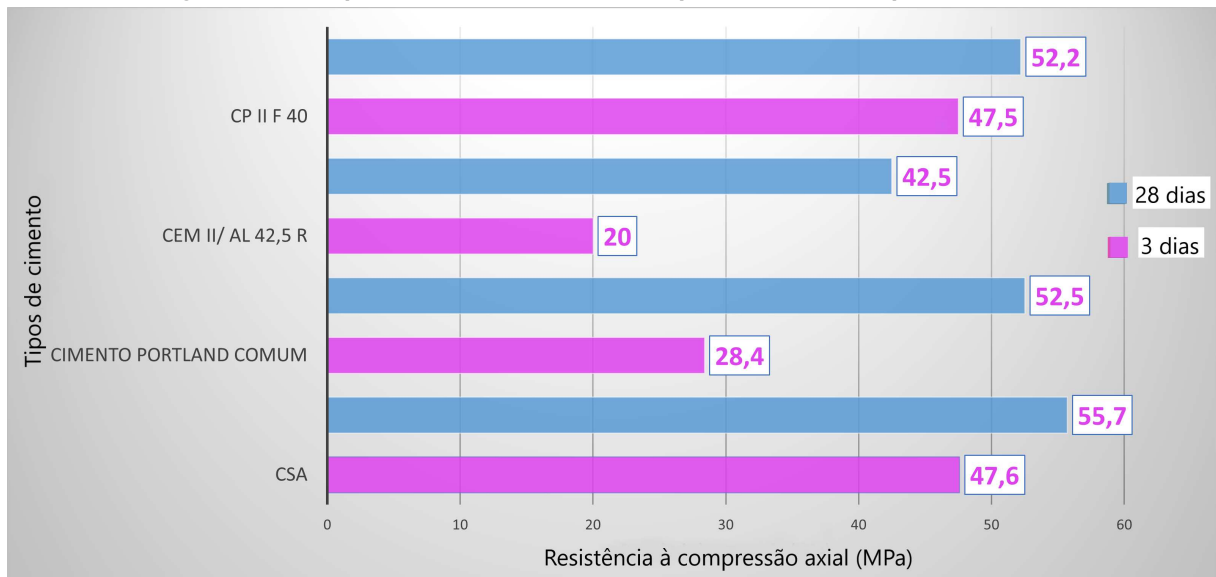
De acordo com a NBR 1667 920180, o cimento portland composto (CP II) é um aglomerante hidráulico que durante a moagem do clínquer Portland, é adicionada uma ou mais formas de sulfato de cálcio, juntamente com aditivos como materiais carbonáticos (CP II-F), escórias granuladas de alto-forno (CP II-E) e pozolana (CP II-Z).

O Cimento composto CP II F-40 possui menor teor de minerais e é composto por clínquer + sulfatos de cálcio de 90 a 94% em massa, regulamentado pela (NBR 16606, 2018a), tem adição de 11 a 25% de fíler calcário e porcentagens pequenas para MgO e SO_3 , de 4 e 3,1% e por ser comercializado no Brasil, tendo características semelhantes as do Cimento Portland Comum (OPC Tipo I), o mais utilizado pela literatura para este fim, foi priorizado para esta pesquisa.

Além do OPC Tipo I, o cimento sulfo-aluminoso também foi utilizado por alguns autores como Jianchao *et al.* (2017a); Kocak (2020) e Han, *et. al* (2017), que relacionaram o seu uso com a produção de argamassas com maior estabilidade dimensional na impressão 3D. Como este cimento não é comercializado no Brasil, seu uso é dificultado, justificando a utilização de materiais suplementares que confirmam características semelhantes a ele.

Características físicas e mecânicas também podem ser comparadas entre os cimentos estudados, é possível observar na Figura 14 um gráfico comparativo de resistência à compressão axial entre os cimentos Portland II-F-40, Cimento Portland Comum, o Sulfo-Aluminoso e o CEM II/ AL 42,5 R (cimento Portland de calcário), utilizado por Salman *et al.* (2021) para impressão 3D de concretos.

Figura 14 – Comparativo de resistência a compressão entre os tipos de cimento



Fonte: Adaptado de Salman *et al.* (2021); Jianchao *et al.* (2017a); NBR 16606 (2018a); Cimento Nacional (2022).

Por meio da Figura 14 é possível concluir que o cimento CP II F - 40 possui resistência à compressão muito próxima da resistência à compressão do cimento sulfoaluminoso, tanto nas idades iniciais quanto aos 28 dias, sendo superior as resistências do cimento Portland comum e do CEM II/AL 42, R para as duas idades.

2.2.2 Agregado

O caminho de bombeamento da argamassa na impressora, desde o misturador até o bocal, exige uma certa dimensão máxima dos materiais utilizados na mistura a depender do bocal e maquinário, as composições devem ter partículas menores capazes de produzir maior empacotamento (REITER *et al.*, 2018). Deste modo, material cimentício extrudável geralmente não possui agregado graúdo em sua composição.

Para o tamanho do agregado miúdo aplicado à materiais cimentícios para a impressão 3D, recomenda-se que a dimensão máxima não exceda 8 mm (JIANCHAO *et al.*, 2017a), porém existem tamanhos variados de bocais que compõe o maquinário, portanto a variação de tamanhos de agregados utilizados devem se justificar pela adaptação do material.

Nas principais literaturas consideradas, as dimensões dos agregados utilizados para material de concreto impresso variaram de < 2.4 mm, como estudaram Rubin (2021); Nerella, Hempel e Mechtcherine (2019); Nicolas *et al.* (2022); Kazemian *et al.* (2017) e próximos a 4,75 mm, como Bai *et al.* (2021) e Han *et al.* (2017), porém Meurer e Classen (2021) chegou a 8 mm.

Assim, as dimensões do agregado devem se adequar ao bico extrusor, sem que haja bloqueio ou entupimentos (KHALIL *et al.*, 2017), com distribuição do tamanho de partícula que garanta a trabalhabilidade suficiente, facilitando a passagem pelo bocal da impressora (LE *et al.*,

2012a). Além do agregado, o uso de materiais suplementares como adições minerais também podem otimizar as propriedades em estado fresco, facilitando a extrudabilidade (PUTTEN *et al.*, 2019).

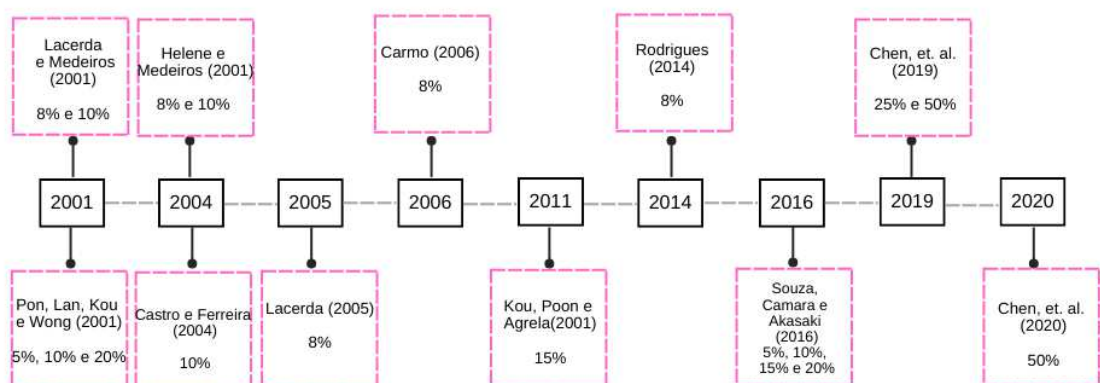
2.2.3 Adições minerais

Com a finalidade do desenvolvimento de materiais sustentáveis, uma vez que as adições químicas para tornar o material extrudável podem consumir uma quantidade significativa de cimento, adições minerais, como cinza volante e (MC), vem como alternativa viável e sustentável, além de alterar a microestrutura, tornando-a menos porosa, melhora a trabalhabilidade e minimiza custos (MA *et al.*, 2020).

Neste contexto, o (MC) é usado como material pozolânico em argamassas e concretos. Ele é obtido pela calcinação da caulinita e conta com SiO_2 e Al_2O_3 em sua composição, possuindo partículas menores do que 16 micrômetros, características que conferem a redução na consistência e aumento no tempo de início de pega de materiais cimentícios (KHAN; SANCHEZ; ZHOU, 2020a).

Portanto, deve existir uma porcentagem ótima em substituição que garanta a melhora das propriedades em estado fresco e endurecido prometidas, a literatura utilizou metacaulim ao longo dos anos e obteve como porcentagens ideais de 5% a 15% em substituição. Os principais autores estudados estão representados na linha do tempo da Figura 15.

Figura 15 – Porcentagens ideais para substituição do metacaulim em relação a massa de cimento ao longo dos anos

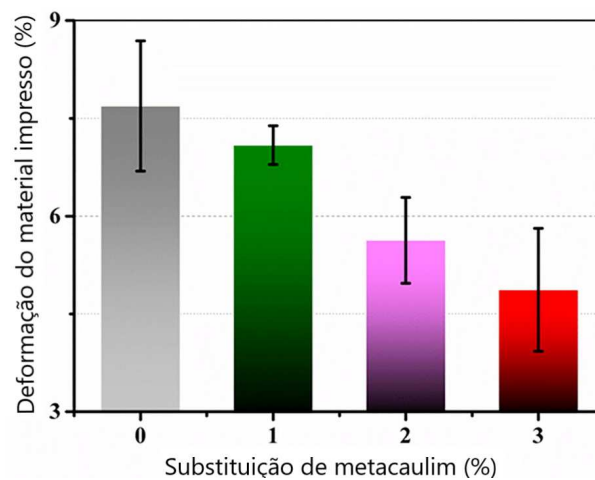


Fonte: Adaptado de Amorim (2019).

Chen, et. al., (2019) verificaram que a incorporação de (MC) ao material cimentício aumentou a adsorção de água devido a finura do grão com alta área superficial, diminuindo o início da pega de 147 minutos para 52 minutos, porém aumentou quantidade de vazios encontrados na zona de interface, o que pode ser prejudicial para a aderência da camada seguinte, portanto a combinação do metacaulim com outro aditivo que reduza essa influência é ideal.

Os pesquisadores também concluíram que a taxa de estruturação é melhorada pelo metacaulim e beneficia o acúmulo estrutural - construtibilidade do material impresso, desenvolvendo uma estrutura 3D controlável e menos deformável conforme sugerem os dados da Figura 16.

Figura 16 – Relação do metacaulim com a deformação das camadas impressas



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

Os resultados obtidos por eles vão de encontro com Helene (2004), que verificou que a incorporação de metacaulim como substituição do cimento promove a redução da retração por secagem em argamassas de até 0,34% aos 63 dias com 10% de substituição, garantindo uma maior estabilidade geométrica.

A adição de (MC) em misturas cimentícias com foco na aplicação para impressão 3D foi alvo de estudo em dois trabalhos de conclusão de curso da UEL, (COSTA, 2022) e (AMORIM, 2019). A substituição que mais atendeu aos critérios de trabalhabilidade, apresentando extrusão contínua e continuidade de filamentos foi a de 10% com adição de 0,3% de (HPMC), obtido por Costa (2022) e a de 15% com adição de 0,04% de aditivo superplastificante. Ambas autoras utilizaram uma pistola de silicone manual como equipamento de extrusão.

Kruger, Zeranka e Zijl (2019) e Xu *et al.* (2019) verificaram que a melhora na trabalhabilidade deste material pode garantir as propriedades mecânicas e durabilidade necessárias para os compostos impressos. A pesquisa de Chen, et., (2019) concluiu que o aumento do teor de (MC) na argila calcinada intensificou significativamente a tensão de escoamento e estruturação, diminuindo o tempo de pega inicial e melhorando a resistência a compressão. O teor de (MC) incorporado a argila calcinada foi de aproximadamente 30% e a substituição em relação ao cimento foram de 25%, 50%, 75% e 100%.

O impacto do teor de substituição de (MC) em relação a resistência à compressão foi verificado por Medina (2011), que utilizou sistemas binários com cimento Portland CP V. Os resultados obtidos por ele estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado dos ensaios de compressão axial com CP V, cal e metacaulim

CONCRETOS	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)					
	3 dias	7 dias	28 dias	63 dias	182 dias	360 dias
100% Cimento CP V - ARI	22,29	27,72	29,84	30,53	31,96	32,83
95% CP V - ARI + 5% Metacaulim	20,73	26,32	30,11	31,41	33,37	35,51
85% CP V - ARI + 15% Metacaulim	20,58	25,94	32,41	33,2	33,81	36,1
70% CP V - ARI + 30% Metacaulim	19,76	25,8	32,86	33,08	33,15	35,72
50% CP V - ARI + 50% Metacaulim	12,49	22,55	28,48	30,04	30,75	34,93
95% CP V - ARI + 5% Metacaulim + 2% Cal	19,62	26,33	31	31,79	34,97	36,54
85% CP V - ARI + 15% Metacaulim + 5% Cal	19,89	26,26	33,53	33,88	35,41	38,42
70% CP V - ARI + 30% Metacaulim + 10% Cal	18,17	24,57	30,84	31,87	33,08	34,71
50% CP V - ARI + 50% Metacaulim + 20% Cal	11,77	19,2	26,45	29,16	29,38	32,93

Fonte: (MEDINA, 2011).

A adição de hidróxido de cálcio ativa as interações de hidratação do cimento logo após as primeiras idades e sua adição promoveu um aumento da resistência à compressão. Assim, a interação entre os materiais constituintes da mistura condicionam o comportamento do composto submetido a extrusão, sendo de extrema importância a seleção de adições minerais e químicas.

2.2.4 Aditivos químicos

A adição de superplastificantes e agente modificador de viscosidade como o hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) se faz importante para garantir a extrudabilidade, e aumentar a tensão de escoamento inicial, a construtibilidade do material cimentício também é melhorada com a adição de (HPMC), de acordo com Geng *et al.* (2020), este efeito foi mais significativo do que quando comparado a adição de nanosílica em termos de propriedades reológicas.

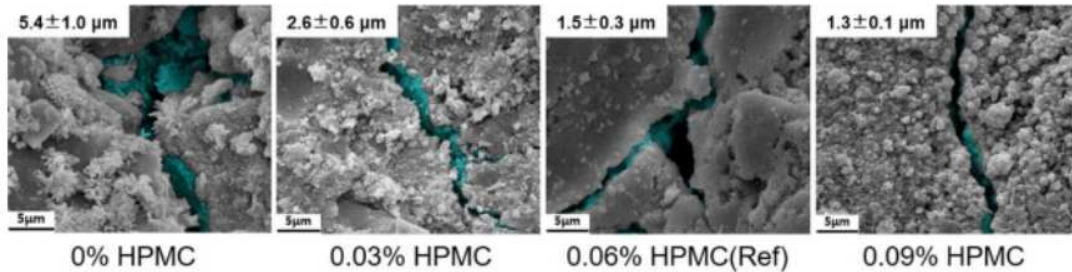
Além disso foi verificado por eles que o uso deste aditivo retém água para cura interna, promovendo uma hidratação prolongada do material, resultando em uma maior umidade superficial, que pode auxiliar na aderência entre as camadas, este aspecto também foi verificado por Ma *et al.* (2020) com o uso de fibras de celulose como retentores de água.

Por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), Geng *et al.* (2020) obtiveram outra justificativa para a melhora de aderência entre as camadas, verificaram que a inserção de (HPMC) e nanosílica modifica a distribuição de poros na interface, fazendo com que o seu uso interferisse na aderência entre as camadas.

Eles observaram, que a adição de 0,06% de (HPMC) otimiza a estrutura dos poros do material, resultando em microporos finos e alongados e verificaram que as amostras com este tipo de estrutura na interface possuíram maior resistência de aderência quando submetidas a ensaios de tração.

A Figura 17 mostra as imagens do (MEV) obtida por eles, mostrando a forma destes microporos na interface.

Figura 17 – Imagens por meio do (MEV) da interface com diferentes porcentagens de (HPMC)



Fonte: Geng *et al.* (2020).

A região destacada na Figura corresponde aos poros formados na região da interface, os autores concluíram que mais do que alterações na trabalhabilidade, esta composição tem mais influência na microinterface e que o aumento do teor de sílica e (HPMC) produzem microfissuras mais finas nesta região.

2.3 Propriedades de materiais cimentícios aplicados à impressão 3D

Os materiais cimentícios impressos em 3D devem possuir consistência o suficiente para manter geometrias estáveis impressas. Novas propriedades de materiais cimentícios devem ser consideradas devido à grande diferença entre os métodos convencionais de construção e o novo processo de impressão surgido, sendo as principais observadas para o estado fresco a extrudabilidade, construtibilidade e janela de impressão, e para o estado endurecido, resistência de compressão axial, resistência de tração na flexão e aderência entre camadas (ZHANZHAO et al, 2020).

2.3.1 Propriedades de materiais cimentícios aplicados à impressão 3D em estado fresco

A extrudabilidade é uma propriedade crítica que avalia o comportamento de fluxo de materiais frescos no sistema de bombeamento, é o que permite o transporte dos materiais desde o motor até o bocal de impressão (Lim et al., 2012). De acordo com Le et. al (2012), esta propriedade é a capacidade da pasta fresca passar pelo bocal de impressão como um filamento contínuo e intacto para se garantir a extrusão desejada.

A construtibilidade diz respeito à resistência do material impresso à deformação sob carga, como não existem formas, os materiais frescos devem ter capacidade de construção suficiente para serem rígidos após extrudados sustentando seu auto-peso, peso das camadas superiores e a pressão da extrusão (MURTAGH et al., 2020).

Este tempo de extrusão entre uma camada e outra é chamado de janela de impressão, que corresponde ao parâmetro definido para estabelecer o intervalo de tempo entre camadas a serem extrudadas no processo de impressão 3D (SANJAYAN *et al.*, 2018).

A janela de impressão de um material cimentício extrudado tem relação com o os tempos de pega, que são determinados por meio de ensaios com um aparelho Vicat, feito para medir o início e o fim de pega, não caracterizando as alterações ocorridas na consistência ao longo do tempo em materiais aplicados a impressão 3D, o conhecimento destes tempos é importante na impressão 3D porque deve-se garantir que quando a segunda camada for depositada, a primeira não tenha entrado em pega.

De acordo com (MA *et al.*, 2020), a janela de impressão recomendada é de até 70 minutos, indicando que os materiais cimentícios com um tempo inferior a este podem apresentar uma capacidade de extrusão aceitável, Kazemian *et al.* (2017) observaram que a largura da camada sofre alterações ao longo do seu comprimento quando o tempo de descanso é inferior a 30 minutos, porém para a impressão 3D o material impresso deve possuir dimensões constantes.

Assim, para garantir que o material seja imprimível, com conformidade geométrica, Kazemian *et al.* (2017) estudaram uma metodologia para considerar uma mistura promissora para a impressão, que abrange três critérios para avaliar esta mistura.

Os critérios da metodologia de Kazemian *et al.* (2017) são:

- Descontinuidade da camada - Sem defeitos, apresentando continuidade e coesão;

Figura 18 – Continuidade da camada



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

- Arestas visíveis - As arestas devem ser visíveis e quadradas mantendo o formato do bico extrusor;

Figura 19 – Arestas visíveis



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

- Conformidade - As dimensões das camadas impressas devem se manter constantes ao longo do seu comprimento, dentro de 10% de erro para mais ou para menos, em relação as medidas definidas inicialmente.

Figura 20 – Conformidade geométrica



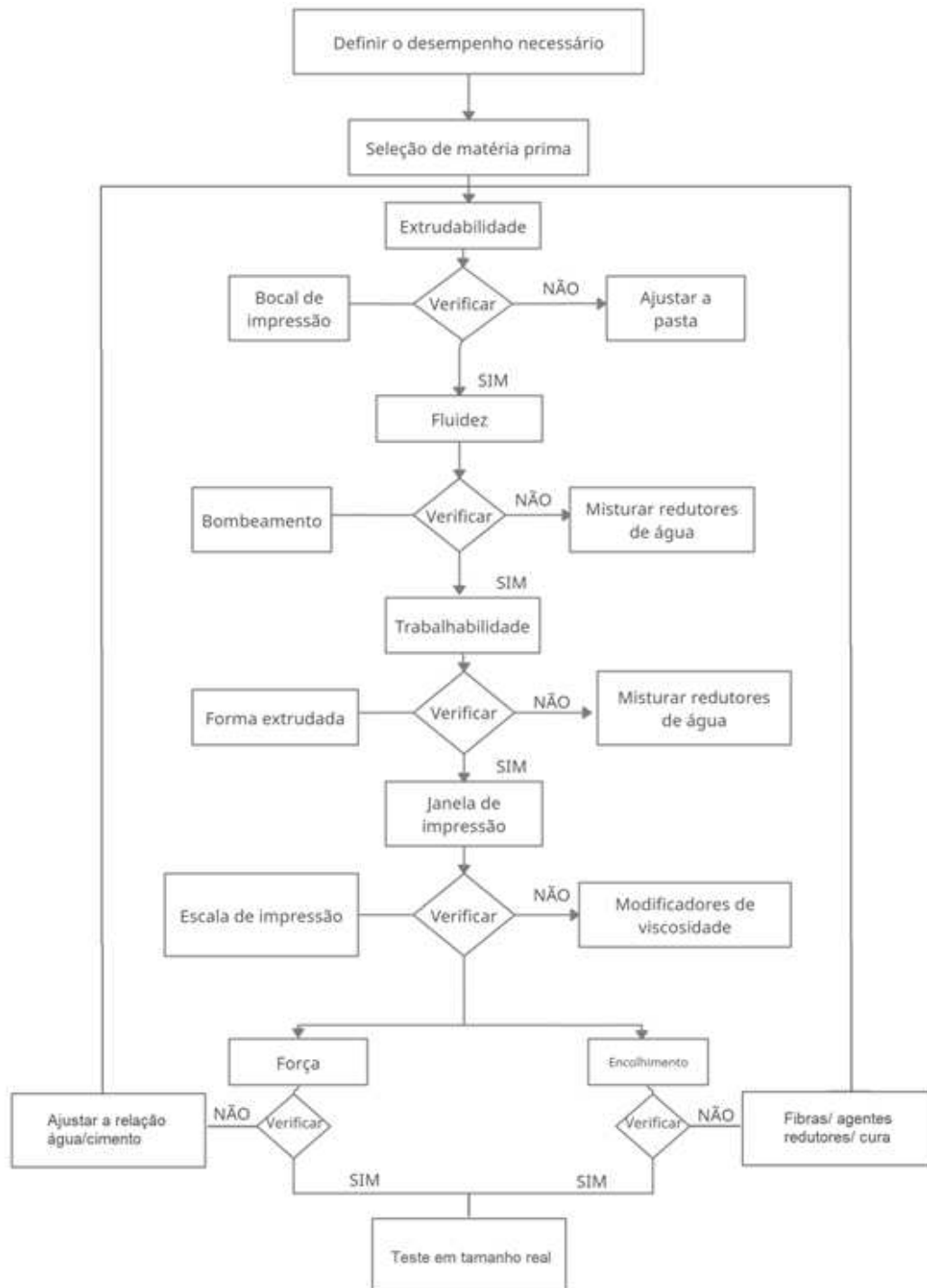
Fonte: Kazemian *et al.* (2017).

Portanto, de acordo com esta metodologia, a qualidade de impressão só será validada se os três critérios forem satisfeitos para as amostras impressas. Para esta pesquisa, o método "Qualidade de impressão" de Kazemian *et al.* (2017) foi utilizado, sendo modificado visando atender aos parâmetros do maquinário utilizado.

Vale destacar que atualmente não há procedimentos sugeridos para testar as misturas de material impresso, sendo assim projetos de materiais se validam por tentativa e erro, passando pelos testes de propriedades em estado fresco e sofrendo modificações e adições minerais e químicas de acordo com a necessidade surgida em cada etapa.

Neste sentido, a Figura 21 é um fluxograma indicando os caminhos a serem percorridos em cada propriedade do material observada ao longo do processo de impressão.

Figura 21 – Procedimento de projeto de mistura para materiais cimentícios imprimíveis em 3D.



Fonte: Adaptado de Zhanzhao et. al (2020).

Zhanzhao et. al (2020) sugere com o fluxograma, o caminho que as misturas devem percorrer para que todas as propriedades em estado fresco sejam verificadas e testadas em protótipos antes da aplicação em tamanho real, ajustando e/ou adicionando materiais que melhorem as propriedades, tornando o material imprimível.

Assim, sem o processo de adensamento ou compactação adequado pela impressão ser livre de formas e vibradores, pequenos vazios estão sujeitos a se formarem, além disso, o processo de extrusão pode fazer com que haja um acúmulo de umidade superficial, acelerando a evaporação e ocasionando a retração do material, interferindo na ligação entre as camadas (MA *et al.*, 2020).

Materiais suplementares podem mitigar estes efeitos, mantendo a umidade superficial necessária para uma boa aderência, aumentando o intervalo de tempo de impressão e a qualidade da impressão, assim como verificado por Ma *et al.* (2020), que obteve uma melhora na ligação da interface com um aumento da umidade superficial por meio da adição de fibra de celulose.

Portanto, o estudo da umidade superficial é importante para relacionar com a resistência de aderência entre as camadas, principalmente quando as variáveis dizem respeito a mudança dos materiais e teores aplicados à mistura.

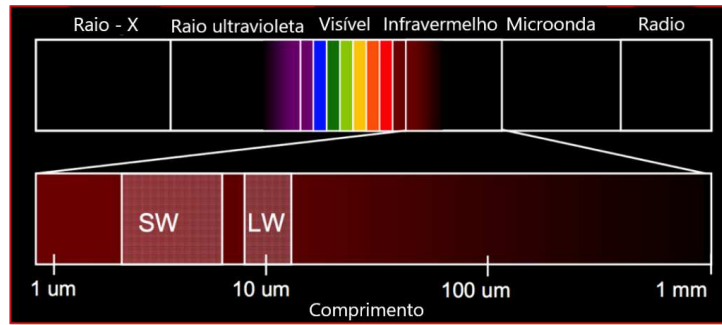
2.3.2 Estudo da umidade por meio da termografia

A termografia surgiu no período de segunda guerra mundial, em 1940, quando tanques alemães utilizaram o sistema de visão noturna para invadir a Rússia. Os norte-americanos reagiram, elaborando e desenvolvendo o sistema Forward Looking Infra Red (FLIR), com tradução livre - "Visão Avante por Infravermelhos", para detectar inimigos (MENDONÇA; AMARAL; CATARINO, 2010).

Segundo Mendonça, Amaral e Catarino (2010), os raios infravermelhos emitem calor e quanto mais quente está o objeto, maior é a radiação. Eles fazem parte do espectro eletromagnético se deslocando à velocidade da luz em relação ao observador. A visão humana detecta apenas uma pequena parte desse espectro, com comprimento de onda de $0,4\mu m$ e $0,7\mu m$, pelo fato de os raios infravermelhos terem um comprimento de onda superior aos visíveis, podem ser divididos em ondas curtas ($2-5\mu m$) e ondas longas ($8-14\mu m$), sendo estas últimas visíveis por câmeras termográficas para edifícios.

Na Figura 22 é possível observar os comprimentos de onda relacionados com o tipos, sendo o infravermelho visível através da câmera termográfica.

Figura 22 – Espectro eletromagnético



Fonte: Adaptado de (MENDONÇA; AMARAL; CATARINO, 2010).

Em seguida, surgiu o scanner de infravermelhos, capaz de gerar um termograma em algumas horas. Entre 1960 e 1970 eles foram otimizados, o que possibilitou a construção de imagem em 5 minutos, com a determinação das temperaturas dos objetos representados nela. Sendo possível em 1990, obter imagens termográficas em tempo real, graças aos avanços nos equipamentos de captura e no tratamento das imagens (FLIR - RESEARCH AND SCIENCE, 2016).

Portanto, a termografia é o meio pelo qual é possível perceber a temperatura superficial de um corpo pela transferência de calor. Joseph Fourier observou que a temperatura de um corpo varia linearmente por toda a sua extensão quando há uma região mais quente do que a outra, e que o fluxo de calor está diretamente relacionado com a área da seção transversal analisada.

Assim o mecanismo utilizado pelas câmeras termográficas corresponde a um dispositivo capacitado a medir a temperatura de um corpo ou objeto por meio da captura da luz infravermelha emitida por ele, transformando a radiação em imagens visíveis ao olho humano.

De acordo com Mendonça, Amaral e Catarino (2010), a câmera termográfica detecta energia infravermelha (calor), convertendo em sinal elétrico e produzindo imagens efetuando cálculos de temperatura. A equação 1 expressa a Lei de Fourier utilizada nos sensores existentes nestes aparelhos para a conversão do fluxo de calor em temperatura.

$$\phi = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{L} \quad (1)$$

Em que:

ϕ = Fluxo de calor (w);

k = condutividade térmica do material (W/(m. °C));

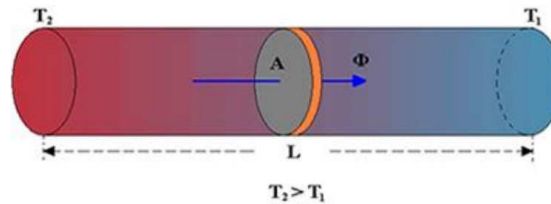
A = área da seção transversal do corpo (m^2);

ΔT = variação de temperatura (°C);

L = comprimento do corpo (m).

Com a Figura 23 é possível compreender o transporte de calor que ocorre nos corpos.

Figura 23 – Representação da Lei de Fourier em um corpo cilíndrico



Fonte: Adaptado de (MENDONÇA; AMARAL; CATARINO, 2010).

Deste modo, a câmera capta a temperatura superficial do corpo pela transferência de calor, já que todo e qualquer corpo acima do zero absoluto (quando a temperatura em °K é igual a zero), sendo necessário que haja um diferencial de temperatura entre corpo e meio, para que o aparelho gerador de imagem seja capaz de realizar a diferenciação correta entre eles (HOLST, 2000).

Existem duas técnicas para garantir este diferencial de temperatura, chamadas de: Técnica de termografia infravermelha passiva e ativa. A técnica passiva é caracterizada por não possuir um estímulo artificial de energia, ou seja, só há absorção por meio da carga solar atuando, possuindo um caráter de análise mais qualitativo. Já a técnica ativa tem como principal característica a aplicação de um estímulo energético sobre o corpo estudado, com a finalidade de gerar um diferencial térmico entre o corpo e o meio, possuindo caráter mais quantitativo (MENDONÇA; AMARAL; CATARINO, 2010).

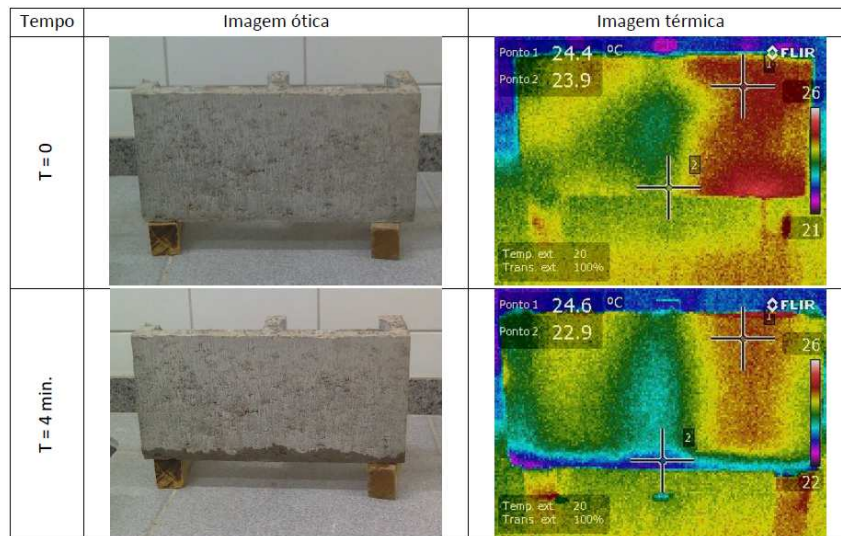
Para a análise por meio da termografia de um sistema de construção civil, ou um material cimentício, parte-se do princípio que os materiais possuem descontinuidades e fluxo de calor não uniforme. Quando há variação de 1 °C a 2 °C com o uso da termografia, sabe-se que há algum problema com a edificação, variação de mais de 4 °C indica anomalia no corpo (CORTIZO, 2007).

O uso técnico da câmera termográfica na construção civil compreende desde a avaliação do desempenho e do conforto térmico das edificações até a detecção de manifestações patológicas. A termografia permite uma análise térmica eficiente dos edifícios e detecção dos sistemas construtivos que os compõe, como elementos estruturais, vedação, sistema elétrico e hidráulico (MENDONÇA, 2005).

Também é possível identificar as armaduras da edificação, detectar fissuras que podem apresentar variações de aproximadamente 1 °C em relação ao revestimento em que está inserida (FREITAS et. al, 2014), assim como observar umidade em paredes antes que se torne visíveis (MENDONÇA; AMARAL; CATARINO, 2010), vale destacar que é indicado também que o termografista tenha uma visão mais perpendicular da superfície analisada a fim de evitar os erros de emissividade devido ao ângulo de visão (SANTOS, 2012).

A Figura 24 mostra o uso da câmera termográfica na superfície de blocos de concreto antes e alguns minutos após o seu contato com água na sua parte inferior, indicando a mudança do gradiente de cores e a diminuição da temperatura no ponto úmido.

Figura 24 – Imagem ótica e térmica de bloco de concreto seco e após 4 minutos de contato com água



Fonte: Adaptado de (FREIRE; AMARAL, 2016).

É concluído por Mendonça, Amaral e Catarino (2010) e Freire e Amaral (2016), que uma fonte de umidade pode ser observada pela termografia quando houver um padrão cromático na imagem térmica, mostrando um gradiente de temperatura, em que a região da umidade será mais fria e, gradativamente, vai esquentando à medida que se afasta do raio da fonte.

Eles mostraram que a técnica da termografia infravermelha é um método eficiente de ensaio não-destrutivo na identificação de umidade, sobretudo em elementos de vedação, portanto um maior teor de umidade concentrado, deve indicar uma temperatura pontual menor em relação ao restante da amostra observada.

O aumento da umidade superficial de materiais cimentícios pode ser observada no elemento em estado fresco e endurecido, e em excesso, pode indicar irregularidades por grande absorção de água ou, no caso da impressão 3D, um acúmulo de umidade superficial interferindo na resistência entre as camadas impressas.

2.3.3 Propriedades de materiais cimentícios aplicados à impressão 3D em estado endurecido

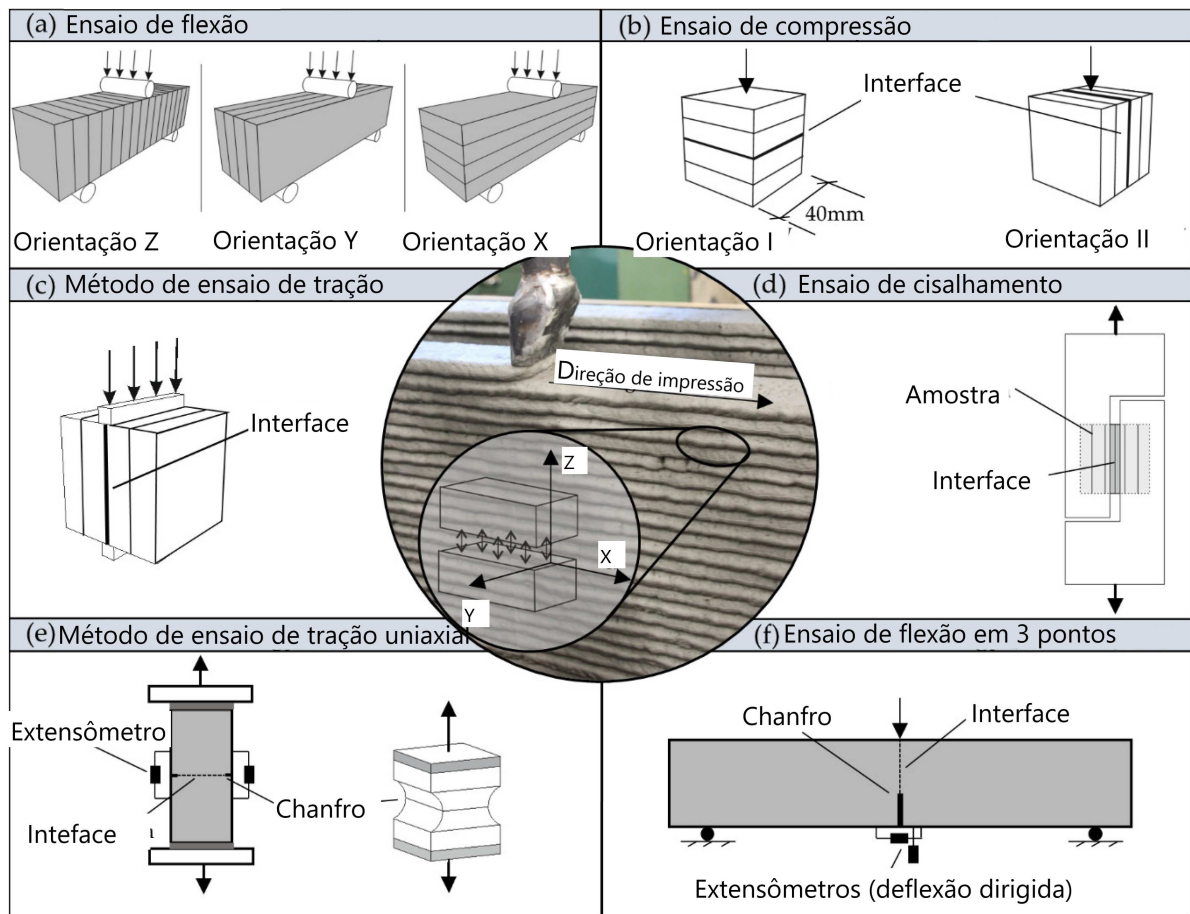
A impressão 3D de concreto pode ser considerada como uma das inovações mais promissoras na indústria da construção, entretanto, ainda é necessário o estabelecimento de uma metodologia de avaliação do comportamento de materiais cimentícios em seu estado endurecido (MEURER; CLASSEN, 2021).

Deste modo, autores como Ma *et al.* (2020); Padilha (2020); Meurer e Classen (2021); Geng *et al.* (2020); Sanjayan *et al.* (2018); Wolfs, Bos e Salet (2019) propõe métodos experimentais reproduzíveis que permitem a avaliação de propriedades como resistência à compressão, tração, tração na flexão e tração direta para determinar a resistência de aderência entre as camadas impressas.

Vários procedimentos de ensaio foram apresentados e resultados variáveis foram obtidos, as propriedades mecânicas foram condicionadas pela anisotropia do material, de acordo com cada direção de carregamento (paralelo, perpendicular à interface impressa, paralela à interface impressa, fora do plano) (MEURER; CLASSEN, 2021).

Wolfs, Bos e Salet (2019) propuseram um sistema de coordenadas para levar em consideração na realização destes ensaios, considerando a direção de impressão de modo a estabelecer parâmetros e mitigar erros entre eles. A Figura 25 mostra diversos métodos de ensaio de determinação de propriedades mecânicas promissoras para o concreto impresso em estado endurecido.

Figura 25 – Métodos de ensaio para a determinação das propriedades mecânicas do material cimentício impresso



Fonte: Adaptado de Meurer e Classen (2021).

Como é possível visualizar na Figura 25, existem diversos métodos de ensaio já utilizados para materiais produzidos de forma convencional aplicáveis à impressão 3D. Estes métodos são adaptados de acordo com as particularidades da nova forma assumida pelo material, que depende da orientação das camadas condicionada pela forma que foram impressos.

De acordo com Wolfs, Bos e Salet (2019), com a expansão dos projetos de impressão 3D, aumenta a necessidade do estudo das propriedades mecânicas para insumos de cálculos

estruturais, uma vez que o processo de produção é diferente dos métodos convencionais de estruturas de concreto. As normas existentes para estes ensaios podem ser incompatíveis com as propriedades específicas dos elementos impressos.

Meurer e Classen (2021) e Geng *et al.* (2020) mostram que o desempenho estrutural do concreto impresso é diretamente relacionado pelos parâmetros do processo construtivo, desde o intervalo de tempo entre as camadas, velocidade da impressão, altura do bocal e tipos de materiais utilizados.

Fatores como temperatura e umidade relativa também podem interferir no desempenho estrutural destas edificações, já que estas condições são minimamente controladas. A direção do carregamento principal nos elementos impressos (plano paralelo ou perpendicular das interfaces) também é uma variável que depende do projeto (WOLFS; BOS; SALET, 2019). Sendo o plano paralelo mais solicitado aos esforços de compressão e o plano perpendicular mais solicitado aos esforços de flexão na maioria dos projetos e edificações já impressas.

Panda, Chandra Paul e Jen Tan (2017) afirmam que o carregamento das camadas na direção longitudinal permite a melhor transferência de tensão, enquanto que o carregamento nas direções perpendiculares ou laterais podem levar ao deslizamento interfacial entre os filamentos, também podendo ser estudado por meio da micromecânica da transferência de tensões.

A resistência à flexão de corpos de prova à base de cimento impressos geralmente tem um declínio em uma determinada direção, uma vez que a tensão de tração é aplicada perpendicularmente à interface da camada. Essa propriedade mecânica anisotrópica do concreto impresso em 3D pode ser atribuída à fraca ligação da interface (GENG *et al.*, 2020).

A deposição de materiais camada por camada gera uma distribuição de tensões específica, que pode ser mais forte ou mais fraca a depender do material, umidade superficial e velocidade de impressão, se tornando um problema aos materiais aplicados à impressão 3D (LEWANDOWSKI; SEIFI, 2016).

A área interfacial geralmente possui propriedades mecânicas mais fracas, por esse motivo, a construtibilidade dos produtos impressos será dada de forma diferente em comparação com os materiais de concreto lançados de forma tradicional, resultando em novas propriedades, como a anisotropia (GENG *et al.*, 2020); (PANDA; Chandra Paul; Jen Tan, 2017).

Portanto, procedimentos de ensaio para determinar a resistência à compressão, tração na flexão e resistência de aderência entre as camadas são alvo de estudo por esses autores e foram aplicados na presente pesquisa.

2.3.4 Ensaios de compressão

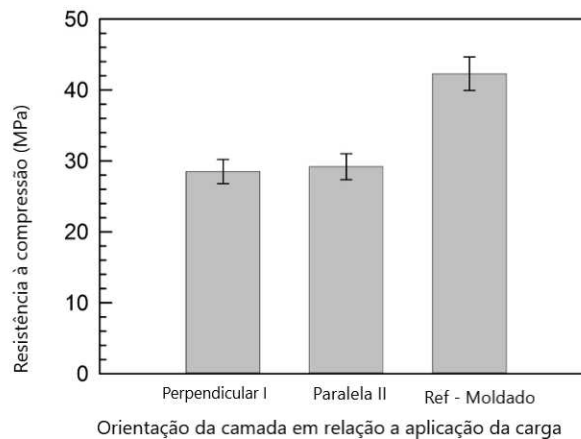
Com o estudo das propriedades mecânicas dos materiais cimentícios impressos, a maioria dos autores como Ma *et al.* (2020); Padilha (2020); Meurer e Classen (2021); Geng *et al.* (2020); Sanjayan *et al.* (2018); Wolfs, Bos e Salet (2019) visaram relacionar a resistência à

compressão do material moldado e em camadas, portanto todos os autores estudados utilizaram deste método de compressão axial para validar o comportamento mecânico.

Rahul *et al.* (2019) obtiveram valores semelhantes de resistência à compressão entre os corpos de prova com as camadas impressas em paralelo e em perpendicular, porém, observou uma diminuição de 12 a 22% em comparação ao concreto moldado e justificou essa redução em decorrência da maior porosidade que pode ocorrer nas interfaces presentes nos elementos impressos.

Wolfs, Bos e Salet (2019) utilizaram corpos de prova cúbicos de 40 x 40 x 40 mm para os ensaios de compressão e os resultados estão apresentados na Figura 26, evidenciando as médias de resistência estatisticamente iguais entre as amostras impressas em camadas (nas duas direções - paralela e perpendicular em relação a aplicação da carga) e 31% maior na amostra moldada.

Figura 26 – Ensaio de compressão entre amostras impressas e moldadas



Fonte: Wolfs, Bos e Salet (2019).

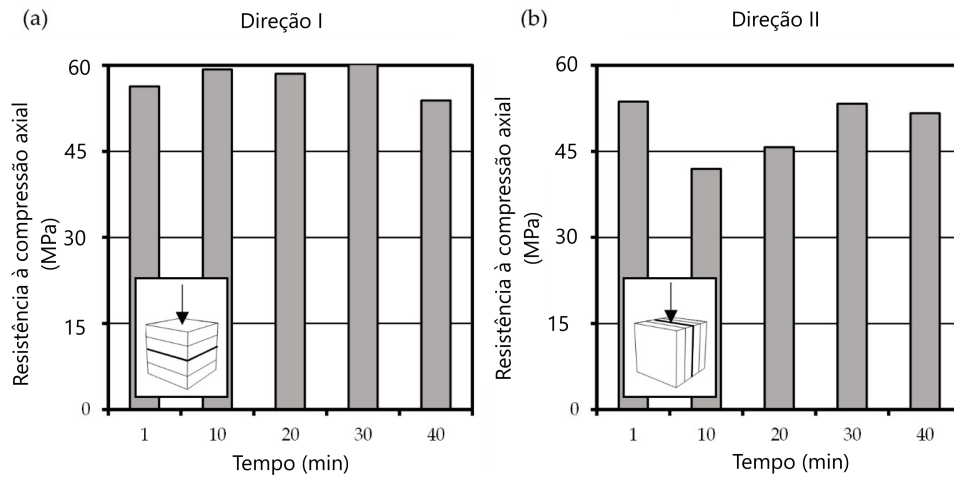
Eles concluíram que a amostra referência, que foi moldada, apresentou maior resistência à compressão pela distribuição de tensão ter se dado mais uniformemente (já que o corpo de prova foi moldado e adensado) do que quando aplicada em duas camadas, onde pode haver uma divisão de tensões, fragilizando o material.

Meurer e Classen (2021) também utilizaram corpos de prova com área de aplicação de 40 x 40 mm^2 e aos 22 dias obtiveram 65,8 MPa de resistência média à compressão axial para o material moldado e adensado.

Eles pontuaram que a diferença de comportamento do material à compressão dependeu mais da forma do que do tempo de impressão de camadas - que foi a variável estudada. Obtendo um valor de 96% da referência moldada, de resistência à compressão de camadas em paralelo e 82% da referência, de resistência à compressão de camadas posicionadas perpendicularmente (quando comparada a referência moldada).

A Figura 27 mostra o posicionamento da carga em relação as camadas das amostras estudadas.

Figura 27 – Ensaio de compressão entre amostras impressas em paralelo e perpendicular



Fonte: Meurer e Classen (2021).

Com análise da Figura 27, conclui-se que a amostra apresentou maior resistência à compressão axial quando a carga foi aplicada de forma perpendicular ao sentido de deposição das camadas e com o intervalo de tempo de impressão entre uma camada e outra de 10 e de 30 minutos, ressalta-se que o tempo de impressão das camadas utilizado nesta pesquisa foi de aproximadamente 4 minutos.

Padilha (2020) também utilizou como variável de análise o intervalo de tempo de deposição das camadas, obtendo maior resistência a compressão em amostras com as camadas impressas no sentido perpendicular a aplicação da carga e com intervalo de impressão de 40 minutos.

Panda, Chandra Paul e Jen Tan (2017) utilizaram materiais suplementares como variáveis para seu estudo de propriedades mecânicas em argamassas, variando a mudança de teor, comprimento e posição de fibras de carbono inseridas no material. Para o ensaio de compressão, fibras de 3 mm reduziram a resistência da argamassa à compressão e a resistência máxima se deu no material que apresentou maior densidade.

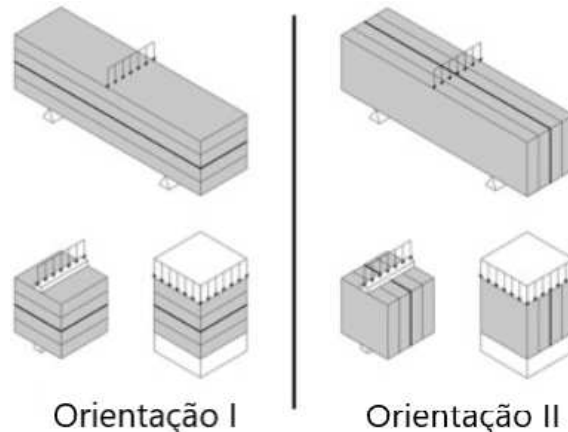
Além da verificação à compressão axial, ensaios como tração na flexão e tração direta são utilizados para medir a resistência das camadas e da ligação que mantém a estabilidade e durabilidade da estrutura, portanto, as seções seguintes versam sobre estes ensaios.

2.3.5 Ensaios de tração na flexão

Panda, Chandra Paul e Jen Tan (2017) submeteram as amostras de sua pesquisa ao ensaio de tração na flexão com as camadas posicionadas em paralelo e em perpendicular, conforme a Figura 28 e obtiveram como resultado uma maior resistência à tração na flexão nas amostras da posição I e acreditam que isto se deu por influência da inserção das fibras, que favoreceu a resistência nesse sentido e por uma ligação fraca entre as camadas.

A resistência à tração na flexão pode ser significativamente reduzida quando as amostras são ensaiadas com as camadas na direção vertical e Panda, Chandra Paul e Jen Tan (2017); Le *et al.* (2012a) e Padilha (2020) atribuíram isso a ligação interface que recebe diretamente a carga.

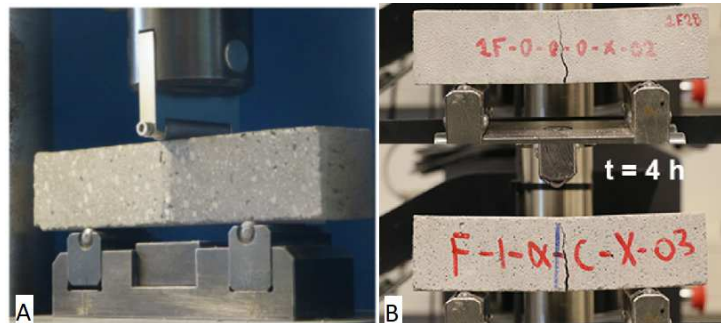
Figura 28 – Ensaio de resistência à tração na flexão e orientação de amostras para análise



Fonte: Adaptado de Wolfs, Bos e Salet (2019).

Meurer e Classen (2021) também realizaram ensaios para medir a resistência à tração flexão do material cimentício impresso, foram analisadas amostras de concreto moldado, chamado de referência e impresso em camadas, sendo ensaiadas em dois sentidos. A Figura 29 mostra a configuração do teste com a amostra referência em ensaio de três pontos seguindo a norma BS 196-1 (EN, 2016) utilizado por Meurer e Classen (2021) e Wolfs, Bos e Salet (2019).

Figura 29 – Ensaio de resistência à flexão na amostra de referência



Fonte: Adaptado de Meurer e Classen (2021) e Wolfs, Bos e Salet (2019).

As amostras impressas também foram submetidas ao mesmo equipamento com variação da posição de impressão das suas camadas.

Meurer e Classen (2021) obtiveram uma ligeira diminuição de resistência quando a carga foi aplicada no sentido paralelo à impressão e uma redução de cerca de 25% em comparação ao concreto de referência. Os parâmetros de estudo se relacionaram ao tempo de deposição das camadas e foi visto que a resistência à tração na flexão em todos os sentidos foi reduzida quando esse tempo excedeu 10 minutos.

Os resultados obtidos por Wolfs, Bos e Salet (2019) utilizando do mesmo ensaio em três pontos, mostraram uma redução na resistência à flexão de 20% com interfaces encapadas no intervalo de 4 horas e desencapadas para a deposição da camada superior, indicando que a desidratação da superfície da camada pode ser uma das principais causas da redução desta resistência em estruturas impressas.

Os ensaios para a obtenção da resistência à flexão, foi realizado por Wolfs, Bos e Salet (2019) em três pontos e em corpos de prova prismáticos cortados em serra, de dimensões de 40 x 40 x 160 mm e ensaiados com taxa de 50 N/s até a ruptura. Ele constatou que a orientação II, conforme Figura 28 é um pouco mais fraca que a direção I em 14%.

O teste de resistência à tração na flexão é um ensaio padrão e frequentemente utilizado em diversos estudos de propriedades mecânicas de materiais cimentícios. É importante destacar que esta resistência depende da geometria do corpo de prova, deste modo é mais válido a comparação entre amostras com idêntica forma (MEURER; CLASSEN, 2021). É possível relacionar estes resultados com os resultados obtidos pelo teste de tração direta, porém este último é o que mede mais precisamente a ligação entre as camadas.

2.3.6 Ensaios de aderência entre camadas

A ligação entre si das camadas de concreto impresso é fundamental para garantir uma boa construtibilidade, deste modo, experimentos sobre essa propriedade são muito importantes e mostram a vulnerabilidade das estruturas devido à baixa resistência das interfaces de ligação. Um dos maiores desafios da impressão 3D é o desenvolvimento de técnicas que adere as camadas extrudadas para alcançar uma estrutura homogênea e resistente (ZAREIYAN; KHOSHNEVIS, 2017).

Autores como Sanjayan *et al.* (2018), Ma *et al.* (2020), Padilha (2020) utilizam adaptações de algumas normativas para a determinação da resistência de aderência entre as camadas, sendo o ensaio com resultado mais aproximado o de tração, conforme (ASTM D7234-21, 2021).

Porém, testes de tração do material cimentício impresso não possuem critérios pré-estabelecidos. A resistência pode ser dada por três tipos de ensaio: tração direta, tração por compressão diametral (método indireto) e tração na flexão, mas, cada um dos métodos fornecem diferentes valores de resistência à tração para um mesmo material (FARIAS *et al.*, 2018).

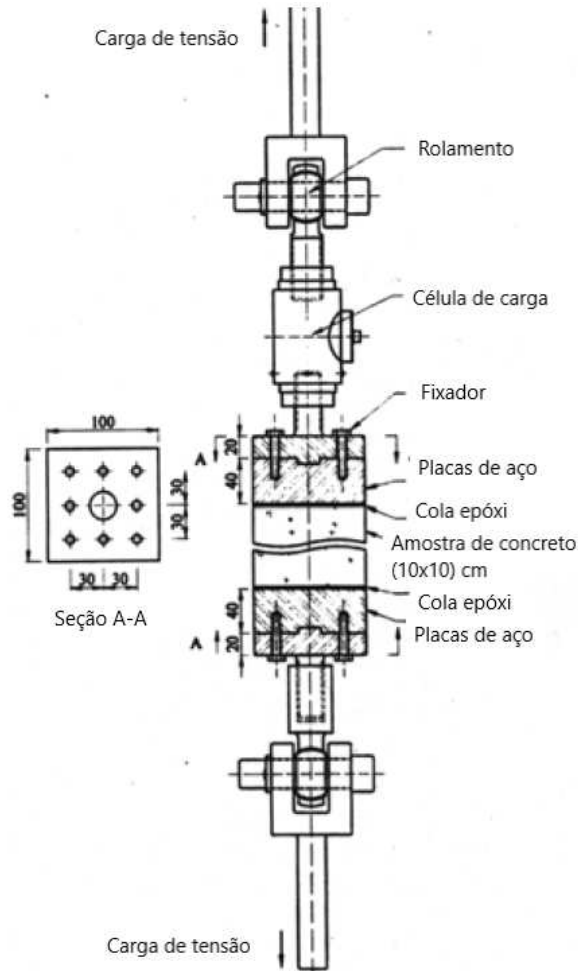
De acordo com Mier e Vliet (2002), a tração direta é o método mais adequado porque mais se aproxima do valor real da resistência à tração do concreto, e aplicado a impressão 3D deve promover o descolamento das camadas que foram apenas depositadas uma sobre a outra, a princípio, sem nenhum tipo de cola que as une, o resultado deste tipo de ensaio é fundamental para o conhecimento das propriedades mecânicas e durabilidade da estrutura.

Zheng, Kwan e Lee (2001) elaboraram um método de ensaio que induz a ruptura, utilizaram 200 corpos de prova prismáticos de diferentes resistências e colaram pratos de aço

centrados nas bases do corpo de prova tracionando-os até que a tensão transmitida produzisse a tração pura, as dimensões dos corpos de prova variaram de 150 a 500 cm.

A Figura 30 traz a representação deste ensaio.

Figura 30 – Dispositivo para Ensaio de Tração Direta do Concreto

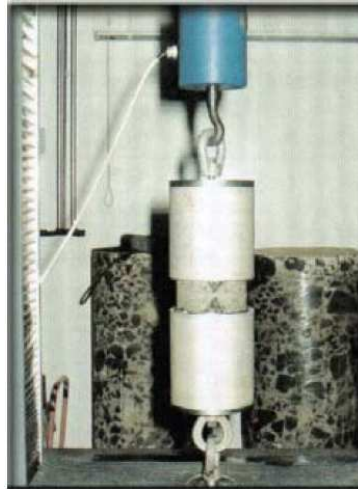


Fonte: Zheng, Kwan e Lee (2001).

Este dispositivo consistia em um maquinário aplicando força de tração em chapas metálicas fixadas no topo e na base do dispositivo por meio de chumbadores e coladas no concreto com cola à base de epóxi.

Outro método para determinar a resistência à tração de concretos foi desenvolvido por (FURNAS, 1997), no Laboratório de Concreto de Furnas Centrais Elétricas, em Goiânia (GO). O equipamento foi composto por um conjunto de pescadores de testemunhos com duas caixas de mola cônica circulares prendendo firmemente os corpos de prova. Deste modo a tensão é transmitida por tampas acopladas a um sistema que evita a rigidez do conjunto. O equipamento desenvolvido e o arranjo do conjunto estão na Figura 31.

Figura 31 – Dispositivo para Ensaio de Tração Direta do Concreto por FURNAS



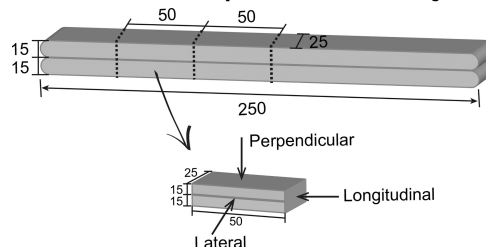
Fonte: FURNAS (1997).

De acordo com a figura, é possível observar que o equipamento consistiu em ganchos metálicos ligados ao topo e a base dos pescadores que prendiam os corpos de prova, não utilizando a cola epóxi como Zheng, Kwan e Lee (2001).

O ensaio de tração direta aplicado à impressão 3D tem como finalidade, medir a ligação entre as camadas impressas, atualmente não existe uma abordagem padrão para medir esta resistência. Sanjayan *et al.* (2018) propuseram um método de ensaio adaptado do teste de Pull-Off, ASTM D 7234, de tração para determinar a aderência entre as camadas de concreto impresso sobrepostas, que corresponde a impressão de duas camadas, o método é semelhante ao utilizado por Zheng, Kwan e Lee (2001).

As amostras destinadas a este ensaio foram cortadas do tamanho total do material impresso (250 x 25 x 30 mm) e serradas em amostras menores (50 x 25 x 30 mm). A forma de corte está representada na Figura 32.

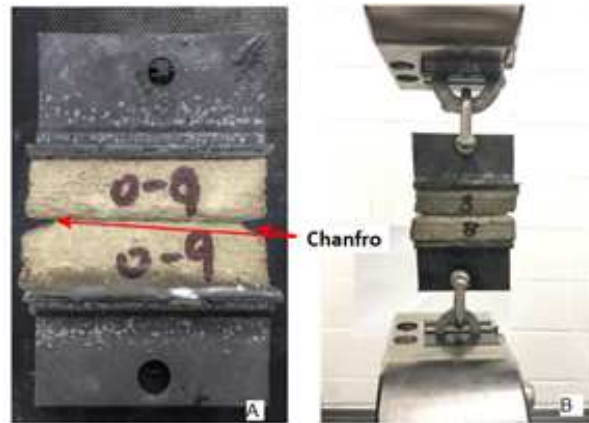
Figura 32 – Método de corte para ensaio de tração intercamada



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

Os corpos de prova foram cortados da amostra maior em cerca de 50 mm de comprimento e foram abertos chanfros para induzir a ruptura na interface desejada. Estes corpos de prova foram colados a dois dispositivos metálicos auxiliares de tração por cola do tipo epóxi e assim submetidos ao ensaio conforme representado na Figura 33.

Figura 33 – Método de ensaio de tração direta por Sanjayan *et al.* (2018)

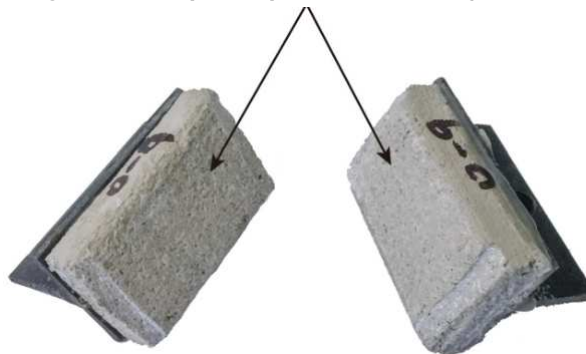


Fonte: Adaptado de Sanjayan *et al.* (2018).

É possível observar que nas pastilhas metálicas posicionadas nos dois lados da amostra foram adicionados ganchos com a finalidade de se prender a prensa que aplicou uma força de tração na extremidade superior provocando o destacamento de uma camada da outra.

A ruptura se deu de acordo com a Figura 34.

Figura 34 – Ruptura após ensaio de tração direta



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

Uma adaptação a este método foi feito por Padilha (2020), onde foram confeccionados dispositivos de ligação entre prensa e pastilha e colados com cola do tipo epóxi aderindo o concreto à base metálica e assim aplicado o carregamento tracionado as duas camadas impressas. A Figura 35 mostra o esquema adotado pela autora e o corpo de prova posicionado para o ensaio.

Figura 35 – Método de ensaio de tração direta por Padilha (2020)



Fonte: Padilha (2020).

A variável adotada por Sanjayan *et al.* (2018) e Padilha (2020) para a comparação dos resultados deste teste foi o intervalo de tempo de deposição entre uma camada e outra, também utilizada por Meurer e Classen (2021). Assim, a tabela 4 mostra as resistências de aderência obtidas por estes autores, vale destacar que a taxa de aplicação da carga utilizada por Sanjayan *et al.* (2018) e Meurer e Classen (2021) foi de 1 mm/min e 500 N/s utilizada por Padilha (2020).

Tabela 4 – Resistência de aderência obtida pelos autores

ENSAIO	AUTORES	DIMENSÕES	INTERVALO DE TEMPO DE DEPOSIÇÃO DE CAMADAS (min)	RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA (MPa)
Tração direta adaptado da ASTM D7234-12;	Sanjayan et al. (2018)	(50 x 25 x 30) mm	10	0,65
			20	0,34
			30	0,65
Tração direta adaptado da ASTM D7234-12 com uso de extensômetro e entalhe na amostra	Meurer e Classen (2021)	(40 x 40 x 40) mm	10	1,10
			20	0,40
			30	0,80
			40	0,30
Tração direta adaptado da ASTM D7234-12 e Sanjayan et al. (2018)	Padilha (2020)	(50 x 50 x 50) mm	0	1,06
			20	0,13
			40	1,13

Fonte: Autoria própria (2023).

Portanto, observa-se que os valores de tensão máxima obtidos por Sanjayan *et al.* (2018) giraram em torno de 0,65 MPa com intervalo de tempo de 10 minutos e os mesmo 0,65 MPa com intervalo de tempo de 30 minutos.

Os valores de tensão máximo obtidos por Padilha (2020), giraram em torno de 1 MPa, utilizando intervalos semelhantes aos de Sanjayan *et al.* (2018), enquanto que (MEURER; CLASSEN, 2021) obteve o valor máximo de 1,10 MPa com intervalo de deposição de 10 minutos.

Sanjayan *et al.* (2018) justificaram seus resultados neste ensaio sugerindo que após a extrusão, o concreto é exposto ao ar, e ao aumentar essa janela de tempo, a umidade desaparece por evaporação deixando a superfície seca e rígida, porém, mais umidade vem sendo trazida à superfície pela exsudação de água no material quando esse tempo é suficientemente grande.

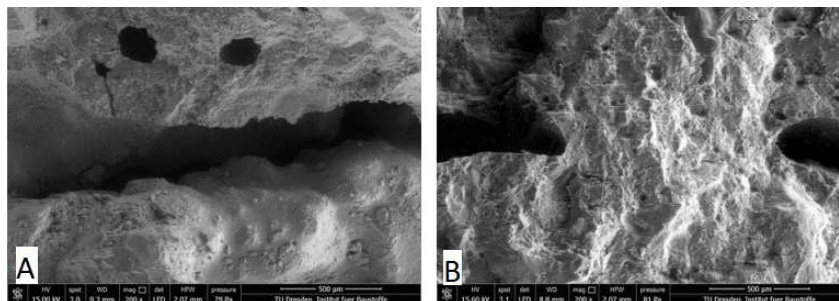
Portanto, a umidade superficial do material impresso é necessária para manter a trabalhabilidade adequada da superfície para desenvolver a ligação entre as camadas (SANJAYAN *et al.*, 2018); (MA *et al.*, 2020). Além disso, conhecer a microestrutura da superfície da camada é importante para identificar a distribuição de poros e vazios, que pode ser a causa do enfraquecimento da aderência, promovendo mecanismos para o estudo de novas adições que possam melhorar este aspecto.

2.3.7 Microestrutura das camadas de materiais cimentícios impressos

Nerella, Hempel e Mechtcherine (2019), investigaram a região entre duas camadas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e concluíram que a mistura com maior homogeneidade microestrutural na interface e com poros menores contribui com uma melhor aderência entre as camadas do material. A mistura com melhor aderência e menor porosidade foi o composto por cimento, microsíllica, cinza volante, areia e superplastificante.

Esta amostra apresentou redução significativa da cavidade de ligação entre as camadas aos 28 dias, indicando que a interface se fortaleceu, o que foi comprovado com ensaios de tração. Na Figura 36 é possível visualizar a diferença microscópica entre as duas idades.

Figura 36 – Interface da camada observada por meio de microscopia eletrônica de varredura para a mesma mistura em 1 A); e 28 dias B).



Fonte: Nerella, Hempel e Mechtcherine (2019).

A figura mostra a redução de quase metade do comprimento do poro, indicando que houve a união da camada com a finalização do processo de cura aos 28 dias.

Da mesma forma, Ma *et al.* (2020), investigaram as microestruturas das camadas por meio da microscopia eletrônica de varredura e os resultados sugeriram que com uma arga-

massa aditiva à base de cimento sulfoaluminoso (CSA) e fibra de celulose, houve uma melhora na hidratação, gerando uma ligação mecânica maior entre as camadas impressas que mantiveram uma boa umidade. Portanto, Ma *et al.* (2020) apontaram que o composto de fibra de celulose melhora a hidratação interface e promove a redução de vazios e falhas longitudinais.

Ainda para as investigações em microescala do material com a finalidade de obter a evolução da química do concreto nas primeiras horas de hidratação, bem como o efeito de misturas e como elas interferem na superfície das camadas, Geng *et al.* (2020) dão ênfase para a morfologia, cristalização e composição de produtos de hidratação de cimento.

Monteiro *et al.*, (2019), por meio do teste, estudou a montagem das fases e sua evolução durante a hidratação e concluíram que deve-se tomar cuidado com amostras com superplastificantes que podem apresentar picos mais altos distorcendo os resultados. Têm-se ainda que a adição de nanomateriais em sistemas cimentícios modifica a microestrutura da matriz promovendo interações eficazes entre partículas C-S-H precipitadas, passo importante para compreender o mecanismo de densidade de empacotamento em concretos impressos.

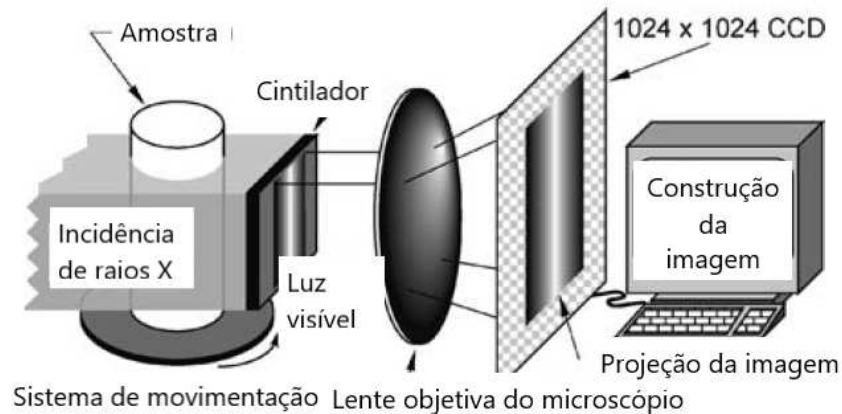
Geng *et al.* (2020) obteve como resultado em suas análises por MEV que o conteúdo de sílica e (HPMC) teve um efeito sobre a largura do tipo de microfissura da interface, concluindo que a formação de microporos e de geometria alongada é possível obter um aumento da aderência entre as camadas.

Esta característica também pode ser verificada por meio da microtomografia computadorizada de raios-X que consiste em uma técnica que analisa a porosidade dos materiais sem modificar sua estrutura (LU; KEANE, 2006). O equipamento tem a capacidade de fatiar o elemento fornecendo imagens das seções transversais do objeto, sendo um ensaio não destrutivo (BOUXSEIN *et al.*, 2010).

Além da análise qualitativa por meio das imagens geradas pelo equipamento, também é possível obter informações a respeito do volume total dos poros e percentual de porosidade, possibilitando a diferenciação entre poros fechados e abertos e dimensão da forma adquirida por eles (LU; KEANE, 2006), sendo uma alternativa de análise aplicada a materiais cimentícios como forma de quantificar os poros existentes nas diferentes misturas.

O mecanismo de funcionamento do microtomógrafo permite projeções da amostra em várias direções por meio da sua rotação e emissão de feixes de raio-X, a região mais densa é a mais escura, portanto os poros são apresentados com as escalas mais claras de cinza até branco, na Figura 37 é possível observar o esquema de funcionamento do microtomógrafo.

Figura 37 – Esquema de funcionamento do microtomógrafo



Fonte: Adaptado de Lu e Keane (2006).

As imagens fornecidas pelo computador possibilitam a visualização da distribuição da porosidade em diferentes pedaços da amostra, em materiais cimentícios é possível comparar o aumento ou diminuição da quantidade de poros em relação a diferentes materiais adicionados na mistura, assim como Nogueira (2019) que verificou que incorporação de nanosílica em teores de 0,5 e 1% em argamassas resultou na otimização da microestrutura do corpo de prova com redução de porosidade total aos 7 e aos 28 dias em relação ao material sem essa adição.

Baldon (2021) verificou por meio da análise por μ -CT o refinamento da microestrutura dos compostos cimentícios com adições, ele obteve 30% de redução do percentual de poros da mistura com sílica e metacaulim em relação a referência sem essa adição aos 28 dias. Em se tratando a aderência entre camadas impressas de material cimentício, conhecer a porosidade da microestrutura da interface possibilita entender a ligação da sobreposição.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir aos objetivos propostos nesta dissertação, o Programa Experimental buscou desenvolver e avaliar materiais cimentícios extrudáveis para impressão 3D com incorporação de (MC) e (HPMC) e verificar, por meio de ensaios mecânicos a influência destas adições na aderência entre camadas do material impresso e em suas propriedades mecânicas.

Deste modo, o programa foi dividido em três campanhas, sendo a campanha experimental 1 (3.3.1), correspondente aos ensaios em pastas cimentícias e o desenvolvimento do material extrudável. A campanha experimental 2 (3.3.2) considerou à caracterização do material impresso e verificação da umidade superficial por meio da termografia e a campanha experimental 3 (3.3.3), focou nas propriedades mecânicas e aderência entre as camadas por meio de ensaios em estado endurecido e investigação microscópica da interface por microtomografia computadorizada de raio-X (μ - CT).

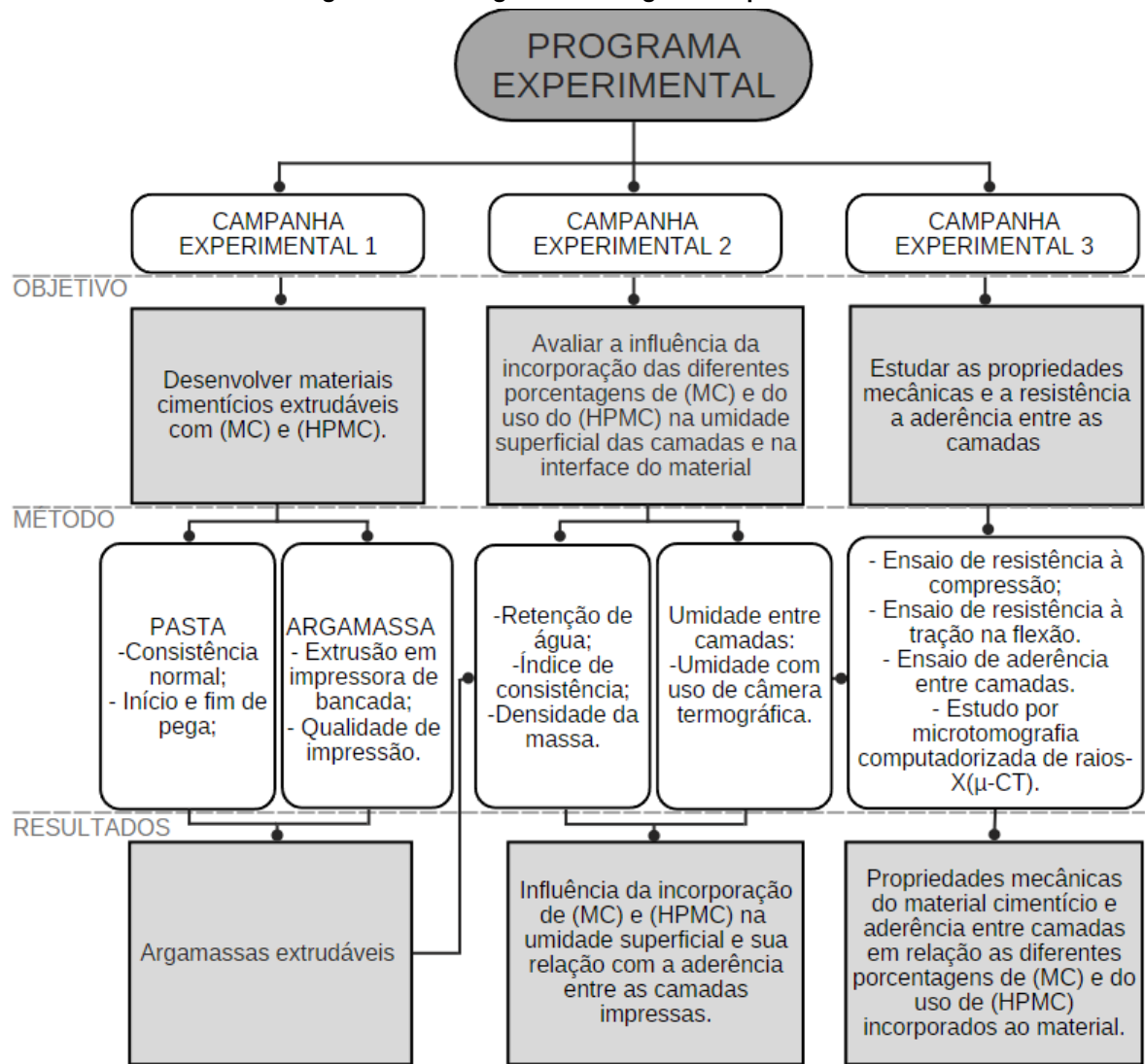
O esquema do programa experimental está representado através do fluxograma da Figura 40, apresentando os objetivos, métodos e resultados. Por meio da revisão bibliográfica e testes preliminares foram definidos parâmetros para a impressão, métodos para o estudo de umidade superficial, tamanho e coleta das amostras e orientação dos elementos para os ensaios de propriedades mecânicas.

Na campanha experimental 1 foram estudadas pastas com 0%, 10% e 30% de (MC) em substituição da massa de cimento e 0,3% em adição do aditivo químico (HPMC). Esta campanha foi dividida em duas etapas, a primeira, visou a determinação da quantidade de água necessária para atingir a consistência normal e obter a relação água/cim para as pastas a serem submetidas ao ensaio de início e fim de pega. Com estes resultados foi possível selecionar as misturas promissoras para a confecção das argamassas levadas para a segunda etapa, de extrusão e qualidade impressão pelo método adaptado de Kazemian *et al.* (2017).

A campanha experimental 2 correspondeu a caracterização da argamassa imprimível pelo índice de consistência, densidade da massa e retenção de água. Nesta etapa foi verificada a relação entre incorporação de (MC) e (HPMC) com os aspectos de umidade superficial por meio da câmera termográfica, possibilitando assim a relação destes resultados com a resistência de aderência entre as camadas e propriedades mecânicas.

Para a conclusão da pesquisa, a campanha experimental 3 consistiu aos ensaios de compressão, tração na flexão e tração direta - para determinar a resistência de aderência entre camadas. Esta campanha 3 também visou a investigação microestrutural da interface do material impresso por meio da microtomografia computadorizada de raios-X(μ -CT). Na Figura 40 observa-se o esquema do programa experimental com a divisão das campanhas contendo o objetivo, método e resultados de cada uma delas.

Figura 38 – Fluxograma do Programa Experimental



Fonte: Autoria própria (2023).

Deste modo, será possível definir qual mistura é a mais promissora atendendo aos critérios estabelecidos e a relação com as propriedades mecânicas e a aderência entre as camadas da argamassa extrudada. Para isto, a seleção dos materiais é a primeira etapa do processo de impressão 3D.

3.1 Materiais

A seguir são apresentados os materiais utilizados nas pastas e argamassas assim como os procedimentos e método para a realização dos ensaios das campanhas experimentais que compõe esta pesquisa. Os materiais em questão são: cimento Portland CP II F 40, areia natural, metacaulim (MC), aditivo químico hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e água. A mistura destes materiais devem apresentar características favoráveis à impressão 3D e são facilmente

encontrados em território nacional, o que facilita mais pesquisas sobre o tema. Os materiais de adição e substituição foram escolhidos para tornar a argamassa imprimível, de acordo com a bibliografia e disponibilidade dos materiais.

3.1.1 Cimento Portland CP II F-40

Na elaboração dos materiais cimentícios da pesquisa foi utilizado o Cimento Portland CP II F-40, ele apresenta características físicas e químicas próximas do cimento OPC Tipo I que é o mais utilizado pelos autores da literatura científica, regulamentado pela NBR 16697 (2018). A Tabela 5 mostra as especificações do cimento Portland CP II F-40.

Tabela 5 – Características químicas e físicas do cimento Portland CP II F-40

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	
MgO	4,0 %
Pf 1000 °C	5,3 %
Res. Insolúvel	
SO ₃	3,1
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Início de pega (min)	189
Fim de pega (min)	266
Resistência a compressão 3 dias (MPa)	38,7
Resistência a compressão 7 dias (MPa)	43,8
Resistência a compressão 28 dias (MPa)	48,1

Fonte: Autoria própria (2023).

3.1.2 Areia

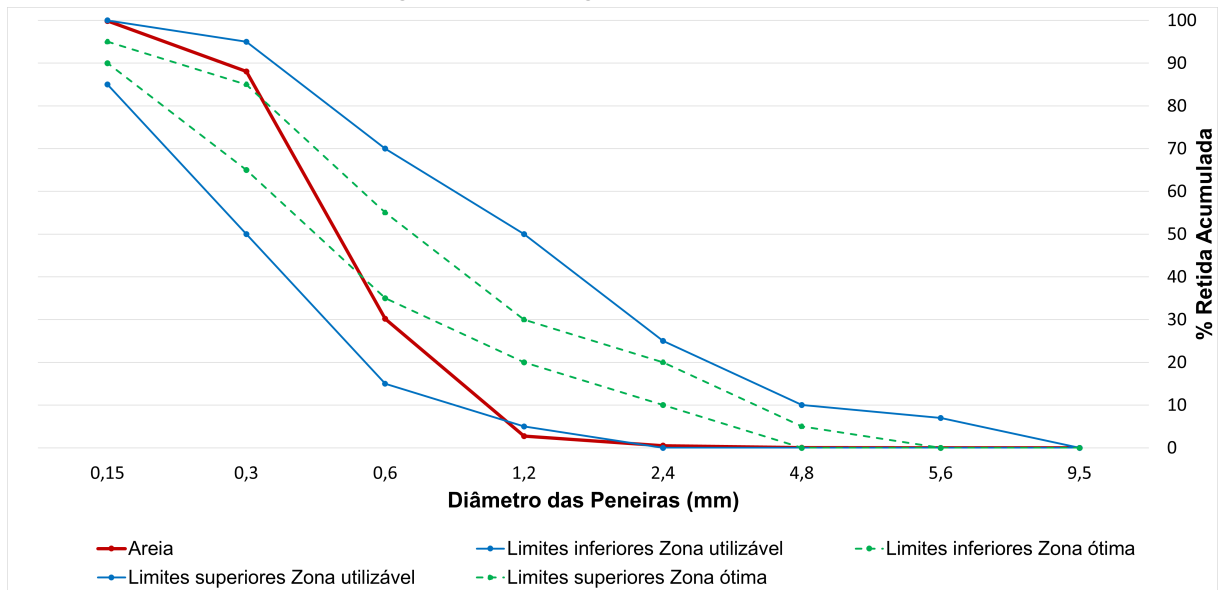
A areia utilizada nesta pesquisa é do Rio Paraná. Com os procedimentos para a análise granulométrica, estabelecidos pela ABNT NBR NM 248 (2003) os resultados obtidos estão na Tabela 6 e a curva granulométrica representada na Figura 39.

Tabela 6 – Granulometria da areia

SÉRIE (mm)	MASSA RETIDA (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
4,8	0,35	0,07	0,0
2,4	1,75	0,35	0,5
1,2	9,16	1,83	2,7
0,6	132,17	26,47	30,2
0,3	297,86	59,66	88,1
0,15	57,14	11,45	99,8
Fundo	0,81	0,16	100,0

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 39 – Curva granulométrica da areia



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 39 é possível visualizar a curva granulométrica da areia desta pesquisa conforme ensaio da ABNT NBR NM 248:2003 que está nos limites estabelecidos pela NBR 7211:2009.

Os resultados da caracterização estão apresentados na Tabela 7 com as normas utilizadas para os ensaios.

Tabela 7 – Ensaio e resultados do agregado miúdo

ENSAIOS	NORMA	UNIDADE	RESULTADOS
Módulo de finura	ABNT NBR NM 248:2003		2,21
Dimensão máxima característica	ABNT NBR NM 248:2004	mm	1,2
Massa unitária	ABNT NBR NM 46:2003	g/cm^3	1,53

Fonte: Autoria própria (2023).

A dimensão média de agregado para compor os materiais de impressão 3D deve ser de 2 a 3 mm, de acordo com Jianchao *et al.* (2017a) e para que o fluxo adequado seja garantido, o tamanho máximo não deve ser superior a dimensão referente ao diâmetro do bico (JIANCHAO *et al.*, 2017b). A pesquisa em questão possui bico com 23 mm de diâmetro, possuindo ordem cerca de 4 vezes a dimensão máxima da areia, que possui 1,2 mm.

3.1.3 Metacaulim

As características químicas e físicas do metacaulim utilizadas nesta pesquisa, de acordo com o fabricante, estão apresentadas na Tabela 8 e Tabela 9, respectivamente.

Tabela 8 – Caracterização químicas do metacaulim

ELEMENTO	RESULTADO	TÍPICO	LIMITE (NBR 15.894)
SiO_2	58,5%	55,0%	-
Al_2O_3	32,8%	36,0%	-
Fe_2O_3	1,9%	3,5%	-
TiO_2	1,1%	0,7%	-
CaO	0,3%	0,4%	$CaO + MgO < 1,5\%$
MgO	0,4%	0,4%	$CaO + MgO < 1,5\%$
K_2O	1,6%	1,3%	$0,658K_2O + Na_2O < 1,5\%$
Na_2O	0,2%	0,2%	$< 0,5\%$
SO_3	0,1%	0,1%	$< 1,0\%$
Perda ao fogo	3,1%	3,1%	$< 4,0\%$

Fonte: Metacaulim do Brasil (2022).

Tabela 9 – Características físicas do metacaulim

PROPRIEDADES	RESULTADO	TÍPICO	LIMITE (NBR 15.894)
Finura (<#325 - 44)	5,9%	5,0%	$< 10,0\%$
Área Específica (BET, cm^2/g) - AE	168000	230000	> 150000
Massa Específica (kg/dm^3) - ME	2,55	2,55	-
Massa Unitária (kg/dm^3) - MU	0,69	0,64	-
Propriedades adicionais	Chapelle Mod.: 800 mg $Ca(OH)_2/g$		

Fonte: Metacaulim do Brasil (2022).

3.1.4 Aditivo Químico hidroxipropilmetilcelulose (HPMC)

Para esta pesquisa foi utilizado como aditivo químico HPMC (hidroxipropilmetilcelulose), éter de celulose não iônico, sendo solúvel em água. Sua adição é fundamental para a manutenção do índice de consistência e a retenção de água das argamassas. As características do HPMC utilizados nesta pesquisa, de acordo com o fabricante, são:

- Éter de celulose;
- Retentor de água;
- Lubrificante;
- Melhorar a trabalhabilidade;
- Aumentar a aderência da argamassa;
- Partículas menores do que $177 \mu m$.

3.1.5 Água

A água utilizada para a pesquisa provém da SANEPAR, rede de distribuição local.

3.2 Misturas e proporções para os materiais cimentícios

A dissertação contou com o desenvolvimento de pastas e argamassas com (MC) e (HPMC) promissoras para impressão 3D propostas pela doutoranda Lívia Fernanda Silva, Silva (2023), no desenvolvimento da sua tese de doutorado, que tem como título: "Materiais cimentícios suplementares desenvolvidos com metacaulim e HPMC para impressão 3D: Influência nos aspectos de extrudabilidade e construtibilidade".

Primeiramente, as pastas foram submetidas aos ensaios de consistência normal segundo a NBR 16606 (2018a) e tempos de pega NBR 16606 (2018b), os resultados obtidos no ensaio de consistência viabilizaram a definição da relação água/cimentício para o ensaio de início e fim de pega.

A proporção e nomenclatura das pastas está descrita na Tabela 10

Tabela 10 – Proporção dos materiais para as pastas

NOMECLATURA	DEFINIÇÃO	CP II F-40	METACAULIM - em substituição	HPMC (%)
p_ref	Pasta de referência	1	0	0
p_HPMC	Pasta de referência do HPMC	1	0	0,3
p_5	Pasta + 5% MC + HPMC	0,95	0,05	0,3
p_10	Pasta + 10% MC + HPMC	0,90	0,10	0,3
p_30	Pasta + 30% MC + HPMC	0,70	0,30	0,3

Fonte: Autoria própria (2023).

A pasta (p_ref), chamada de pasta referência foi a que não conteve nenhuma adição, sendo composta somente por água e cimento. A (p_HPMC) foi a referência para a adição do (HPMC), contendo água, cimento e 0,3% deste aditivo em relação a massa de cimento.

Vale destacar que todas as pastas para a seleção e confecção de argamassas extrudáveis contaram com a adição do (HPMC), portanto as pastas chamadas de (p_5MC), (p_10MC) e (p_30MC) tiveram 0,3% de (HPMC) e substituição de 5, 10 e 30% de (MC) respectivamente, em relação a massa de cimento.

Uma vez definidas as misturas utilizadas para as argamassas extrudáveis (com 0%, 10% e 30% de MC em substituição a massa de cimento), foram feitos os mesmos ensaios citados anteriormente (consistência normal e início e fim de pega) em pastas com essas porcentagens de substituição sem (HPMC) com a finalidade de caracterizar o material e destacar a influência deste aditivo. As proporções estão na Tabela 11.

Tabela 11 – Proporção dos materiais para as pastas de caracterização

NOMECLATURA	DEFINIÇÃO	CIMENTO CP II F-40	METACAULIM - em substituição	HPMC (%)
p_10MC	Pasta + 10% MC	0,90	0,10	0
p_30MC	Pasta + 30% MC	0,70	0,30	0

Fonte: Autoria própria (2023).

Portanto, as misturas selecionadas para a etapa de extrusão de argamassas foram as com 0%, 10% e 30% de substituição de (MC), confeccionadas com o traço adotado de 1:1,5 em

massa de acordo com Khalil *et al.* (2017b) e Silva (2023), as proporções utilizadas para esta etapa de preparo de argamassas estão descritas na Tabela 12.

Tabela 12 – Proporção dos materiais para as argamassas

NOMECLATURA	CIMENTO CP II F-40	AREIA	METACAULIM - em substituição	HPMC
HPMC	1	1,5	0	0,003
10MC	0,90	1,5	0,10	0,003
30MC	0,70	1,5	0,30	0,003

Fonte: Autoria própria (2023).

Com as proporções de misturas estabelecidas foi possível iniciar a campanha experimental que está descrita nas seções a seguir.

3.3 Campanha Experimental

Com a finalidade de avaliar as propriedades mecânicas e a aderência entre as camadas do material extrudado, o processo de impressão 3D percorreu as etapas de: seleção de materiais e misturas, bombeamento, extrusão, deposição de camadas, conformação e endurecimento. Cada etapa contou com os ensaios necessários para a coleta de dados desta pesquisa, sendo dividida em três campanhas experimentais.

3.3.1 Campanha experimental 1

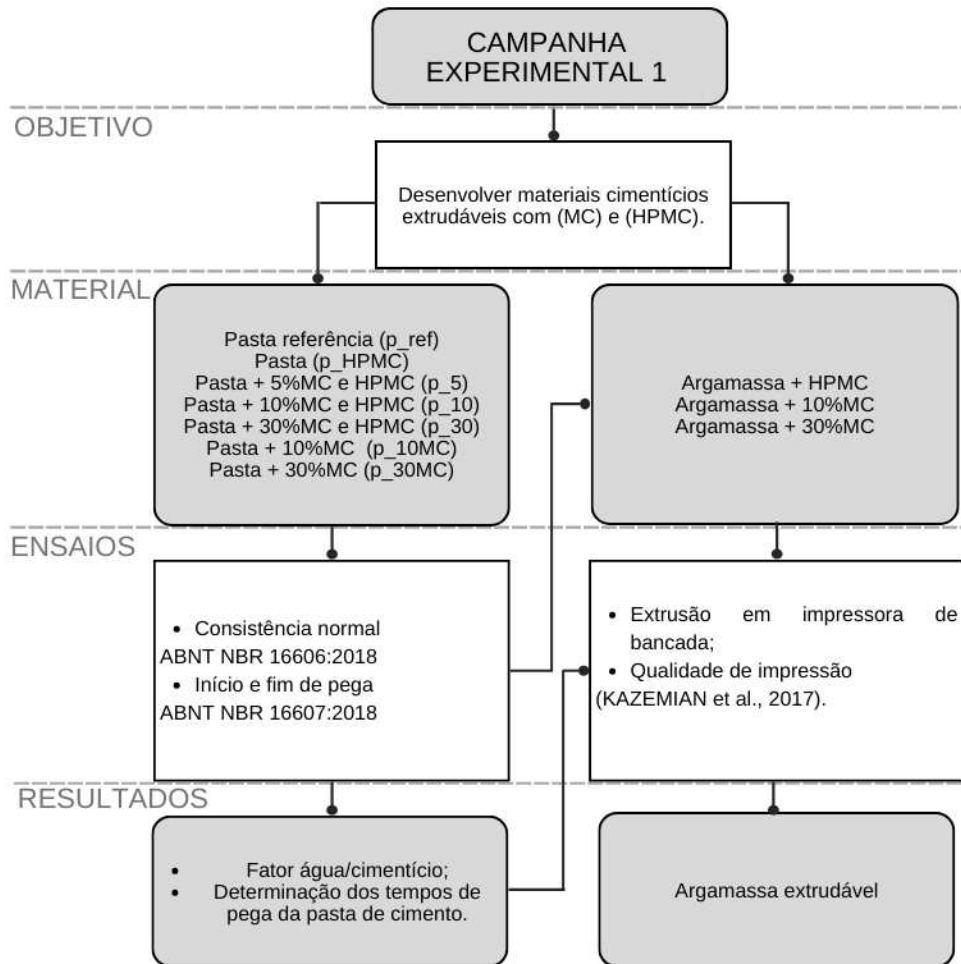
A campanha experimental 1 teve como objetivo desenvolver materiais cimentícios extrudáveis com substituição parcial da massa de cimento por (MC) em diferentes porcentagens e adição de 0,3% de (HPMC) em relação a massa de cimentícios.

Para isto, têm-se duas etapas:

1. Ensaios em pasta - determinação da relação água/cim mínima necessária para o ensaio de tempos de pega das pastas que condicionou a seleção de argamassas a serem desenvolvidas na segunda etapa;
2. Desenvolvimento e extrudabilidade das argamassas selecionadas e verificação da qualidade de impressão.

Para melhor entendimento da campanha experimental 1, segue o fluxograma da Figura 40.

Figura 40 – Fluxograma da Campanha Experimental 1



Fonte: Autoria própria (2023).

3.3.1.1 Ensaio em pasta

De acordo com o fluxograma, primeiramente, para se obter a relação água/cim, foram feitos ensaios em pasta de consistência normal de acordo com a NBR 16606 (2018a) para cada uma das 8 amostras nomeadas anteriormente, com as quantidades apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Quantidade dos materiais para as pastas

ARGAMASSA	CIMENTO (g)	METACAULIM (g)	HPMC 0,3% \ (g)	ÁGUA (ml)
p_ref	500	0	0	-
p_HPMC	500	0	1,5	-
p_5MC	475	25	1,5	-
p_10MC	450	50	1,5	-
p_30MC	350	150	1,5	-
p_10	450	50	0	-
p_30	350	150	0	-

Fonte: Autoria própria (2023).

De acordo com as quantidades estabelecidas, adotou-se os procedimentos expressos no Quadro 1 para o preparo das pastas.

Quadro 1 - Preparo das pastas

ETAPAS	PROCEDIMENTO
1	Pesagem dos materiais constituintes - cimento, metacaulim (MC), água e aditivo (HPMC) de acordo com o traço definido para pastas para a campanha experimental 1;
2	Mistura dos secos (cimento Portland CP II 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 argamassa por mais 60 s;
5	Pausa do processo de mistura, realizando a raspagem de toda superfície da pá e deixando a argamassa em repouso por 90 s;
6	Acionamento do misturador na velocidade baixa, adicionando os 25% restantes de água pelo tempo de 60s.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16541 (2016).

Para tornar possível o desenvolvimento desta etapa , foram utilizados: uma balança com sensibilidade mínima de 0,1g, argamassadeira ou misturador mecânico de pasta de cimento de acordo com a Figura 41, espátula metálica e o aparelho Vicat conforme a Figura 42.

Figura 41 – Misturador Mecânico

Fonte: Autoria própria (2023).

Após o processo de mistura, a pasta foi moldada no suporte metálico cilíndrico que foi posicionado sobre a placa de vidro (acessório do aparelho).

O aparelho de Vicat já deve estar calibrado, conforme NBR 16606 (2018a) e no momento em que a sonda de tetmajer é solta sobre a pasta, a leitura deve acusar o valor de 6 ± 1 mm para a consistência normal, se o valor não for atingido, deve-se alterar a quantidade de água e repetir o procedimento.

No caso de não obter o valor estipulado por norma, três tentativas são suficientes para traçar a equação da curva, determinando a quantidade de água necessária.

Figura 42 – Aparelho Vicat A); Pasta pronta para o ensaio B)

Fonte: Autoria própria (2023).

A realização do ensaio de início e fim de pega, foi possível após os resultados da relação água/cimentício, obtida através do ensaio de consistência normal.

Este foi adaptado da norma NBR 16606 (2018b), sendo feito por meio do Vicatronic Basic da Matest® que segue a norma EN UNI 196-3 (2016), que indica 86 penetrações e define que o início da pega ocorre quando a altura de penetração da agulha é igual ou superior a 2,5 mm e o fim da pega acontece quando a penetração da agulha é igual ou superior a 36 mm.

Os passos a serem seguidos para o início do ensaio estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Procedimento para a determinação dos tempos de pega com o uso do Vicatronic

ETAPAS	PROCEDIMENTO
1	Inserir a agulha na sonda de forma que ela fique livre para deslizar por ela;
2	Ligar o aparelho e inserir a sonda com a agulha na posição de encaixe do aparelho;
3	Iniciar a calibração da agulha (Needle Calibration), permitindo que ela desça até a placa de vidro na base do aparelho, sendo a referência zero e suba até o topo do molde, sendo a referência de 40 mm.
4	Cadastrar as informações do relatório de ensaio como: nomeclatura do material, nome do operador, temperatura, data, etc...
5	Definir o tempo entre penetrações da agulha, tipo de penetração (livre ou direcionada), e se o ensaio seguirá até o final ou será interrompido com o fim da pega;
6	Iniciar o ensaio e observar o gráfico gerado no visor do aparelho;
7	Imprimir o relatório pelo próprio aparelho que conta com uma impressora térmica (o papel a ser inserido deve ser compatível - térmico).

Fonte: Aatoria própria (2023).

A posição da agulha foi configurada como livre e foi determinado o intervalo de 5 minutos entre as penetrações, foram utilizados os seguintes equipamentos para o ensaio: balança com sensibilidade mínima de 0,1g, misturador mecânico de pasta de cimento (argamassadeira), espátula metálica e o aparelho Vicatronic, que está na Figura 43.

Figura 43 – Equipamento com a pasta pronta para o ensaio de tempos de pega



Fonte: Aatoria própria (2023).

Para a seleção das misturas direcionadas para a extrusão foram realizados os ensaios de consistência normal e início e fim de pega em 7 pastas cimentícias desenvolvidas com proporções diferentes de (MC) em relação a substituição da massa de cimento: 0%, 5%, 10% e 30% e com 0,3% de (HPMC) e uma pasta cimentícia composta somente por cimento e água afim de verificar a influência das adições.

A importância do ensaio de consistência normal se dá porque com ele é possível encontrar a relação água/cim necessária para o posterior ensaio de início e fim de pega nas pastas e das argamassas a serem extrudadas.

Conhecer os tempos de pega é necessário para a impressão 3D porque ao ser depositada a segunda camada, deve-se garantir que a primeira não tenha entrado em pega e este intervalo de tempo deve ser analisado para verificar o tempo da trabalhabilidade do material permitindo a aderência da camada seguinte.

A Tabela 14 traz um resumo da quantidade de amostras para os ensaios.

Tabela 14 – Resumo do experimento - Pasta

ENSAIOS	Amostras		N° TOTAL DE AMOSTRAS
	GEOMETRIA E DIMENSÕES	N° DE AMOSTRA POR MISTURA	
Consistência normal NBR 16606 (ABNT, 2018)	Molde cilíndrico com diâmetro de 80 mm e altura de 40 mm	3	21
Início e fim de pega NBR 16607 (ABNT, 2018)		1	7

Fonte: Autoria própria (2023).

3.3.1.2 Ensaio em argamassa - Extrudabilidade e qualidade de impressão

A segunda etapa desta campanha correspondeu a impressão das argamassas selecionadas com 0, 10 e 30% de (MC) em substituição da massa de cimento. A relação água/cimentício foi definida por meio dos estudos em pasta explicados anteriormente e as quantidades utilizadas para a confecção das argamassas para a impressão estão na Tabela 15.

Tabela 15 – Quantidade dos materiais para as argamassas

AMOSTRA	CP II F-40 (Kg)	AREIA	METACAULIM (Kg)	HPMC (0,3 (Kg))	Água (Kg)	RELAÇÃO a/cim
HPMC	40	60	0	0,12	14,68	0,36
10MC	36	60	4	0,12	15	0,37
30MC	28	60	12	0,12	16,78	0,42

Fonte: Autoria própria (2023).

Após a pesagem dos materiais ocorreu o processo de mistura descrito na Quadro 3.

Quadro 3 – Procedimento de mistura das argamassas

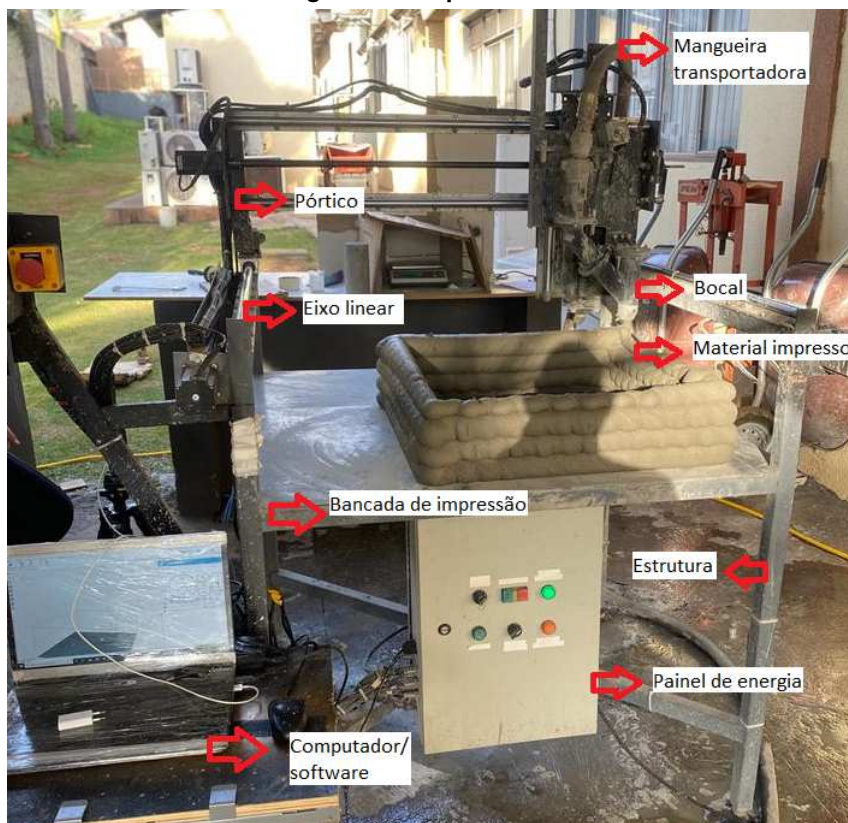
ETAPAS	PROCEDIMENTO PARA ARGAMASSAS
1	Peneira-se a areia a ser utilizada na mistura;
2	Pesagem dos materiais constituintes - cimento, areia, metacaulim (MC), água e aditivo (HPMC);
3	Mistura dos secos (Cimento Portland CP II F-40, areia, (MC) e (HPMC) no misturar;
4	Funcionamento do misturador na velocidade baixa, adicionando 75% da água de mistura nos 10s iniciais contados a partir de 30s do início do funcionamento.
5	Alteração para velocidade alta, misturando a argamassa por mais 60s;
6	Pausa do processo de mistura, com raspagem da superfície da pá e com a argamassa em repouso por 90s;
7	Funcionamento do misturador em velocidade baixa, adicionando os 25% restantes de água pelo tempo de 60s.

Fonte: Autoria própria (2023).

A argamassa foi submetida ao ensaio de extrudabilidade por meio de uma impressora 3D de bancada com $1m^2$ de área de mesa contendo um equipamento de bombeamento, motor e misturador e após este processo, o material foi verificada pelo método de Qualidade de Impressão (KAZEMIAN *et al.*, 2017) adaptado.

A impressora foi desenvolvida no Centro Universitário de Maringá (Unicesumar) no projeto de pesquisa de mestrado de Tecnologias Limpas sob orientação da prof. Dr^a. Luciana Cristina Soto Herek Rezende (REZENDE, 2020), sendo o trabalho de mestrado do Me. Maicon Douglas Leles da Silva, gentilmente disponibilizada para a esta etapa da pesquisa. O maquinário está na Figura 44.

Figura 44 – Impressora 3D



Fonte: Silva (2021).

A Figura 44 ilustra a impressora que foi utilizada e as peças que fazem parte dela, tornando possível seu funcionamento, na Figura 45 observa-se o misturador e o sistema de bombeamento.

Figura 45 – Misturador e sistema de bombeamento



Fonte: Aatoria própria (2023).

O projeto da estrutura do material impresso foi modelado no software Repetier®, aplicativo de impressão 3D desenvolvido pela HotWorld GmbH & Co que enviou os comandos para a impressora, tornando o processo possível.

O maquinário contou com uma estrutura metálica, composta por tubos quadrados e chapas de aço que compõe os 3 eixos nas direções X, Y e Z que utilizam quatro motores, sendo 2 para o eixo Y, 1 para o eixo X e 1 para o eixo Z.

A impressora foi desenvolvida para funcionar nas vazões de 5 kg/min e 4 kg/min e nas velocidades de 10, 30 e 50 mm/s, Silva (2021) verificou que para as vazões mássicas de 5kg/min e 4kg/min, foram encontradas vazões volumétricas correspondentes à 2,6 L/min e 2,18 L/min, sendo utilizadas nesta pesquisa velocidade de impressão de 50 mm/s e bombeamento constante com vazão de 2,46 L/min (5 kg/min).

O bocal por onde a argamassa foi extrudada é circular, com 23 mm de diâmetro e o mecanismo de funcionamento consiste em uma rosca sem fim acoplada à máquina. Na Figura 46 visualiza-se a rosca utilizada.

Figura 46 – Mecanismo do bocal da impressora



Fonte: Aatoria própria (2023).

O processo de mistura para a impressão foi feito uma vez com cada traço, produzindo materiais para os ensaios de qualidade de impressão, umidade superficial, (3.3.2) e possibilitando a caracterização (3.3.1) do objeto de estudo para os ensaios de propriedades mecânicas, descrito na seção (3.3.3).

Para os ensaios de umidade superficial (3.3.2) e coleta para as amostras destinadas aos ensaios de propriedades mecânicas (3.3.3), a impressão foi programada em 2 camadas em forma de um quadrado com (40 x 40) cm de dimensão, portanto perímetro de 160. Na Figura 47 é possível observar impressão do material.

Figura 47 – Impressão do material



Fonte: Aatoria própria (2023).

Para analisar o potencial da argamassa enquanto material extrudado, foi feito o estudo pelo método "Qualidade de impressão" adaptado para o tipo de bocal do maquinário e equipamentos utilizados, por Kazemian *et al.* (2017), o aspecto sustentável também foi levado em consideração na escolha das misturas, de forma a obter uma argamassa promissora para impressão e com considerável substituição de cimento.

O procedimento tem como finalidade verificar as características da camada impressa com base na qualidade de superfície e na conformidade dimensional ao se usar uma mistura específica. Para a mistura ser considerada imprimível, o material extrudado deve atender aos 3 critérios apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Qualidade de impressão

ANÁLISE	CRITÉRIOS
1	Camada sem defeitos superficiais e mantendo continuidade ao longo do comprimento;
2	Bordas das camadas visíveis e mantendo o mesmo padrão nos vértices;
3	Conformidade e consistência na dimensão ao longo do comprimento em 3 pontos.

Fonte: Autoria própria (2023).

Deste modo, o atendimento dos critérios será garantido por meio de análise visual e com medidas da espessura da camada constantes, obtidas logo após a impressão com o auxílio do paquímetro, na Figura 48 observa-se como as medidas foram feitas.

Figura 48 – Medidas após a extrusão



Fonte: Autoria própria (2023).

A análise da conformidade e consistência da dimensão foi feita conforme Silva (2023), que verificou o coeficiente de variação em relação ao desvio padrão da largura da primeira camada ao longo do seu comprimento de impressão em três pontos.

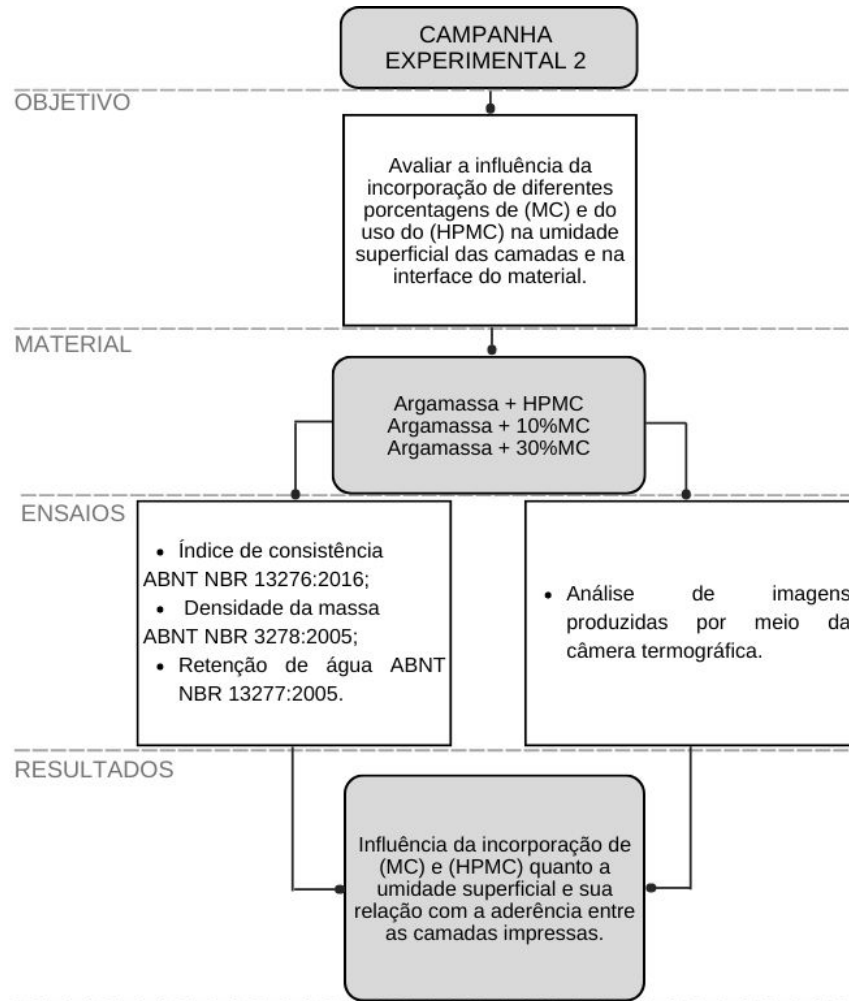
A impressão ocorreu em duas camadas produzindo material para os ensaios de umidade superficial pela câmera termográfica e para os ensaios de propriedades mecânicas, respectivamente (3.3.3). A análise referente a qualidade de impressão foi feita na primeira camada das três misturas selecionadas para a impressão impressas em formato quadrado de 160 cm de perímetro.

Após a verificação da extrudabilidade da camada, cada argamassa foi caracterizada por meio do índice de consistência ABNT NBR 13276 (2016b), densidade da massa ABNT NBR 13276 (2016a) e retenção de água NBR 13277 (2005), descritos na próxima seção (3.3.2).

3.3.2 Campanha experimental 2

A campanha experimental 2 tem por objetivo caracterizar o material impresso e estudar a umidade superficial e interface da argamassa, o procedimento está apresentado no fluxograma da Figura 49.

Figura 49 – Fluxograma da Campanha Experimental 2



Fonte: Autoria própria (2023).

Nesta etapa da pesquisa foram feitos ensaios para a caracterização das argamassas extrudáveis com 0, 10 e 30% de (MC) em substituição ao cimento e 0,3% de adição de (HPMC) em relação ao cimento. As normativas utilizadas foram as referentes ao ensaio de consistência, densidade de massa e retenção de água.

3.3.2.1 Ensaio de consistência

Este ensaio foi realizado mediante mesa de abatimento conforme ABNT NBR 13276 (2016a), em cada amostra foram feitas 3 medições do espalhamento da argamassa com o uso

do paquímetro e, posteriormente, calculada a média entre elas, o material foi coletado em dois momentos, antes de passar pelo extrusão e coletado diretamente do bocal da impressora com o auxílio de uma fôrma metálica, de acordo com a Figura 50 .

Figura 50 – Coleta da argamassa para o ensaio de consistência.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 51 observa-se os equipamentos utilizados neste ensaio e uma amostra pronta para a medição.

Figura 51 – Equipamentos para o ensaio de consistência A); Argamassa pronta para a medição B).



Fonte: Autoria própria (2023).

O ensaio de consistência está associada à capacidade da argamassa em deformar-se sob a ação de uma camada sobreposta. Portanto, as medidas foram obtidas antes e após o processo de extrusão com as três misturas das argamassas selecionadas.

3.3.2.2 Ensaio de densidade da massa e teor de ar incorporado

O ensaio de densidade foi realizado para as três misturas de argamassa pesquisa e para a argamassa composta somente por cimento, água e areia, seguindo o mesmo traço. O procedimento realizou-se de acordo a ABNT NBR 13278 (2005), no Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) de Maringá - PR, com a finalidade de caracterizar o material, verificando o teor de ar incorporado com o uso dos materiais suplementares.

3.3.2.3 Ensaio de retenção de água

O ensaio de retenção de água seguiu o procedimento da NBR 13277 (2005) sendo realizado no tempo de 15 minutos, com a finalidade de avaliar esta propriedade em relação as porcentagens de (MC) em substituição a massa do cimento e adição de 0,3% de (HPMC), o procedimento foi feito para a argamassa contendo somente cimento, água e areia e para as argamassas HPMC, 10MC e 30MC da pesquisa. Este ensaio foi feito no SENAI de Maringá - PR.

A fim de caracterizar as argamassas extrudáveis, esta etapa da Campanha Exeperimental 2, seguiu o resumo da Tabela 16.

Tabela 16 – Resumo de ensaios para caracterização da argamassa

CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS EXTRUDÁVEIS				
Procedimento	Acessórios	Nº de amostras por idade	Nº de amostras por mistura	Nº total de amostras
Índice de consistência NBR 13276 (ABNT, 2016)	Molde trônico com base maior de 125 mm e base menor de 80 mm	1	2	6
Densidade de massa NBR 13278 (ABNT, 2005)	Cubo com arestas (10 x 10 x 10) cm	1	2	6
Retenção de água NBR 13277 (ABNT, 2005)	Molde para ensaio Aparelho para retenção Papel filtro	1	1	3

Fonte: Autoria própria (2023).

A segunda etapa da campanha experimental 2 englobou o ensaio de umidade superficial por termografia.

3.3.2.4 Termografia para análise de umidade superficial

A termografia infravermelha (TI) é um procedimento utilizado na construção civil que tem a capacidade de percepção de radiação infravermelha emitida por um corpo, ela ocorre através de um aparelho detector que assimila esta transferência de calor (radiação), tornando possível a visualização de alterações nos materiais, como umidade.

A finalidade deste ensaio é verificar a diferença de umidade superficial existente em cada camada impressa por meio de imagens termográficas feitas no momento de impressão e após a deposição de todas as camadas e compará-las entre as misturas, uma vez que a umidade superficial tem relação direta com a aderência entre as camadas, para isto foi utilizada a câmera termográfica FlirE6® da Figura 52.

Figura 52 – Câmera termográfica FlirE6®



Fonte: Aatoria própria (2023).

Após cada camada ser extrudada na campanha experimental 1 (3.3.1), foi posicionado um pedestal de 30 cm de altura e 5 cm de distância do perímetro do quadrado onde seriam depositadas as camadas, de forma a apoiar a câmera sempre na mesma posição. Após a deposição de cada amostra, o pedestal recebia um calço de 5 cm para manter o padrão de altura e angulação das imagens da superfície, conforme a Figura 53.

Figura 53 – Câmera termográfica pronta para as imagens de termografia



Fonte: Autoria própria (2023).

A fotografia foi feita após cada camada ser extrudada focando na superfície e também foram tiradas de forma transversal e longitudinalmente em relação ao eixo de impressão, a posição das camadas nas fotos utilizadas para a análise estão na Figura 54.

Figura 54 – Posição das imagens das amostras feitas por meio da câmera. A) Superfície da camada; B) Posição transversal; C) Comparação entre as amostras.



Fonte: Autoria própria (2023).

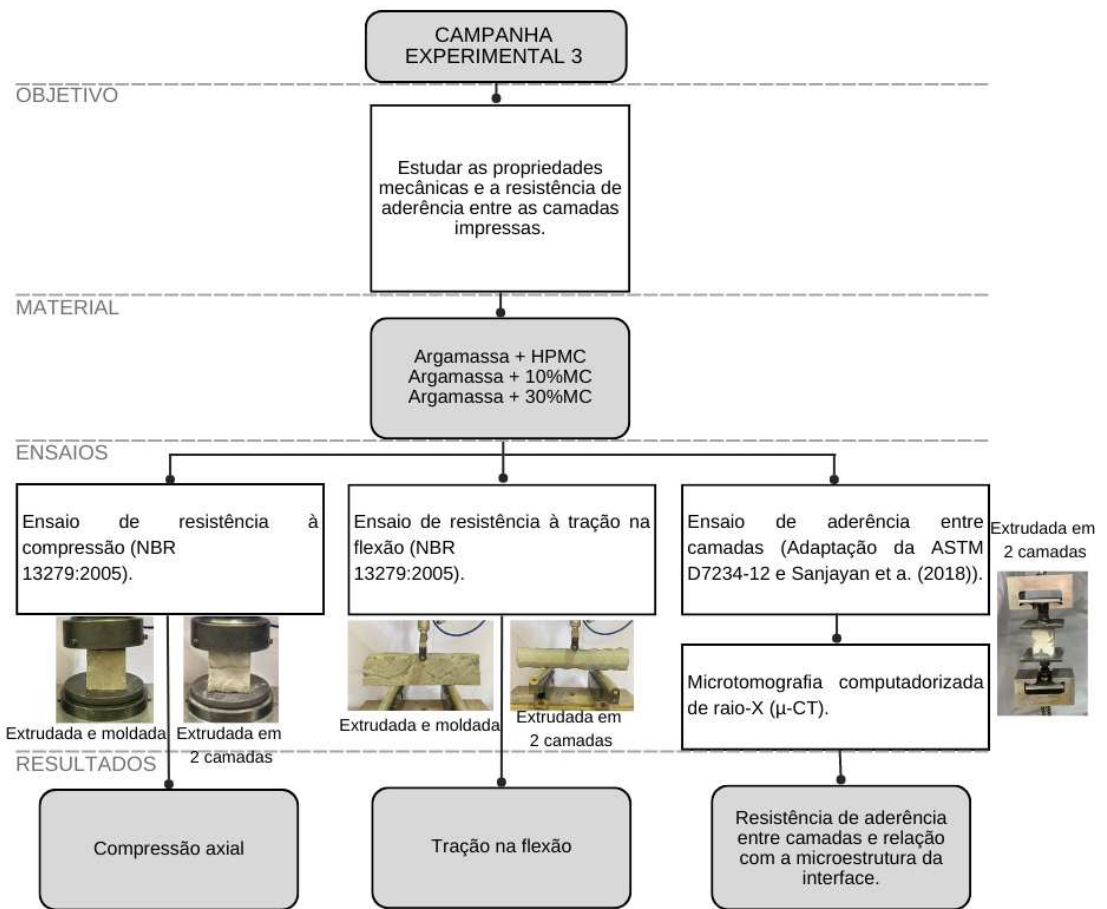
De acordo com a Figura 54, estes foram os ângulos das imagens que deram origem as fotografias térmicas para a análise. Sendo assim foram obtidas fotos superficiais de cada camada para cada mistura, de dimensões (40 x 40) cm. As imagens se deram com as camadas na posição transversal e também com elas já cortadas destinadas aos experimentos seguintes com a finalidade de compará-las (Figura 54(C)).

Os resultados obtidos nesta etapa caracterizam a superfície de cada camada, tornando possível a comparação com os resultados do ensaio de aderência entre camadas.

3.3.3 Campanha Experimental 3

A campanha experimental 3 diz respeito as propriedades mecânicas deste material impresso. O material foi coletado logo após a extrusão pela impressora e submetido aos ensaios em seu estado endurecido e seguiram os passos do fluxograma da Figura 55.

Figura 55 – Fluxograma da Campanha Experimental 3



Fonte: Autoria própria (2023).

Os materiais para esta etapa da pesquisa foram coletados no estado fresco após a extrusão (3.3.1.2) para cada um das três misturas (HPMC, 10MC e 30MC). As amostras foram coletadas da seguinte forma:

- 1. Amostras extrudadas e moldadas em forma de madeira:** Destinadas à compressão axial aos 21 e 63 dias e à tração na flexão aos 63 dias;

2. Amostras extrudadas em duas camadas: Destinadas à compressão axial e tração na flexão (aos 63 dias) e aderência entre camadas (aos 165 dias).

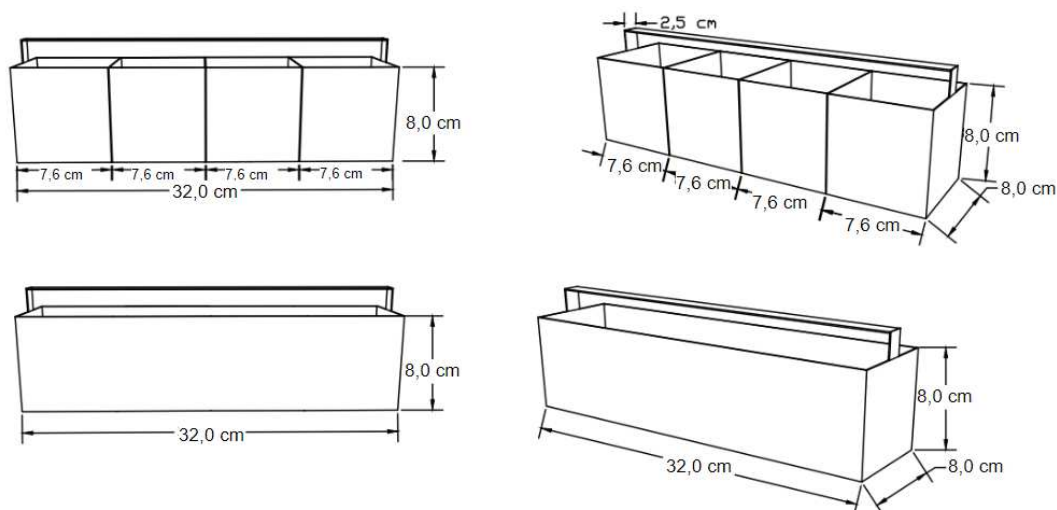
Portanto, as idades consideradas foram 21 e 63 dias, destaca-se que não há variações significativas após os 28 dias e que a idade de 63 dias é usual para as adições suplementares utilizadas nesta pesquisa. O ensaio de aderência entre camadas ocorreu aos 165 dias em decorrência de adequações do procedimento de ensaio.

As amostras impressas e construídas em camadas destinadas aos ensaios de propriedades mecânicas foram extrudadas em duas camadas sobre uma placa de madeira de modo a facilitar o manuseio. Cada camada teve 160 cm de perímetro (40 x 40 cm) e assim foi possível obter 8 amostras com comprimento de 7,6 cm (para os ensaios de aderência (SANJAYAN *et al.*, 2018); (ASTM D7234-21, 2021)) e 2 amostras com comprimento de 32 cm (para os ensaios de tração na flexão e compressão axial (ABNT NBR 13279, 2005)) com cada mistura.

As amostras foram obtidas através do corte com cortadores metálicos confeccionados para este ensaio de acordo com a Figura 56, o objetivo foi criar ferramentas que cortassem e retirassem a amostra ao mesmo tempo, por isso foram feitos de acordo com cada tamanho de amostra estipulada, sendo 2 cortadores compostos por 4 células de (7,6 x 7,6 x 8,0) cm e 1 cortador de única célula de (32,0 x 8,0 x 8,0) cm.

Os cortadores prontos para o ensaio estão apresentados na Figura 56 e as amostras sendo cortadas estão na Figura 59.

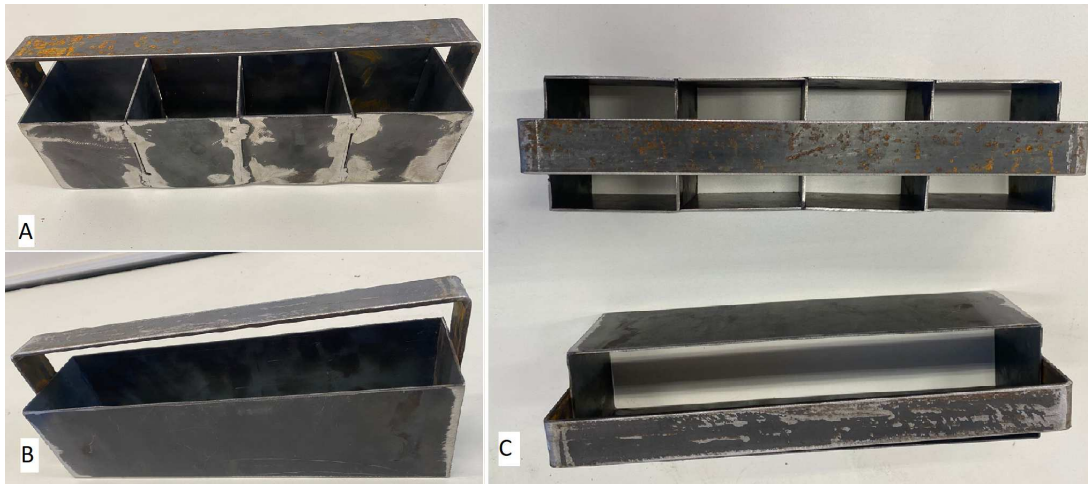
Figura 56 – Projeto para cortadores metálicos do ensaio



Fonte: Autoria própria (2023).

A partir do projeto dos cortadores, foram confeccionadas os mesmos, conforme Figura 57.

Figura 57 – Cortadores metálicos utilizados para coleta. A) Cortador com 4 células; B) Cortador com 1 célula; C) Vista superior dos cortadores



Fonte: Autoria própria (2023).

Logo após a impressão em duas camadas, as amostras foram cortadas conforme a Figura 58.

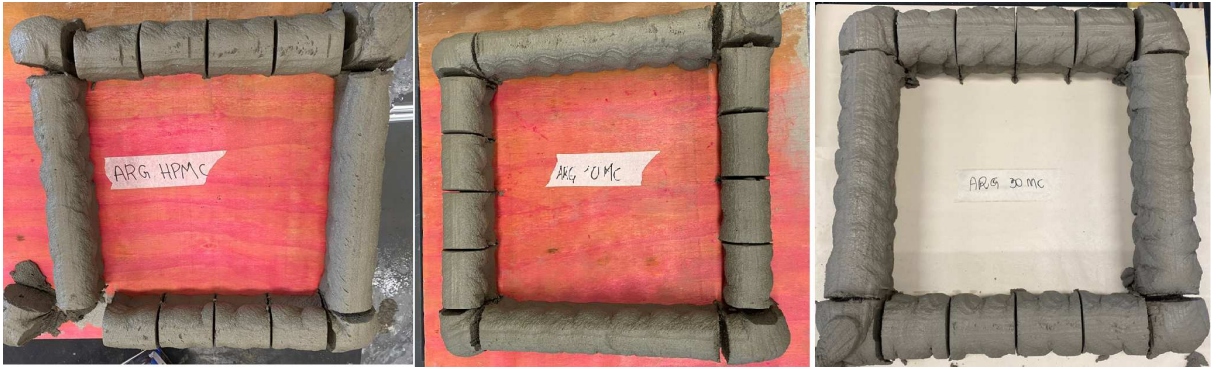
Figura 58 – Amostras sendo cortadas



Fonte: Autoria própria (2023).

As amostras foram extrudadas sobre placas de madeira de acordo com a Figura 59 e armazenadas desta forma, sendo curadas em ambiente com temperatura controlada de 25 °C , simulando cura ao ar livre.

Figura 59 – Amostras impressas em placa de madeira



Fonte: Autoria própria (2023).

Foram moldados também amostras em fôrmas de madeira com dimensões (8,0 x 8,0 x 8,0)cm para os ensaios de compressão axial (ABNT NBR 13279, 2005) e (8,0 x 8,0 x 32,0)cm para os ensaios de tração na flexão (ABNT NBR 13279, 2005) logo após a saída do bocal.

Na Figura 60 e Figura 61 é possível observar as formas de madeira confeccionadas no laboratório de maquetes da UEL, utilizadas para os corpos de prova deste ensaio.

Figura 60 – Fôrmas de madeira para os corpos de prova de compressão



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 61 – Fôrmas de madeira para os corpos de prova de tração na flexão



Fonte: Autoria própria (2023).

A Tabela 17 traz o resumo experimental com as quantidades de amostra por tempo para a realização dos ensaios descritos na sequência.

Tabela 17 – Resumo dos ensaios de propriedades mecânicas

PROPRIEDADES MECÂNICAS							
Tipo de amostra	Ensaio	Norma	Equipamento	Idade (dias)	N° de amostras por idade	N° de amostras por mistura	N° total de amostras
Extrudada e moldada em fôrmas	Resistência à compressão axial	NBR 13279 (2005)	Prensa universal de ensaios EMIC	21, 63	3	3	18
	Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (2005)	Prensa universal de ensaios EMIC	63	2	2	6
Impressa em duas camadas	Resistência à compressão axial	NBR 13279 (2005)	Prensa universal de ensaios EMIC	63	4	4	12
	Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (2005)	Prensa universal de ensaios EMIC	63	2	2	6
	Aderência entre camadas	Adaptado ASTM D7234-21 Sanjayan et al. (2018)	Prensa universal de ensaios EMIC	165	3	3	9

Fonte: Autoria própria (2023).

3.3.4 Resistência à compressão

- **Amostras extrudadas e moldadas**

Para o ensaio de resistência compressão, foram moldados 3 corpos de prova para cada mistura e idade (21 e 63 dias), a coleta se deu conforme a Figura 62, os ensaios foram realizados na Prensa Universal de Ensaios EMIC®, com velocidade de carregamento de 5 mm/min, disponibilizada pelo Laboratório de Materiais de Construção da UEL.

Figura 62 – Coleta das amostras extrudadas e moldadas



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 63 mostra os corpos de prova em estado endurecido armazenados para este ensaio.

Figura 63 – Amostras extrudadas e moldadas armazenadas aguardando realização dos ensaios.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 64 traz uma amostra pronta para o ensaio.

Figura 64 – Amostra pronta para o ensaio de compressão axial



Fonte: Autoria própria (2023).

As amostras não foram adensadas a fim de estudar o comportamento desta argamassa da forma que sai do bocal. O cálculo da resistência foi dado de acordo com os procedimentos indicados na ABNT NBR 13279 (2005) e está na Equação 2.

$$R_c = \frac{F_c}{A_{sec}} \quad (2)$$

Onde:

R_c = resistência à compressão, em MPa;

F_c = carga máxima aplicada, em N;

A_{seo} = área da seção em mm^2 .

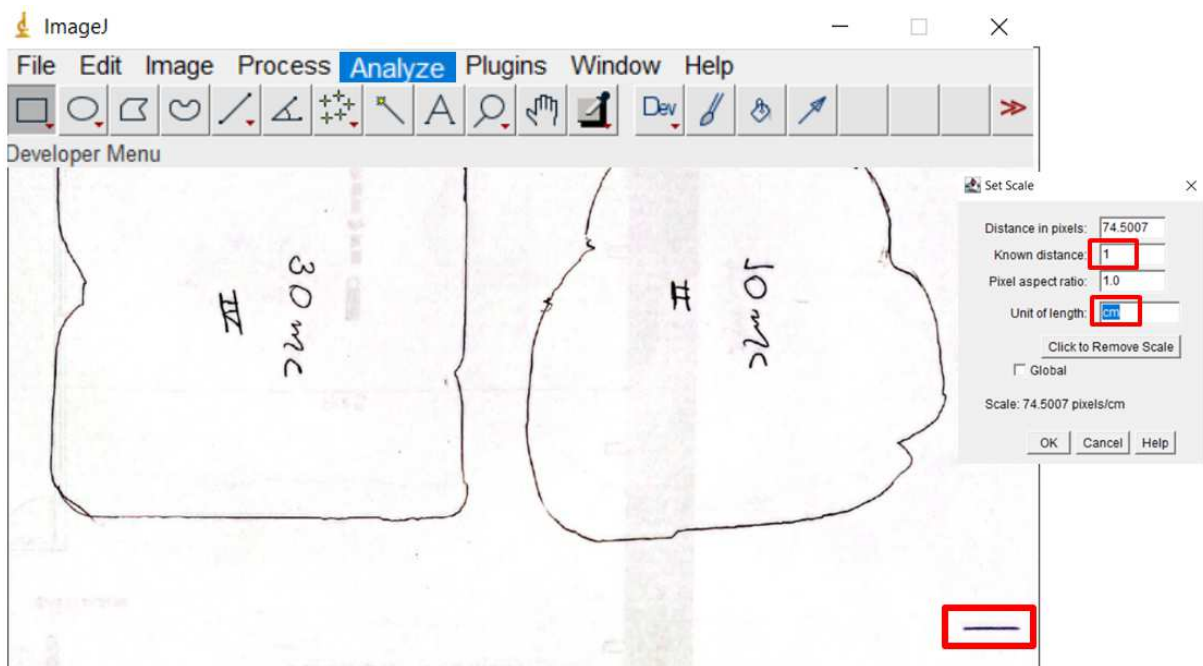
Para as amostras moldadas, por ser feita deposição livre do material na fôrma, a área de aplicação da carga variou, sendo calculada por meio do software Image J, os passos para a obtenção desta área estão descritos no Quadro 5.

Quadro 5 - Procedimentos para obtenção da área por meio do software Image J

ETAPAS	PROCEDIMENTO
1	Contorno da área de aplicação da carga com um lápis em folha de papel.
2	Foto dos contornos e exportação para o software image J.
3	Calibração do software - traçado de uma linha reta na folha contendo os contornos e indicação desta medida real em centímetros Figura 65.
4	Após a calibração, foi feito o contorno de cada uma das amostras e por meio do comando: "measure" foi determinado o perímetro e área dos elementos, Figura 66.

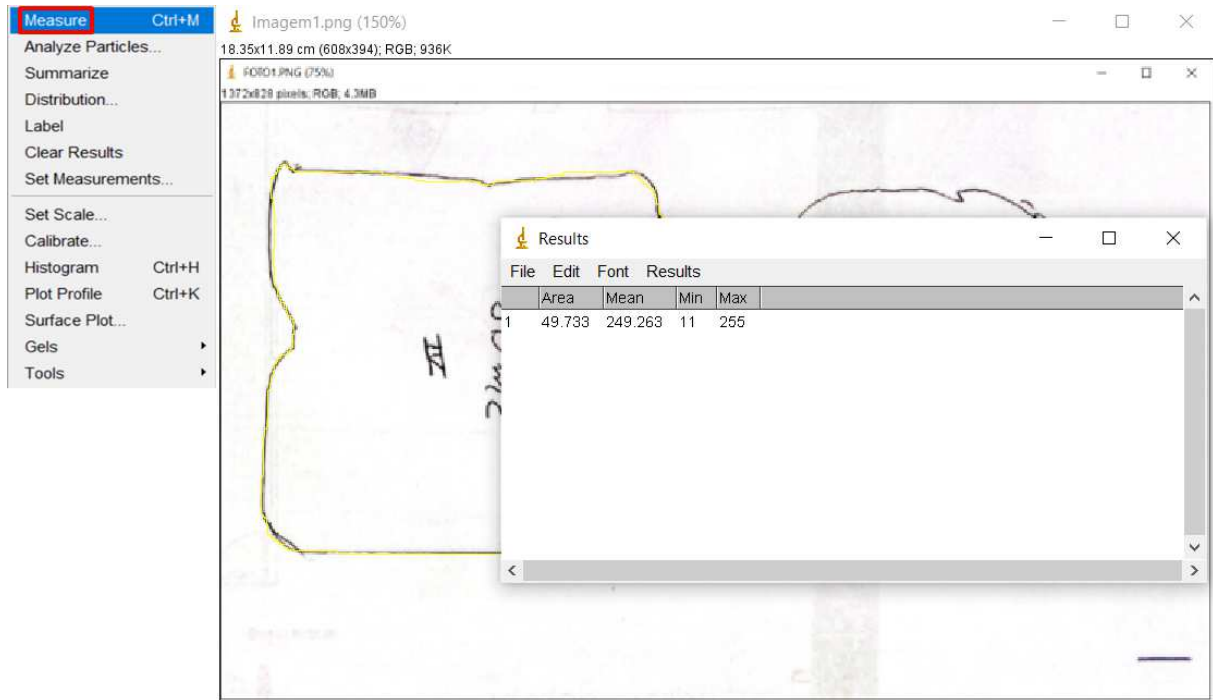
Fonte: Aatoria própria (2023).

Figura 65 – Calibração do software Image J por meio da informação das medidas convertidas em pixels



Fonte: Aatoria própria (2023).

Figura 66 – Obtenção da área por contorno da figura e comando "Measure"



Fonte: Autoria própria (2023).

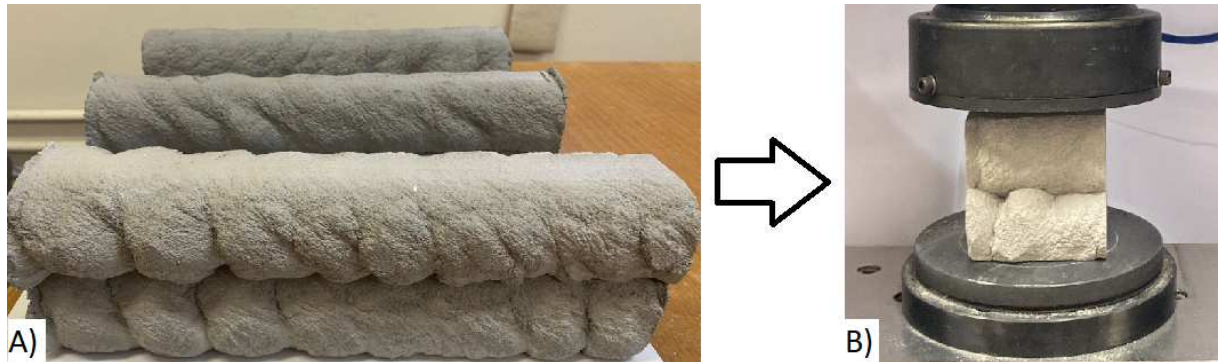
Este procedimento foi feito com todas as amostras para determinar a área de aplicação de carga no topo de cada uma delas.

Amostras extrudadas em duas camadas

As amostras foram impressas em duas camadas de 160 centímetros de perímetro, formando um quadrado de (40 x 40) cm, possibilitando a coleta com o cortador da quantidade planejada para produzir as amostras para os ensaios de propriedades mecânicas.

Para os ensaios de compressão axial foram utilizados as duas partes que se formaram a partir da ruptura do ensaio de tração na flexão. Devido a dimensão irregular adquirida pelas amostras, elas foram cortadas com serra circular com comprimento de 8 cm. A amostra que originou as partes para o ensaio de compressão axial e a amostra pronta para o ensaio estão representadas na Figura 67.

Figura 67 – Corpos de prova armazenados aguardando realização dos ensaios (A); Amostra após o corte pronta para a compressão axial (B)



Fonte: Autoria própria (2023).

O ensaio foi feito aos 63 dias em prensa da marca Emic®, de acordo com a ABNT NBR 13279 (2005) e a resistência foi calculada conforme Equação 2.

Na Figura 68 a amostra pronta para este ensaio.

Figura 68 – Ensaio de compressão axial



Fonte: Autoria própria (2023).

A largura do material variou de acordo com a sua composição, todos foram submetidos ao mesmo procedimento de mistura e extrusão, portanto a variação de dimensão se comportou como resposta do conjunto mistura + maquinário.

3.3.5 Resistência à tração na flexão

Amostras extrudadas e moldadas

Para este, foram moldados 2 corpos de prova com dimensões de (8 x 8 x 32) cm para cada mistura logo após a saída do bocal do maquinário, conforme a Figura 69. Os ensaios foram feitos com a Prensa Universal de Ensaio EMIC®, a velocidade de carregamento foi de 2 mm/min.

Figura 69 – Coleta das amostras extrudadas e moldadas



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 70 ilustra as amostras armazenadas aguardando a realização do ensaio e na Figura 71 a amostra posicionada para a tração na flexão.

Figura 70 – Amostras impressas e moldadas aguardando a realização do ensaio



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 71 – Amostra impressa e moldada no ensaio de tração na flexão



Fonte: Autoria própria (2023).

A equação utilizada para este ensaio está normatizada pela (ABNT NBR 13279, 2005) com adaptações para o tamanho das amostras desta pesquisa, e está apresentada a seguir:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (3)$$

Onde:

R_f : Resistência à tração na flexão, em MPa;

F_f : Carga vertical aplicada no centro da seção prismática, em N;

L : Distância entre suportes, em mm;

b : Dimensão da base;

h : Dimensão da altura.

A dimensão da base e da altura para estas amostras foi de 80 mm e a distância entre os apoios, de eixo a eixo, foi de 160 mm.

- **Amostras extrudadas em duas camadas**

Para os ensaios de tração na flexão, foram destinados dois corpos de prova de cada mistura e este foi realizado aos 63 dias de idade na prensa da marca Emic®, de acordo com a ABNT NBR 13279 (2005), com adaptações para o tamanho das amostras e a resistência será calculada conforme Equação 3, a base (b) e altura (h) variaram entre as três misturas, conforme a Tabela 18. Portanto b foi o L (base) e o h foi a altura (A).

O ensaio foi feito com as camadas posicionadas perpendicularmente em relação à prensa, sendo a região mais frágil do material Geng *et al.* (2020), este resultado também está

diretamente relacionado com a aderência entre camadas, que é o foco desta pesquisa. Os corpos de prova destinados à este ensaio possuíram 32 cm de comprimento e demais dimensões variáveis de acordo com as misturas.

Após a ruptura cada corpo de prova gerou 2 amostras que foram destinadas aos ensaios de compressão axial dos elementos impressos em duas camadas, portanto, os ensaios de compressão axial contaram com 4 amostras para cada mistura.

Na Figura 72 é possível visualizar os corpos de prova armazenados aguardando a realização dos ensaios.

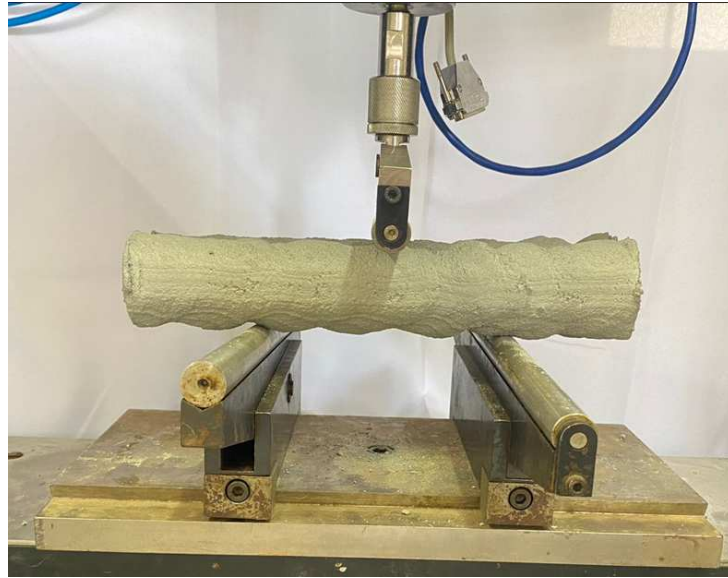
Figura 72 – Corpos de prova armazenados aguardando realização dos ensaios



Fonte: Autoria própria (2023).

Estas amostras foram posicionadas na prensa montada para o ensaio de tração na flexão em 3 apoios e o material aguardando o acionamento da prensa está na Figura 73.

Figura 73 – Amostra aguardando a realização do ensaio



Fonte: Autoria própria (2023).

A aplicação de carga se deu até o rompimento que dividiu a amostra em duas sendo destinadas ao ensaio de compressão axial.

3.3.6 Aderência entre camadas

Os ensaios de aderência entre camadas foram programados para serem realizados nas argamassas impressas em duas camadas, para as misturas (HPMC, 10MC e 30MC), em prensa universal de ensaios Emic®. O ensaio foi feito adaptando o método de Sanjayan *et al.* (2018), a resistência foi calculada com base no ensaio Pull-Off especificado pela ASTM D7234-21 (2021).

A Figura 74 mostra as argamassas cortadas para o ensaio de aderência entre camadas ainda em estado fresco.

Figura 74 – Corpos de prova cortados para o ensaio de aderência ainda em estado fresco



Fonte: Autoria própria (2023).

Assim como apresentado anteriormente, cada mistura com 160 cm de comprimento resultou em 8 amostras para este ensaio, com o total de 24 amostras, com dimensões de (7,6 x L x a), a largura (L) e altura (a) sofreram pequenas variações de acordo com a mistura e com a camada, deste modo, a dimensão no centro variou um pouco em relação ao topo e a base.

Na Tabela 18 estão apresentados os valores com as dimensões das amostras para os ensaios de aderência entre camadas inclusive a dimensão média do meio da camada.

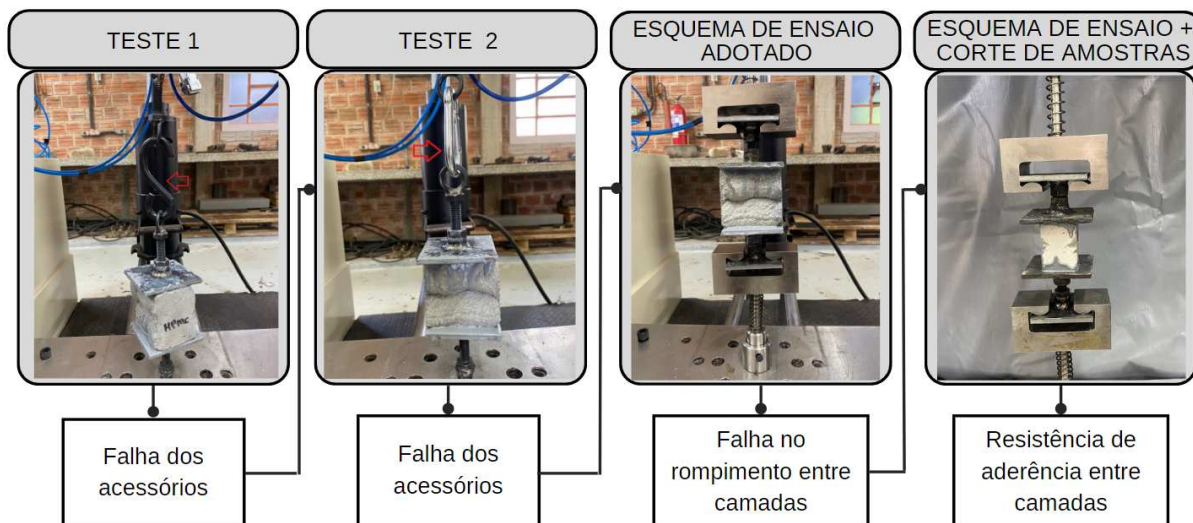
Tabela 18 – Dimensões das amostras destinadas aos ensaios de aderência entre camadas

MISTURAS	DIMENSÕES				A (cm)
	C (cm)	L (topo) (cm)	L (base) (cm)	L (interface) (cm)	
HPMC	7,6	6,0	6,1	5,1	9,7
10MC	7,6	7,0	6,3	4,7	9,5
30MC	7,6	8,2	8,0	6,9	9,5

• Esquema de ensaio

O esquema de ensaio para a resistência de aderência entre as camadas foi aprimorado ao longo da pesquisa. A Figura 75 ilustra o esquema final adotado.

Figura 75 – Esquemas de ensaio



Fonte: Autoria própria (2023).

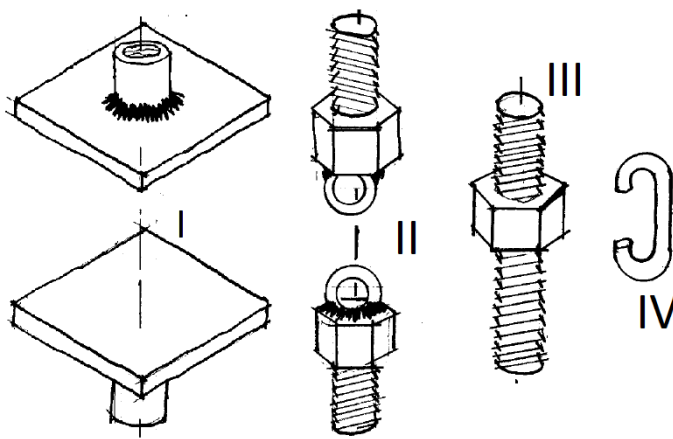
A execução do ensaio se deu inicialmente por meio de duas pastilhas metálicas auxiliares (I), que foram colados na face superior e inferior do corpo das amostras, feitas exclusivamente para isto, com dimensões de (7,6 x 7,6) cm de acordo com o comprimento de corte das amostras e com encaixe específico para a prensa Emic®.

Deste modo, as amostras foram submetidas à tração uniaxial, à velocidade de 0,8 mm/min e com pausa do carregamento no momento de qualquer ruptura ou falha (chapa/cola - camada/camada - camada/pastilha).

Foram confeccionadas também pinos para a parte inferior e superior do esquema (II e III), de modo a obter o encaixe perfeito entre a pastilha e a prensa e um arco metálico fixado nos pinos para acoplar a parte superior da máquina à pastilha por meio de um arco "C"(IV).

O desenho das peças está representado na Figura 76, feito com o auxílio do professor Dr. Francisco Cláudio Morato Leite do Departamento de Construção Civil da UEL, que gentilmente dimensionou as peças de modo a serem compatíveis com a prensa.

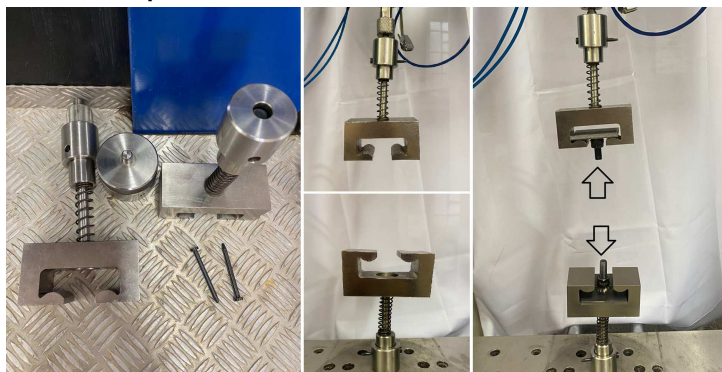
Figura 76 – Acessórios para o ensaio de aderência entre camadas



Fonte: Autoria própria (2023).

Estes acessórios foram adaptados ao primeiro esquema de ensaio, que consistiu em dois engates para a parte superior e inferior. Para a pastilha inferior foi colocado um pino macho acoplado a uma rosca fêmea e acrescentado um pino intermediário para encaixe na prensa. Na pastilha superior foi acrescentado o pino com arco vazado no topo e um arco "C" para unir a parte de cima do conjunto (que correspondeu ao mesmo pino com arco "C" vazado) e acoplado a parte superior da prensa com peça já existente no equipamento. Deste modo foi possível a montagem do esquema de ensaio, representado na Figura 77.

Figura 77 – Acessórios para o ensaio de aderência entre camadas montados na prensa



Fonte: Autoria própria (2023).

Foram confeccionadas pastilhas (I) para cada uma das faces das amostras. Para a colagem das amostras nas pastilhas metálicas foi necessário que todas elas fossem retificadas para regularização das faces, feito pelo processo de retificação (espessura aproximada de 0,5 cm em cada face), Figura 78, ficando com altura uniforme entre as amostras e os traços, de, em média, 8 cm e faces paralelas. Na Figura 79, observa-se os corpos de prova armazenados para o ensaio.

Figura 78 – Amostra retificada

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 79 – Corpos de prova aguardando o ensaio de aderência entre camadas

Fonte: Autoria própria (2023).

Após a realização dos primeiros ensaios, observou-se algumas falhas causadas pelos acessórios e pela própria geometria da amostra, deste modo foram feitas adaptações como aprimoramento do ensaio obtendo uma metodologia que possibilitou o rompimento entre as camadas, como proposto. As adaptações que originaram o esquema de ensaio utilizado estão no Apêndice.

Com a finalidade de minimizar as alterações que cada acessório poderia causar no conjunto do ensaio, o mecanismo final para o teste de aderência entre as camadas, foi fixado de acordo com o esquema da Figura 80 em que foram aproveitadas as garras que já faziam parte dos acessórios da prensa Emic®, este novo dispositivo, faz parte do ensaio de tração perpendicular às fibras em corpos de prova de madeira segundo a ABNT NBR 7190 e ASTM D143.

Este esquema conta com molas na parte superior e inferior, flexibilizando o sistema, o que evita a rigidez observada nos testes iniciais.

Figura 80 – Acessórios e novo esquema de ensaio

Fonte: Autoria própria (2023).

Para a concepção do novo esquema de ensaio, duas pastilhas foram cortadas cerca de 1 cm de cada lado, possuindo novo comprimento de 5,6 centímetros para encaixar nas garras posicionadas na parte inferior e superior da prensa e os pinos passaram a unir diretamente a pastilha colada no corpo de prova à pastilha apoiada na garra, fazendo com que a força de tração fosse distribuída diretamente para o ponto central do esquema (pastilha + corpo de prova + pastilha), alinhando o ensaio de maneira mais uniforme.

A Figura 81 mostra o corpo de prova pronto para o ensaio de aderência e como é possível observar, ocorreu um melhor alinhamento entre a amostra e o equipamento.

Figura 81 – Amostra pronta para o ensaio de aderência entre camadas

Fonte: Autoria própria (2023).

Porém, mesmo com o novo modelo de ensaio, o rompimento se deu de forma irregular e foi necessário estabelecer uma metodologia de corte das amostras, de modo a diminuir o seu tamanho, para que a falha ocorresse entre as camadas, conforme os ensaios de Noo e Wou (1989), onde verificaram que reduzir as amostras resulta em ganho de resistência no ensaio de tração direta.

Além da redução de tamanho, as amostras contaram com a abertura de chanfros, assim como metodologia de Sanjayan *et al.* (2018). Esta abertura deve induzir a ruptura entre as camadas, como proposto, mitigando o efeito de concentração de tensão que possa ter se formado entre aço e material cimentício.

A metodologia de corte está descrita no Quadro 6.

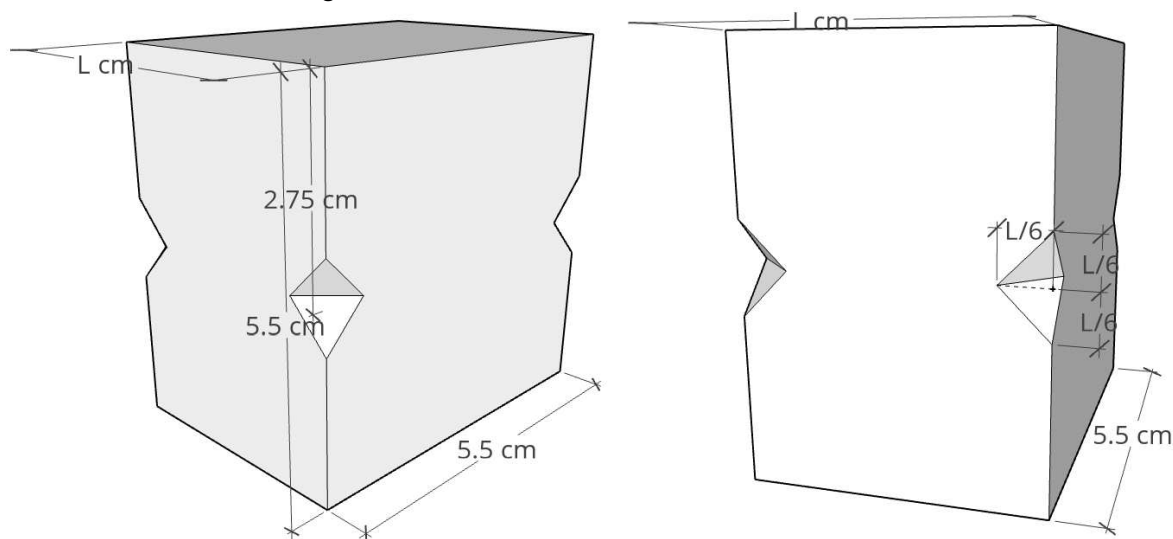
Quadro 6 - Metodologia de corte das amostras

ETAPA	PROCEDIMENTO
1	Cortar as amostras impressas com 5,5 cm de comprimento e altura com serra circular Makita;
2	Delimitar a largura das amostras de forma a se obter arestas retas, eliminando a divisão visível causada pela impressão;
3	Traçar triângulos na linha média da amostra com lado de $L/6$ em relação a largura de cada uma delas;
4	Cortar com Makita no traço dos triângulos de forma a se obter chanfros nas amostras.

Fonte: Autoria própria (2023).

O croqui com as medidas de corte das amostras está ilustrado na Figura 82.

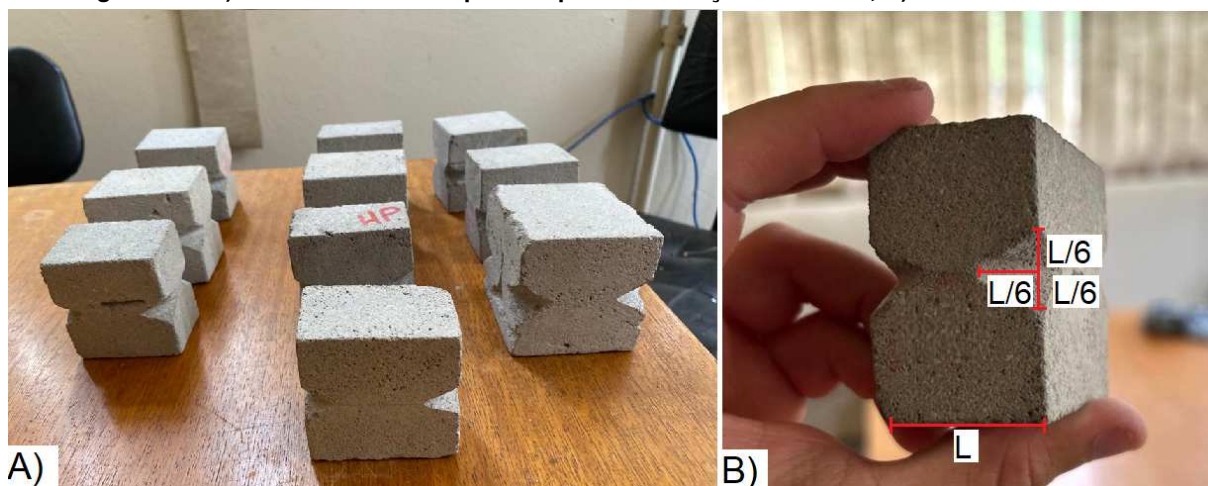
Figura 82 – Corte das amostras e abertura do chanfro



Fonte: Autoria própria (2023).

As amostras cortadas já com o chanfro e as dimensões utilizadas estão na Figura 83.

Figura 83 – A) Amostras cortadas prontas para a realização do ensaio; B) Abertura do chanfro.



Fonte: Autoria própria (2023).

Após o corte, as pastilhas foram posicionadas para a etapa de colagem das amostras para ser inseridas na prensa, conforme a Figura 84, a metodologia de ensaio está descrita no Quadro 7.

Figura 84 – Amostras prontas para a colagem nas pastilhas



Fonte: Autoria própria (2023).

Quadro 7 - Procedimentos para o ensaio de tração direta para aderência entre camadas

ETAPA	PROCEDIMENTO
1	Misturar os componentes da cola separadamente e adicionar uma parte (B) na outra (A);
2	Aplicar uma camada uniforme e suficiente na superfície da amostra e posicionar a pastilha sobre ela fazendo uma leve pressão com os dedos e garantindo que o centro de massa da pastilha coincida com o centro de massa da amostra;
3	Virar a amostra e aguardar 3 horas com a pastilha virada para cima e com um peso de 1 Kg sobre ela para que a cola endureça o suficiente para não escorrer ao mudar a posição (Figura 85) ;
4	Realizar o mesmo procedimento para a outra face e aguardar o mesmo tempo para mudar o conjunto de posição e assim posicioná-los de forma a apoiar somente a amostra, livrando as bordas da pastilha (Figura 86 - B).;
5	Aguardar os 7 dias de cura da cola;
6	Posicionar o conjunto, rosqueando a pastilha inferior no esquema de ensaio já preparado e encaixar a parte superior da mesma forma ajustando a distância na prensa e preparar o script de ensaio no software Tesc Emic;
7	Equilibrar a carga da prensa com o marcador digital do computador, reiniciar a distância inicial e iniciar o ensaio;
8	Finalizar o ensaio quando ocorrer ruptura na amostra na interface entre as camadas ou em qualquer outro ponto da amostra;
9	Para a retirada do material endurecido aderido às pastilhas metálicas, deve-se remover as amostras com o auxílio de uma marreta e posteriormente aplicar golpes na pastilha e lixá-la mecanicamente.

Fonte: Aatoria própria (2023).

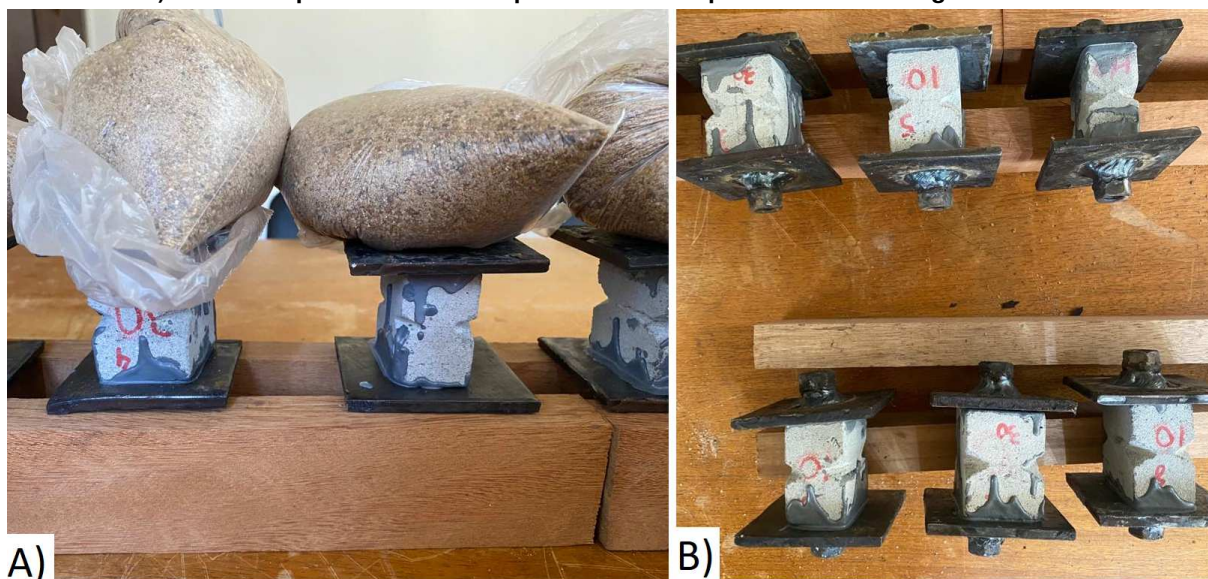
Figura 85 – Amostra após colagem e peso de 1Kg sobre elas



Fonte: Aatoria própria (2023).

O peso de 1 Kg foi obtido com um saco plástico, balança e areia existente no laboratório de materiais da UEL.

Figura 86 – A) Amostras coladas apoiadas sobre a segunda pastilha após 3 horas de início da colagem; B) Amostras apoiadas sobre as ripas de madeira após 6 horas de colagem.



Fonte: Autorial própria (2023).

O cálculo da resistência de aderência entre as camadas, deu-se mediante medição da carga máxima aplicada na amostra, até a ruptura, pela área da seção que recebeu a carga, de acordo com a Equação 4.

$$R_a = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Onde:

R_a : Resistência de aderência;

F : Carga vertical aplicada no sentido de tração, em N;

A : Área da seção transversal da amostra.

O ensaio de resistência de aderência entre camadas ocorreu aos 165 dias da impressão do material, após os testes e a definição da metodologia de ensaio.

No Quadro 8, é possível observar um resumo com as amostras destinadas ao ensaio de aderência e na Figura 87, está a amostra pronta para o ensaio.

Quadro 8 - Resumo para o ensaio de aderência entre as camadas

ENSAIO DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS		
N° de amostras por mistura	Idade (dias)	N° total de amostras
3	165	9

Fonte: Autorial própria (2023).

Portanto, para a idade de 126 dias, 9 amostras foram ensaiadas, sendo 3 de cada mistura.

Figura 87 – Amostra pronta para o ensaio de aderência entre camadas



Fonte: Autoria própria (2023).

Após os 7 dias da secagem da cola, as amostras foram posicionadas na prensa, conforme a Figura 87 e submetidas à tração direta, tornando possível a obtenção da resistência de aderência entre as camadas.

3.3.7 Microtomografia computadorizada de raio - X (μ -CT)

Com a finalidade de verificar a porosidade e distribuição de poros na interface das amostras de acordo com sua composição, foram feitas análises por Microtomografia Computadorizada de Raios-X (μ -CT), sendo realizadas em um Microtomógrafo SkyScan-Bruker, modelo 1173 conforme Figura 88, que se encontra no Laboratório de Análises por Técnicas de raios-X (LARX) da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

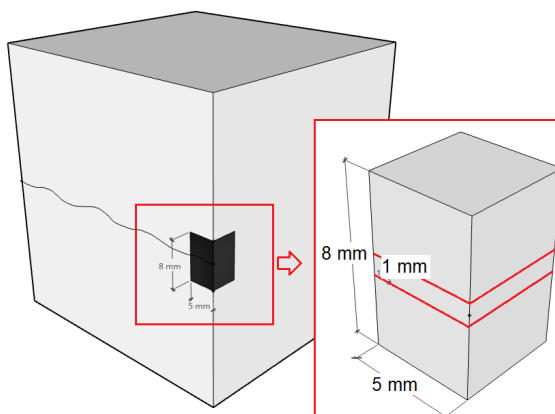
Figura 88 – Microtomógrafo SkyScan-Bruker 1173



Fonte: LARX (2023).

As imagens se deram após a coleta de fragmentos prismáticos das amostras cortadas para o ensaio de aderência entre camadas, aos 165 dias, sendo obtida a região da interface, conforme a Figura 89, de dimensões (5 x 5 x 8) mm.

Figura 89 – Local de corte da amostra prismática submetida ao ensaio de μ -CT



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 89 é possível observar o local do corte das amostras menores para o ensaio de μ -CT, a região destacada é a faixa onde está a sobreposição, com espessura de cerca de 1 mm, com os resultados foi possível observar a diferença de percentual entre a porosidade total (faixa entre 0 a 8 mm) e a porosidade nesta região (faixa entre 4 a 5 mm), a faixa da interface sofreu leve variação em cada amostra, não se posicionando exatamente no meio. Para extração destes elementos foi utilizada a serra circular Makita.

As configurações do equipamento foram:

- 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 scaneamento: 40 min.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com as campanhas experimentais, que corresponderam a determinação da relação água/cimentício aplicada aos ensaios de tempos de pega da pasta, escolha e verificação das argamassas extrudáveis, análise da umidade superficial por meio da termografia, caracterização da argamassa por meio dos índices de consistência, densidade da massa e absorção de água. Também foram apresentados os resultados dos ensaios de propriedades mecânicas e aderência entre camadas e a investigação microscópica por meio da microtomografia computadorizada de raio-X.

4.1 Campanha experimental 1

4.1.1 Consistência Normal

Para esta fase da pesquisa foram realizados ensaios testes por meio do aparelho de Vicat para a determinação da consistência normal das pastas: p_ref; p_HPMC; p_5MC; p_10MC e p_30MC, porque a partir destes valores é possível determinar a quantidade de água utilizada nas argamassas que serão impressas.

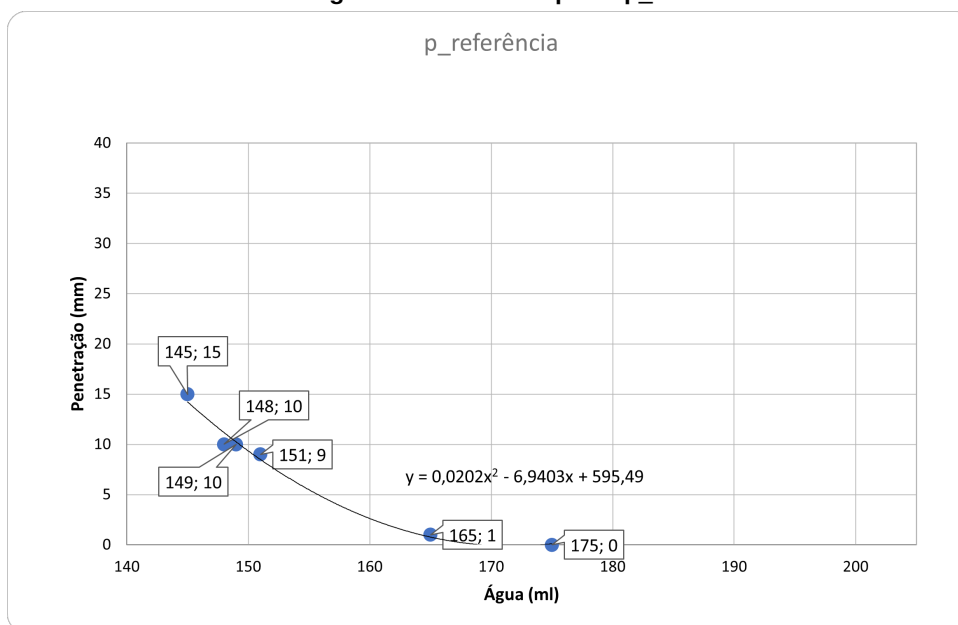
A primeira pasta foi composta por cimento (500 g) e água, os volumes de água utilizados em cada teste estão na Tabela 19, o volume de água que atingiu a consistência ideal de acordo com as recomendações do ensaio foram obtidos graficamente por meio da interpolação dos valores e determinação da equação da curva, os pontos estão no gráfico da Figura 95.

Tabela 19 – Valores de água para a pasta p_ref

AMOSTRA	CIMENTO(g)	HPMC (g)	METACAILIM (g)	ÁGUA (ml)	PENETRAÇÃO (mm)
p_ref_1	500	0	0	145	15
p_ref_2	500	0	0	148	10
p_ref_3	500	0	0	149	10
p_ref_4	500	0	0	151	9
p_ref_5	500	0	0	165	1
p_ref_6	500	0	0	175	0

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 90 – Curva a/c pasta p_ref



Fonte: Autoria própria (2023).

Deste modo, por meio da equação da curva apresentada no gráfico da Figura 95, gerada por estes pontos, foi obtido o valor de 153 m. Este valor corresponde a uma penetração de 6,48 mm, dentro da estabelecida por norma e corresponde a um valor de água/cimentício de 0,306.

Na próxima pasta de ensaio foi adicionado 0,3% de HPMC, sendo possível obter os valores de água descritos na Tabela 20.

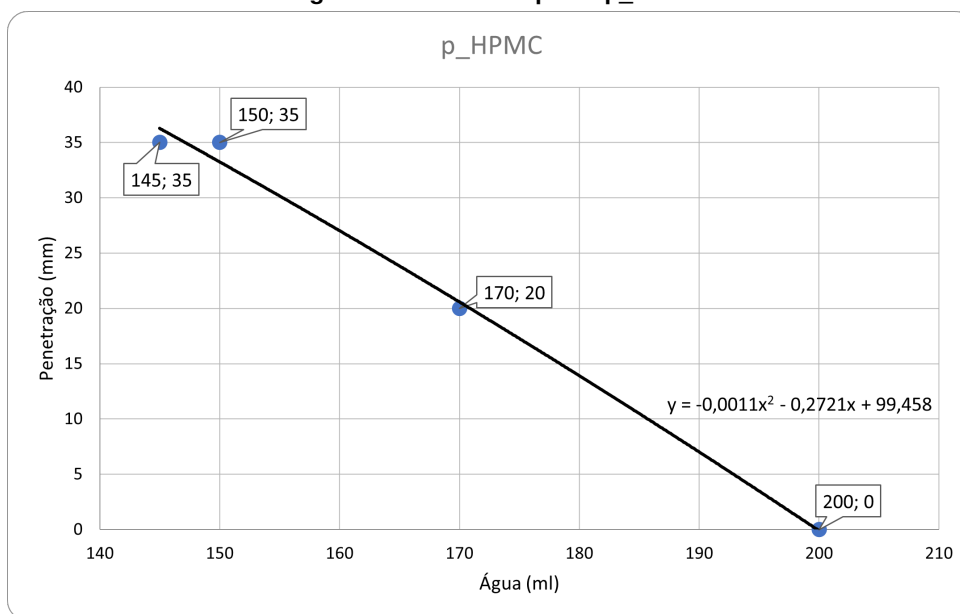
Tabela 20 – Valores de água para pasta p_HPMC

AMOSTRA	CIMENTO(g)	HPMC (g)	METACAILIM (g)	ÁGUA (ml)	PENETRAÇÃO (mm)
p_ref_HPMC1	500	1,5	0	145	35
p_ref_HPMC2	500	1,5	0	150	34
p_ref_HPMC3	500	1,5	0	170	20
p_ref_HPMC4	500	1,5	0	200	0

Fonte: Autoria própria (2023).

A partir desses resultados, foi possível plotar o gráfico da Figura 92 com a curva para determinar o volume de água para atingir a profundidade de 6 mm, sendo necessário 191 ml de água para a pasta com a adição do HPMC, representando relação água/cimentício de 0,382.

Figura 91 – Curva a/c pasta p_HPMC



Fonte: Autoria própria (2023).

A próxima pasta a ser submetida ao ensaio contou com 5% de substituição de (MC) em relação a massa de cimento, contendo portanto, 475 gramas de cimento, 25 gramas de metacaulim e 1,5 gramas de (HPMC), na Tabela 21 observa-se os valores obtidos neste caso.

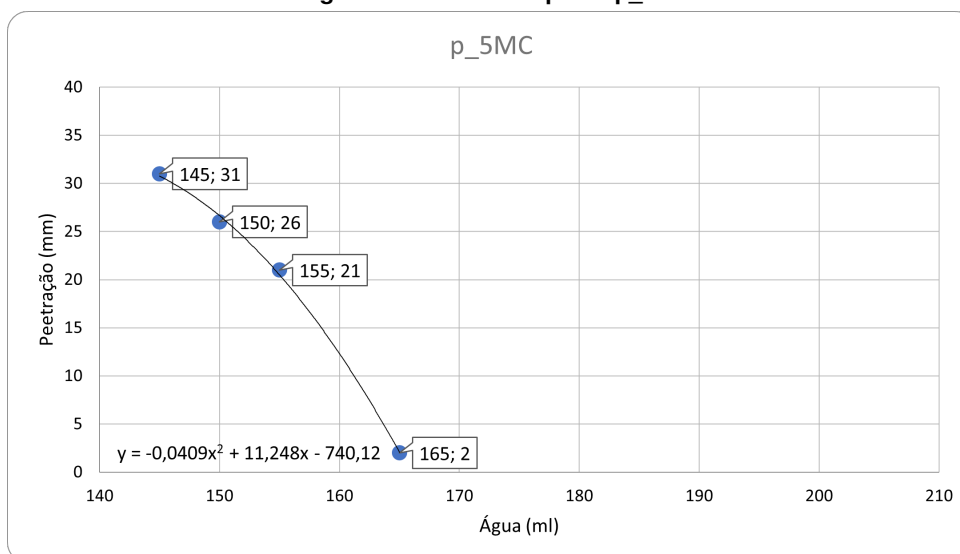
Da mesma forma, foi plotado o gráfico com a combinação da quantidade de água e respectivas penetrações obtidas para a determinação da relação água/cimentício quando a penetração atingir ao valor estipulado por norma.

Tabela 21 – Valores de água para pasta p_5MC

AMOSTRA	CIMENTO (g)	HPMC (g)	METACAU LIM (g)	ÁGUA (ml)	PENETRAÇÃO (mm)
p_ref_HPMC1	475	1,5	25	170	31
p_ref_HPMC2	475	1,5	25	175	15
p_ref_HPMC3	475	1,5	25	180	2
p_ref_HPMC4	475	1,5	25	185	5

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 92 – Curva a/c pasta p_5MC



Fonte: Autoria própria (2023).

Foi obtida a quantidade de água igual a 178 ml para 6 mm, representando uma relação água/cim de 0,356.

Os próximos dados são referentes as pastas contendo 10% de (MC) em substituição ao cimento e com a adição de (HPMC), na Tabela 22 é possível visualizar os valores de água obtidos com o ensaio.

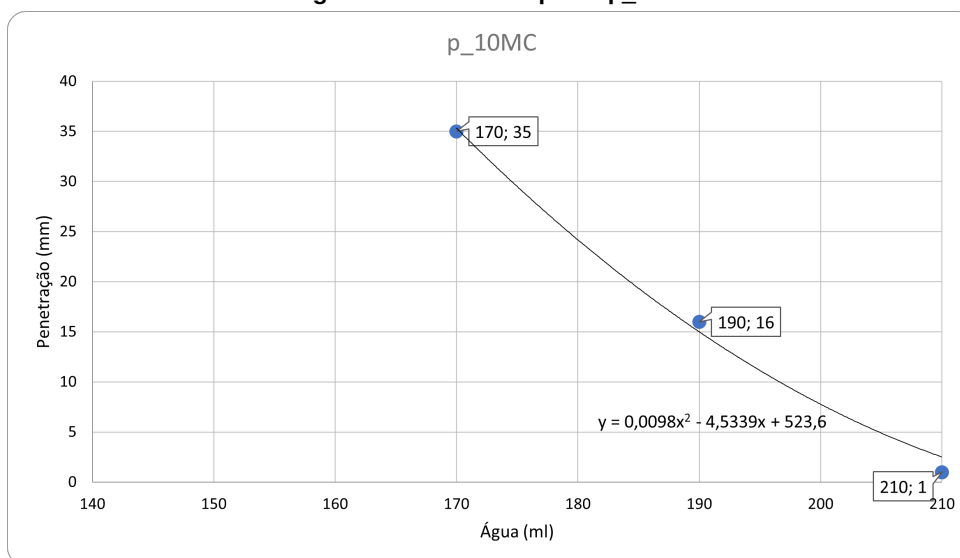
Tabela 22 – Valores de água para a pasta p_10MC

AMOSTRA	CIMENTO (g)	HPMC (g)	METACAU LIM (g)	ÁGUA (ml)	PENETRAÇÃO (mm)
p_10MC1	450	1,5	50	170	35
p_10MC2	450	1,5	50	190	16
p_10MC3	450	1,5	50	210	1
p_10MC4	450	1,5	50	220	0

Fonte: Autoria própria (2023).

Ainda, para a pasta p_10MC, foi necessário a plotagem do gráfico para a equação da curva correspondente ao desejado pelo ensaio, de acordo com a Figura 93.

Figura 93 – Curva a/c pasta p_10MC



Fonte: Autoria própria (2023).

Portanto para a pasta p_10MC, foi necessária 204 ml de água para o valor de 6,8 mm da sonda do Vicat, atingindo um valor de água/cimentício de 0,408.

Para a pasta p_30MC não foi preciso realizar a plotagem do gráfico porque o valor de penetração estipulado pela norma foi atingido na terceira tentativa, indicando que a quantidade de água para a consistência normal já era a executada no ensaio.

Os valores obtidos nas três tentativas do ensaio para a pasta p_30MC estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Valores de água para a pasta p_30MC

AMOSTRA	CIMENTO (g)	HPMC (g)	METACAULIM (g)	ÁGUA (ml)	PENETRAÇÃO (mm)
p_30MC1	350	1,5	150	230	10
p_30MC2	350	1,5	150	232	5,5
p_30MC3	350	1,5	150	235	0

Fonte: Autoria própria (2023).

Portanto, para a pasta p_30MC foi necessária 232 ml de água para que a sonda resultasse em 5,5 mm, necessitando de um valor água/cimentício de 0,463.

Os resultados obtidos para os valores de consistência normal demonstram que quanto maior o teor de metacaulim, em decorrência de sua elevada finura, em relação a substituição do cimento, mais água de amassamento é requerida. Foi observado também que com a adição de (HPMC), aumenta-se a quantidade de água necessária para atingir a consistência normal e relação água/cime também é aumentada.

A adição de (HPMC), assim como observado pelos autores Rahul *et al.* (2019), Geng *et al.* (2020), promoveu um aumento da relação água/cimentício, que ficou entre 0,35 e 0,46 já que foi observado que esta adição aumentou a retenção de água ao mesmo tempo que formou géis que obstruem os poros dentro do esqueleto granular, proporcionando uma maior resistência do

material ao escoamento. Rahul *et al.* (2019) obteve valores semelhantes da relação a/cim com a adição de 0,035% de (HPMC) e sua mistura cimentícia passou no teste de extrudabilidade.

Deste modo, também é necessário conhecer os tempos de pega do material a ser impresso, uma vez que se o início ocorrer rapidamente, pode haver um prejuízo para a aderência entre as camadas porque é necessário que a camada inferior não tenha entrado em pega ao ocorrer a deposição da camada superior. Os resultados obtidos com o ensaio de início e fim de pega são descritos a seguir, 4.1.2.

4.1.2 Início e fim de pega

Os tempos de início e fim de pega, foram obtidos com base na EN UNI 196-3 (2016). Foram utilizadas as pastas conforme a relação de a/cim vindo do ensaio de consistência normal, foram preparadas 5 amostras com as composições descritas na Tabela 24.

Tabela 24 – Composição das pastas para realização do ensaio de início e fim de pega

AMOSTRA	CIMENTO (g)	HPMC (g)	METACALIM (g)	ÁGUA (ml)
p_ref	500	0	0	153
p_HPMC	500	1,5	0	191
p_5MC	475	1,5	25	204
p_10MC	450	1,5	50	204
p_30MC	350	1,5	150	231,5

Fonte: Autoria própria (2023).

Foram utilizadas as mesmas proporções e procedimentos, com temperatura e umidade do ar no ambiente constantes.

O aparelho utilizado neste ensaio foi o Vicatronic que, de acordo com a normativa, realiza 86 penetrações e dentro deste intervalo é esperado que se dê o início e fim da pega da pasta. Nesta pesquisa foi considerado o período de 5 minutos entre as penetrações, com intervalo total de aproximadamente 7 horas de ensaio (430 minutos).

Os resultados com os tempos de início e fim de pega de cada uma das pastas está apresentada na Tabela 26.

Tabela 25 – Relação entre os tempos de pega das pastas

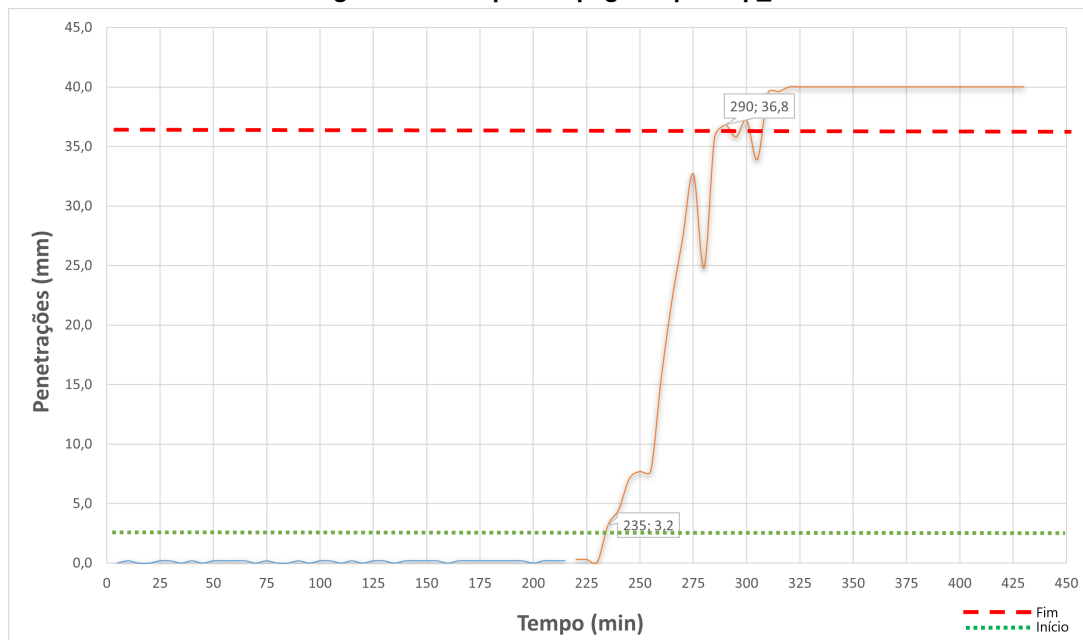
PASTAS	INÍCIO DA PEGA (min)	FIM DA PEGA (min)
p_ref	235	290
p_HPMC	325	> 430
p_5MC	300	410
p_10MC	305	430
p_30MC	265	> 430

Fonte: Autoria própria (2023).

A adição de (HPMC), em relação a p_ref, retardou o início de pega em 90 minutos, não sendo possível determinar o fim da pega, que excedeu às 7 horas de ensaio, este fato se relaciona a sua propriedade retentora de água. Para a melhor visualização dos tempos de

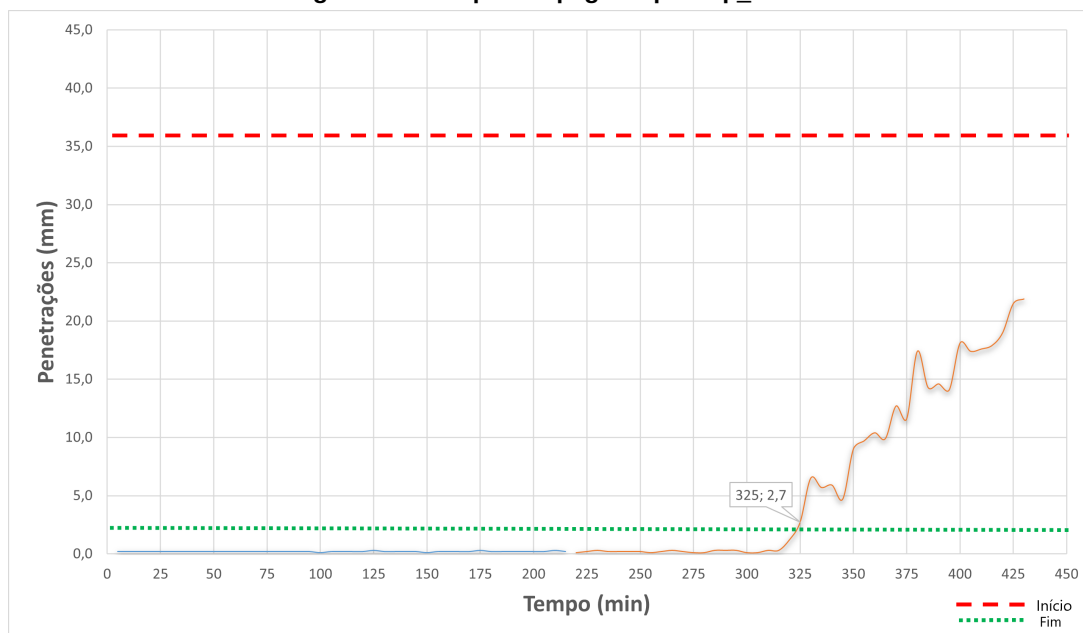
pega das pastas, as Figuras 94, 95, 96, 97 e 98, ilustram o resultado destas durante o intervalo considerado.

Figura 94 – Tempos de pega da pasta p_ref



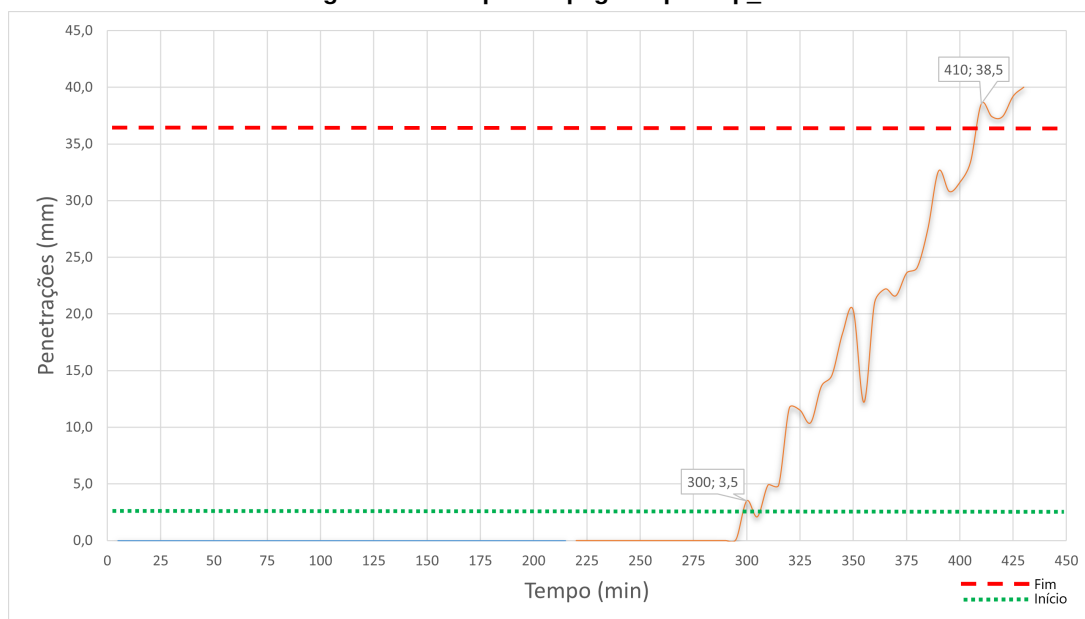
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 95 – Tempos de pega da pasta p_HPMC



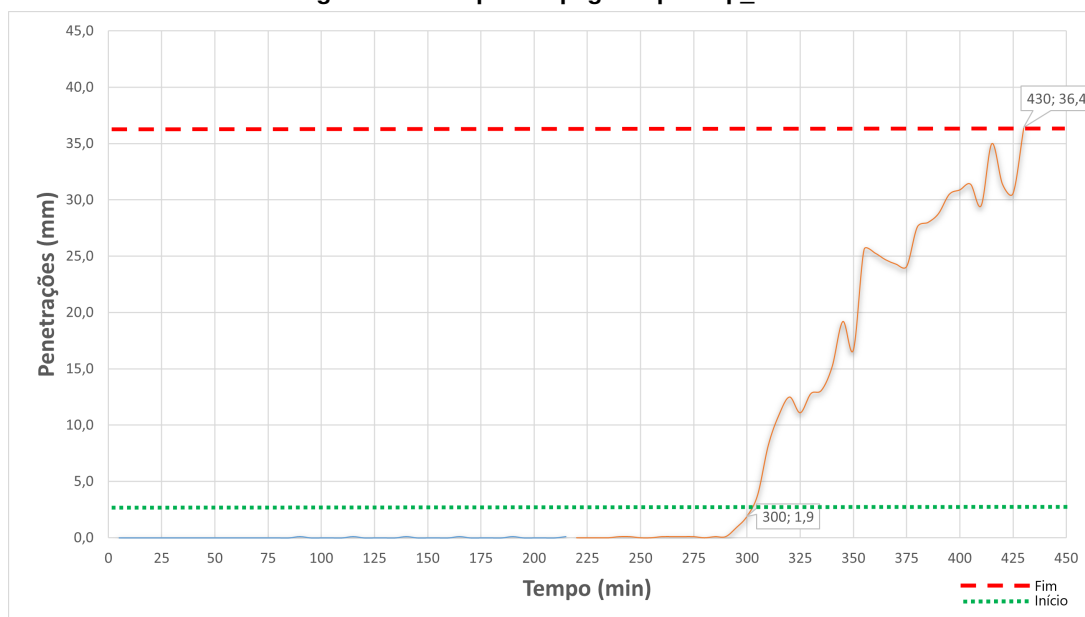
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 96 – Tempos de pega da pasta p_5MC



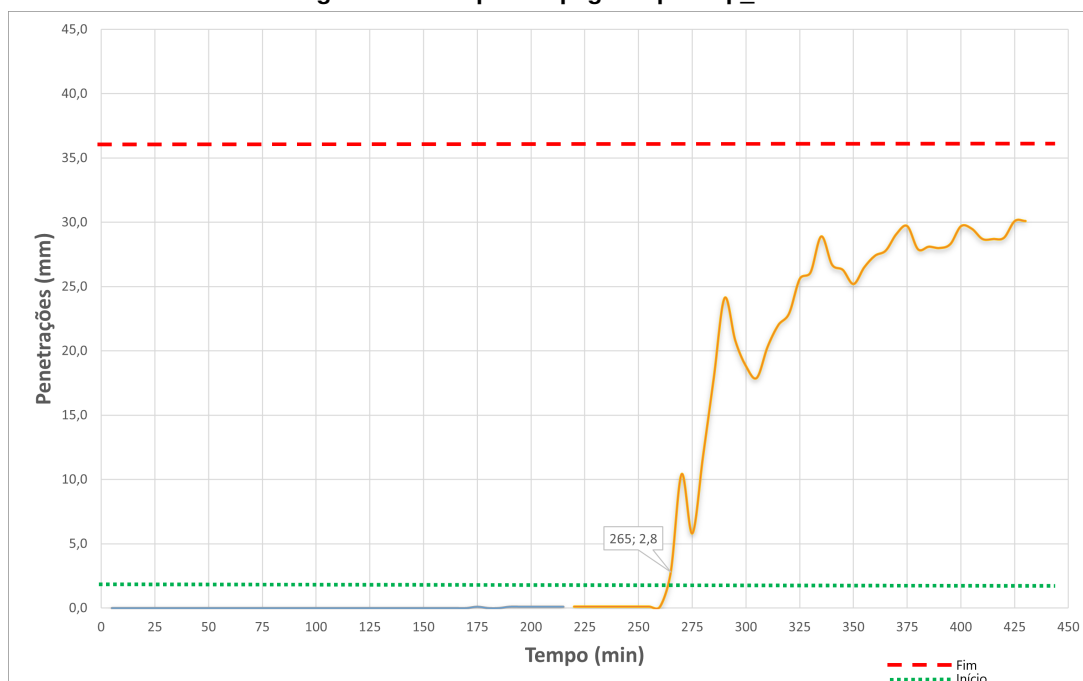
Fonte: A autoria própria (2023).

Figura 97 – Tempos de pega da pasta p_10MC



Fonte: A autoria própria (2023).

Figura 98 – Tempos de pega da pasta p_30MC



Fonte: Autoria própria (2023).

Com os resultados obtidos entre as pastas de metacaulim, foi possível concluir que a substituição parcial de CP II F - 40 juntamente com a adição de (HPMC) também retardou o início da pega, com a p_ref registrando tempo de início de 235 minutos comparado aos 305 minutos de início de pega com 10% de substituição + (HPMC).

Porém, com o aumento da substituição do (MC), a 30%, apesar da adição do (HPMC), houve um adiantamento do início da pega em 60 minutos em relação a pasta referência de (HPMC), indicando que o (MC) pode acelerar a pega, principalmente devido a finura deste material que aumenta a velocidade das reações de hidratação do cimento. Este adiantamento foi mais significativo entre as pastas p_10MC e p_30MC, com diferença de 40 minutos entre elas, do que entre as pastas p_5MC e p_10MC, com diferença de 5 minutos.

O aumento do teor de metacaulim nas pastas fez com que o tempo de início de pega seja antecipado, porém também acaba diminuindo essa janela, o que pode alterar o tempo de trabalhabilidade da pasta, deste modo, a adição de (HPMC) é favorável, já que promove uma retenção de água no material, auxiliando a utilização desta água para cura interna e aumenta o tempo de início de pega e tempo de trabalho, sendo importante para manter uma camada lubrificante na superfície no momento da impressão 3D, favorecendo também a aderência entre as camadas.

Portanto, as misturas escolhidas para a confecção de argamassas, foram as que apresentaram tempo suficiente de início de pega para a impressão, sendo a com adição apenas de (HPMC), (p_ref_HPMC), com início de pega de 325 minutos, a com 10% de substituição de (MC), com intervalo entre início e fim de pega de 125 minutos e a com 30% de substituição de

(MC), que também teve final de pega com um tempo superior a 430 minutos e início com 40 minutos antes do que a p_10MC.

Para comprovar a influência positiva do (HPMC) no que diz respeito ao aumento do tempo de trabalhabilidade do material e a influência do (MC), foram feitos ensaios de consistência normal e início e fim de pega para as pastas sem (HPMC) e com substituição de 10 e 30% de (MC).

Para a pasta p_10 (450 gramas de cimento e 50 gramas de metacaulim), foi obtida a quantidade de água igual a 171,5 ml para 6,15 mm, portanto uma relação água/cimentício de 0,34 e para a pasta p_30 (350 gramas de cimento e 150 gramas de metacaulim), foi obtida a quantidade de água 180 ml para uma penetração de 5 mm e relação água/cimentício de 0,36.

Com a obtenção destes resultados, foi possível executar os ensaios de início e fim de pega para estas duas pastas que teve como resultado os valores da Tabela 26.

Tabela 26 – Relação entre os tempos de pega das pastas p_10 e p_30

PASTAS	INÍCIO DA PEGA (min)	FIM DA PEGA (min)
p_ref	235	290
p_10	220	265
p_30	200	220

Fonte: Autoria própria (2023).

Portanto, com o estudo das pastas somente com a substituição de (MC), foi possível comprovar que houve um aceleração do início pega em relação a pasta referência (p_ref), sendo de 15 minutos para uma substituição de 10% e de 35 minutos para uma substituição de 30% e o intervalo entre tempos de pega também foi reduzido, sendo de 55 minutos para a (p_ref) e de 45 e 20 minutos para as pastas (p_10) e (p_30), respectivamente.

Os valores indicam que com o aumento da porcentagem de metacaulim houve também um aumento da velocidade das reações de hidratação do cimento, também observado por Amorim (2019). Porém, essa diminuição de tempo de trabalhabilidade não é favorável para a impressão 3D, uma vez que as camadas são depositadas em tempos diferentes sendo necessário uma janela de tempo suficiente para a aderência entre elas.

Portanto, a adição de (HPMC) se tornou importante para garantir este aspecto, então as três argamassas selecionadas contam com esta adição, optou-se também por seguir com a amostra com 10% de substituição de (MC) por apresentar início e fim de pega superiores a amostra com 5%. Por fim a terceira mistura selecionada foi a com 30% de substituição de (MC) por apresentar início e fim de pega com maior diferença em relação as outras duas amostras e por corresponder ao maior teor de substituição de cimento, favorecendo a sustentabilidade.

Porém, apenas os ensaios de início e fim de pega não são suficientes para determinar o bom desempenho quanto a extrudabilidade, sendo necessário a verificação da extrusão por meio da impressão destes materiais.

Aspectos como a qualidade de impressão e umidade superficial (fundamental para uma boa aderência entre as camadas), também são importantes e foram analisados nesta pesquisa,

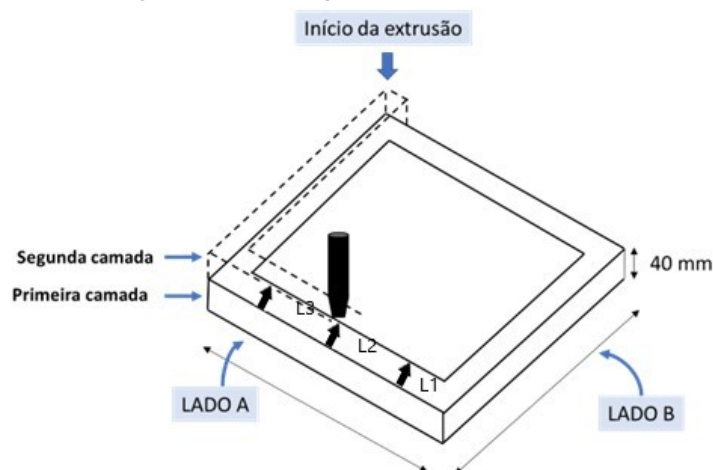
então os ensaios de consistência normal e tempos de pega serviram como indicação para a escolha da confecção das argamassas com, 0, 10 e 30% de (MC) em substituição a massa de cimento e adição de 0,3% de (HPMC).

4.1.3 Extrudabilidade e qualidade de impressão - Argamassa

As misturas foram consideradas extrudáveis com verificação qualitativa do aspecto após saída do bocal de impressão com bordas visíveis e conformidade ao longo do comprimento assim como propôs Kazemian *et al.* (2017) e por meio da espessura da primeira camada em 3 pontos ao longo do lado A, onde foi calculado o coeficiente de variação entre as medidas obtidas.

As espessuras consideradas estão apontadas na Figura 99.

Figura 99 – Largura da camada para cálculo do coeficiente de variação



Fonte: Adaptado de Silva (2023).

O intervalo de impressão entre uma camada e outra (considerando todo o perímetro de 160 cm) foi de aproximadamente 4 minutos, destaca-se que não houve pausa na impressora, este tempo corresponde ao contorno de todo o perímetro do material construído até o retorno para a posição inicial e construção da segunda camada.

Os resultados obtidos nesta etapa para o material HPMC estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Espessura da amostra HPMC - CAMADA 1

MEDIDAS LARGURA (mm)	
L1	59.95
L2	58.8
L3	61.3
Média	60.02

Fonte: Autoria própria (2023).

Para a amostra de HPMC, foi obtido o coeficiente de variação de 1,7% entre os três pontos medidos na largura para a camada 1, por possuir um pequeno coeficiente de variação entre a largura das camadas, continuidade de extrusão e bordas visíveis, a amostra foi considerada extrudável.

As mesmas medições foram feitas para a camada 10MC e os resultados estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Espessura da amostra 10MC - CAMADA 1

MEDIDAS LARGURA (mm)	
L1	55.6
L2	56.6
L3	58.8
Média	56.96

Fonte: Autoria própria (2023).

O coeficiente de variação obtido entre as medidas da largura da camada da amostra 10MC em três pontos foi de 2,34% para a primeira, este valor foi maior do que para a amostra HPMC, porém, ainda é um pequeno coeficiente de variação.

Para o material 30MC, foram feitos os mesmos procedimentos e os resultados estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Espessura da amostra 30MC - CAMADA 1

MEDIDAS LARGURA (mm)	
L1	59.3
L2	58.45
L3	60.8
Média	59.52

Fonte: Autoria própria (2023).

O coeficiente de variação entre as dimensões da camada 1 foi de 1,63%, portanto, houve uma homogeneidade de resultados, indicando a conformidade de dimensão da camada. Então, com a aplicação dos critérios pré estabelecidos de qualidade de impressão, têm-se que as três amostras são promissoras e imprimíveis, com destaque para a amostra 30MC que também possui maior porcentagem de substituição de (MC) em relação a massa de cimento.

É importante verificar as dimensões do material porque grandes variações na largura podem provocar instabilidade no momento da sobreposição de camadas, fazendo com que o objeto entre em colapso.

4.2 Campanha experimental 2

4.2.1 Consistência

A determinação da consistência foi dada antes e após o material passar pelo bico do maquinário no primeiro processo de extrusão, mantendo as mesmas proporções e procedimen-

tos, estes ensaios foram feitos em dias consecutivos, garantindo as mesmas temperaturas e condições do ambiente.

Os resultados médios estão divididos por material, tamanho da amostra e pelas idades: antes e após a extrusão e apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Caracterização das argamassas - Ensaio de Consistência

ENSAIO DE CONSISTÊNCIA		
Amostra	Antes da extrusão (mm)	Após a extrusão (mm)
HPMC	177,00	176
10 MC	170,67	177
30 MC	167,00	179,67

Fonte: Autoria própria (2023).

Com os resultados obtidos foi possível observar que a consistência da argamassa apresentou aumento após a extrusão, nas duas amostras com presença de (MC), sendo mais pronunciada na amostra 30MC, com um acréscimo de consistência de 7,5% em relação a amostra antes da extrusão.

A consistência praticamente não se alterou na amostra HPMC, indicando que a incorporação de metacaulim teve influência neste aspecto. O aumento de consistência das argamassas após a extrusão indica que houve também influência na fluidez e trabalhabilidade do material após o bombeamento, sendo interessante para a impressão 3D, que deve manter a alta fluidez na extrusão.

4.2.2 Densidade de massa e ar incorporado

Os resultados obtidos com os ensaios de densidade de massa e ar incorporado para a caracterização da argamassa estão apresentados na Tabela 31. As argamassas em análise foram as três misturas da pesquisa (HPMC, 10MC e 30MC) submetidas a extrusão e a argamassa REF corresponde a mistura feita somente com cimento, água e areia seguindo as mesmas proporções.

Tabela 31 – Densidade da massa e ar incorporado

AMOSTRAS	DENSIDADE DA ARGAMASSA (kg/m ³)	DENSIDADE TEÓRICA SEM VAZIOS (kg/dm ³)	TEOR DE AR INCORPORADO (%)
REF	2,17	2,20	1,33
HPMC	1,78	2,14	16,76
10MC	1,77	2,12	16,33
30MC	1,76	2,01	15,41

Fonte: Autoria própria (2023).

A densidade da argamassa diminuiu com a adição de HPMC em relação a REF, de 2,17 kg/m³ para 1,78 kg/m³ e foi a menor para a amostra 30MC, sendo 1,76 kg/m³. A adição de HPMC causou o efeito de diminuição da densidade da argamassa e aumento do teor de ar

incorporado, que fez com que as argamassas HPMC, 10MC e 30MC se classifiquem no grupo b, de acordo com a NBR 13278 (2005), com teor de ar incorporado entre 15 e 17%.

Quanto maior o teor de ar incorporado, maior a trabalhabilidade da argamassa, necessário para o processo de impressão 3D porque sem essa característica não seria possível a sua extrusão, assim como verificaram Lima e Carneiro (2022) porém, quando muito alto, pode resultar na redução da resistência mecânica do material, deste modo, deve haver um equilíbrio entre aumento de trabalhabilidade e propriedades mecânicas.

4.2.3 Retenção de água

Os resultados de retenção de água das argamassas aplicadas a impressão 3D e da argamassa considerada referência, composta somente por cimento, água e areia, nas mesmas proporções que as outras, estão apresentados na tabela 32.

Tabela 32 – Retenção de água das argamassas

RETENÇÃO DE ÁGUA (%)	
REF	92,55
HPMC	99,37
10MC	99,44
30MC	99,47

Fonte: Autoria própria (2023).

Com os resultados apresentados conclui-se que todas as argamassas estudadas possuem alta retenção de água, com maior valor para a 30MC. Há uma retenção de água de 7,47% da argamassa REF para a com 0,3% de adição de HPMC.

É desejável que o material cimentício imprimível retenha água de amassamento para cura interna e lubrificação na superfície da camada e que a argamassa tenha boa trabalhabilidade e boa retenção de água, esta absorção inicial contribui para a resistência do material em estado endurecido.

4.2.4 Umidade superficial - Câmera termográfica

O critério de análise de resultados nesta etapa, foi a temperatura da superfície medida. As cores do diagrama termográfico representam códigos, mas no geral, quanto maior a temperatura, mais vermelha a cor deste ponto na fotografia e quanto mais fria a temperatura, mais azul a cor deste ponto na imagem.

As variação de cores seguiu o espectro da Figura 100.

Figura 100 – Espectro de cores da câmera termográfica

Fonte: Autoria própria (2023).

O padrão de cores não se alterou a cada imagem porque depende dos parâmetros térmicos existentes em cada cenário da imagem, porém a temperatura superficial de cada camada de acordo com as misturas, indicada nas imagens, apresentaram alterações entre si.

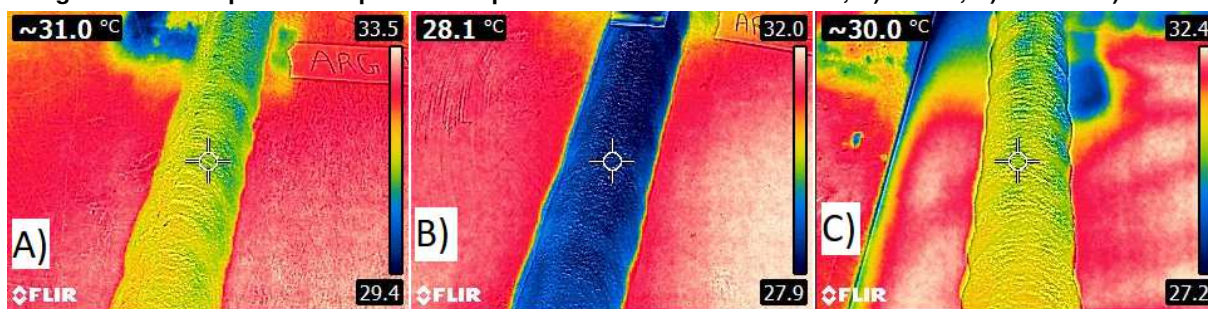
Para a primeira camada da argamassa HPMC, a temperatura da superfície foi de 31,0 °C, o espectro foi de azul escuro a vermelho claro, sendo amarelo no centro da camada. A primeira camada da argamassa 10MC, teve como temperatura superficial 28,1 °C, sendo menor do que a argamassa HPMC indicando maior umidade superficial. A temperatura superficial da primeira camada obtida na mistura 30MC foi de 30,0 °C.

Os resultados da primeira camada impressa de cada mistura estão na Figura 102, com a visualização real das camadas na Figura 101.

Figura 101 – Visualização das camadas para a imagem termográfica, A) HPMC; B) 10MC e C) 30MC.

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 102 – Temperatura superficial da primeira camada das amostras, A) HPMC; B) 10MC e C) 30MC



Fonte: A autoria própria (2023).

Após a impressão da segunda camada sobre a primeira, foi obtido um contraste de cores, indicando maior temperatura após a camada recém impressa, porém a temperatura superficial das camadas seguiu com 29,9 °C para HPMC, foi para 27,6 °C para 10MC e 30,1 °C para 30MC, indicando pequena variação de umidade superficial entre as camadas de cada mistura, apresentando maior variação para a amostra 10MC nas duas camadas.

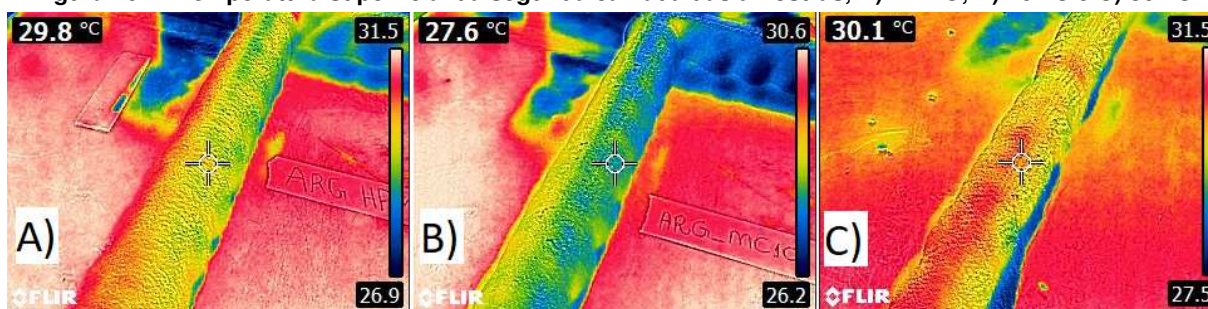
Os resultados da segunda camada impressa de cada mistura estão na Figura 104, com a visualização real das camadas na Figura 103.

Figura 103 – Visualização das camadas para a imagem termográfica, A) HPMC; B) 10MC e C) 30MC.



Fonte: A autoria própria (2023).

Figura 104 – Temperatura superficial da segunda camada das amostras, A) HPMC; B) 10MC e C) 30MC

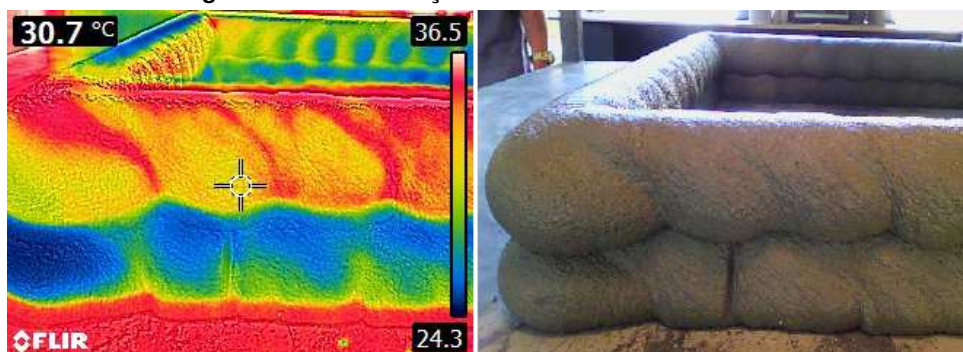


Fonte: A autoria própria (2023).

As imagens indicam que a temperatura superficial das camadas não sofreu modificações significativas ao comparar a primeira e a segunda camada impressa, ou seja, quando a imagem

foi obtida no instante da impressão. Mas as imagens feitas no sentido transversal, Figura 105, com a sobreposição de camadas, indica diferença que ocorre na temperatura superficial com o passar do tempo de impressão, devido ao possível transporte de água que ocorre do núcleo para a superfície da amostra com o tempo.

Figura 105 – Visualização transversal de duas camadas



Fonte: Autoria própria (2023).

Vale destacar que o tempo entre a impressão da primeira camada para a segunda foi de aproximadamente 4 minutos, correspondendo ao contorno do material construído sem que houvesse pausa no maquinário, e que após esse período já havia maior quantidade de água na superfície da primeira camada do que logo após a saída do material do bocal de impressão.

Para verificar este processo de transporte de água para a superfície das camadas, foi feita uma imagem a partir de um corte no meio delas, este corte foi feito após a impressão de mais camadas, Figura 107, que foi utilizada na pesquisa somente nesta etapa.

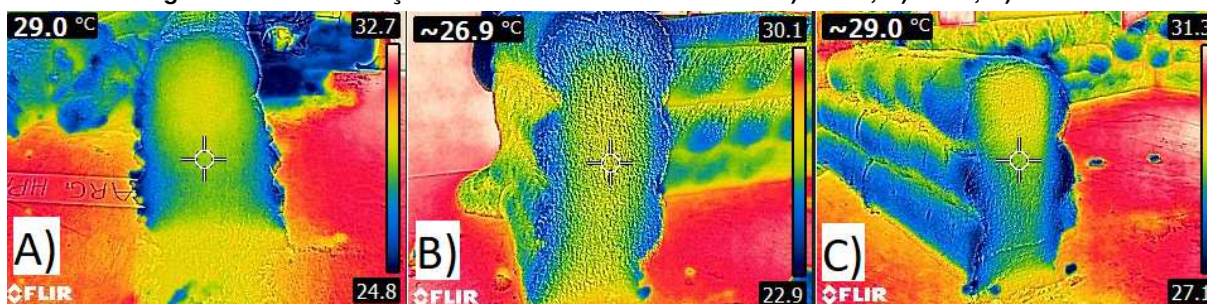
Com a Figura 107 é possível observar que a temperatura no núcleo do material também é menor para a amostra 10MC e que as bordas se encontram mais úmidas para todas as misturas.

Figura 106 – Visualização transversal de três camadas. A)HPMC; B)10MC; C)30MC.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 107 – Visualização transversal de três camadas. A)HPMC; B)10MC; C)30MC.



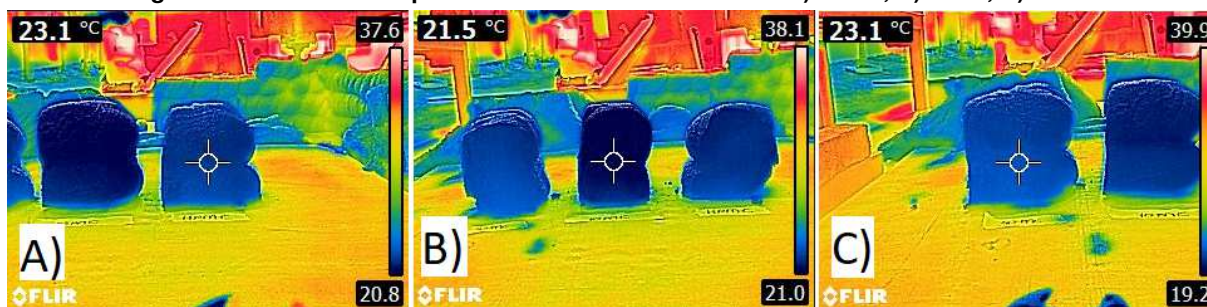
Fonte: Autoria própria (2023).

Com a Figura 107 é possível observar que a temperatura superficial do meio do objeto foi menor para a amostra 10MC e que as amostras HPMC e 30MC apresentaram quase que a mesma temperatura superficial.

Destaca-se também que as bordas dos três materiais ficaram azuladas, indicando maior umidade e menor temperatura, isto ocorre porque o HPMC retém água para cura interna, gerando uma hidratação prolongada do material, resultando em um aumento gradual da umidade superficial, assim como verificaram Ma *et al.* (2020).

Ao comparar a umidade superficial entre as camadas das três misturas destinadas aos ensaios de propriedades mecânicas, foi obtido, conforme a Figura 108.

Figura 108 – Umidade superficial entre as duas camadas. A)HPMC; B)10MC; C)30MC.



Fonte: Autoria própria (2023).

O espectro de cores nesta etapa da análise sofreu poucas variações, principalmente porque as imagens foram feitas quase que no mesmo instante e no mesmo cenário e posição. O resultado da temperatura superficial entre as camadas confirma os resultados anteriores, em que as amostras HPMC e 30MC apresentaram quase que a mesma temperatura e a amostra 10MC apresentou cerca entre 1,5 e 2,0 °C a menos indicando maior umidade superficial.

A umidade superficial tem a tendência de aumentar com o passar do tempo, de acordo com Sanjayan *et al.* (2018), no momento da impressão há uma lubrificação causada pela extrusão que evapora dando lugar a água que deve fluir do interior para a superfície da camada.

Na Figura 108 é possível observar este aumento de umidade superficial após cerca de 30 minutos da impressão das amostras, Sanjayan *et al.* (2018) relacionou a umidade superficial da camada após 10 e 30 minutos de impressão com a resistência de aderência.

4.3 Campanha experimental 3

4.3.1 Ensaio de compressão axial

- **Amostras extrudadas e moldadas**

Os resultados obtidos de resistência à compressão axial média, feita com três amostras de cada mistura, aos 21 dias, para os materiais impressos e moldados assim que saíram do bico do maquinário, para os materiais HPMC, 10MC e 30MC e seus desvios-padrão e coeficientes de variação correspondentes, estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Resistência à compressão média* das amostras moldadas aos 21 dias

MISTURAS	MÉDIA DE RESISTÊNCIA DO ENSAIO (MPa)	DESVIO PADRÃO (σ)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
HPMC	18,49	1,16	6,29
10 MC	18,59	0,33	1,77
30 MC	21,60	0,21	1,00

*média com 2 determinações para cada mistura.

Fonte: Autoria própria (2023).

A análise da resistência à compressão axial média, realizada em das argamassas de 10MC e 30MC quando retiradas diretamente do bico da extrusão, em relação a argamassa referência de HPMC, observa-se um aumento de 5,43% e 19,45% respectivamente.

Estas amostras foram moldadas, porém não adensadas, de forma a relacionar os valores obtidos com as amostras em camadas e com as amostras moldadas aos 63 dias. Nota-se um índice de variação alto entre os materiais o que pode ser explicado pela grande variedade de formas adquiridas por eles, já que saíram do bocal livremente gerando vazios no molde. As amostras com maior variedade de geometria foram as da mistura 10MC, o que pode explicar o seu índice de variação maior em relação as outras.

Os resultados obtidos de resistência à compressão axial média, feita com três amostras de cada mistura, aos 63 dias, para os materiais impressos e moldados assim que saíram do bico do maquinário, para HPMC, 10MC e 30MC, seus desvios-padrão e coeficientes de variação correspondentes, estão representados na Tabela 34.

Tabela 34 – Resistência à compressão média* das amostras moldadas aos 63 dias

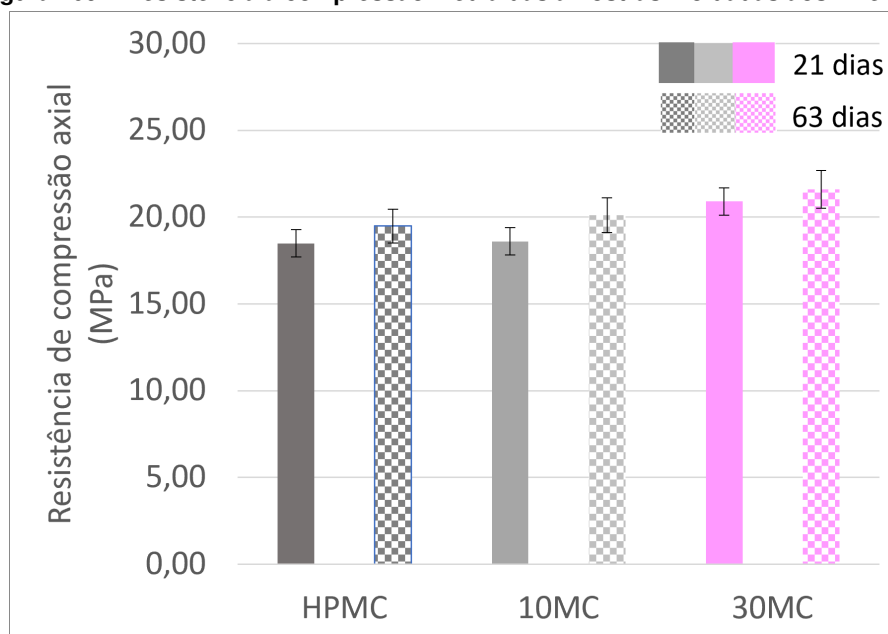
MISTURAS	MÉDIA DE RESISTÊNCIA DO ENSAIO (MPa)	DESVIO PADRÃO (σ)	COEFICIENTE DE VARIACÃO (%)
HPMC	19,49	0,80	4,09
10 MC	20,11	0,46	2,27
30 MC	21,60	5,88	27,23

*média com 3 determinações para cada mistura.

Fonte: Autoria própria (2023).

A análise da resistência à compressão axial média, realizada em argamassas de 10MC e 30MC, quando retiradas diretamente do bico de extrusão, em relação a argamassa de referência de HPMC, aos 63 dias, teve um aumento de 8,3% e 10,82%, respectivamente.

A Figura 109 traz o gráfico com os valores médios obtidos para este ensaio aos 21 e 63 dias.

Figura 109 – Resistência à compressão média das amostras moldadas aos 21 e aos 63 dias

Fonte: Autoria própria (2023).

O coeficiente de variação foi menor entre as amostras ensaiadas aos 63 dias do que entre os resultados obtidos aos 21 dias, indicando maior homogeneidade entre as amostras. Apesar da variação de resultados entre as misturas, nota-se que a resistência à compressão aumentou com o aumento da adição de metacaulim, assim como obtido por Chen *et al.* (2020) com 25 e 50% de substituição de (MC), que afirma que houve um aumento da estruturação no material impresso.

- **Amostras impressas em duas camadas**

As amostras impressas em duas camadas foram ensaiadas na direção paralela, ou seja, a amostra se posicionou com as camadas paralelas à superfície, os valores de resistência, desvio padrão e coeficiente de variação estão na Tabela 35.

Tabela 35 – Resistência à compressão média* das amostras impressas em duas camadas aos 63 dias

MISTURAS	MÉDIA DE RESISTÊNCIA DO ENSAIO (MPa)	DESVIO PADRÃO (σ)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
HPMC	9,12	0,45	4,89
10 MC	10,81	3,21	29,71
30 MC	15,02	0,87	5,82

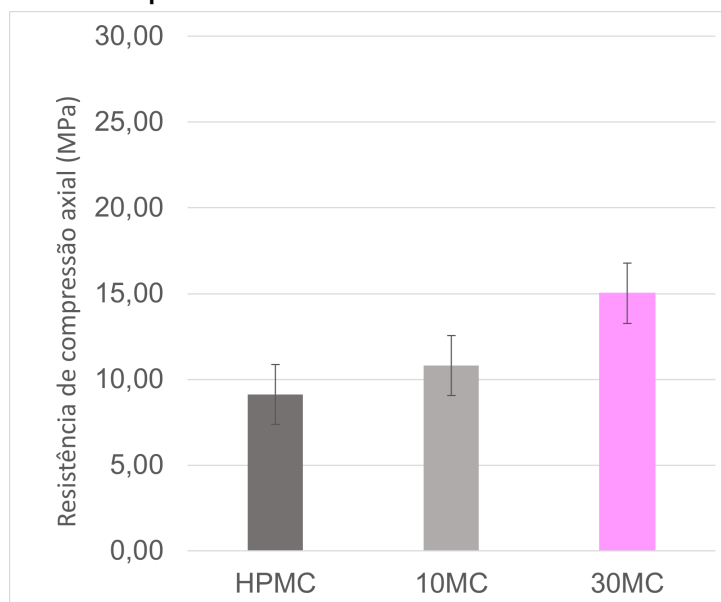
*média com 3 determinações para cada mistura.

Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados mostram que todas as amostras perderam resistência ao serem impressas em duas camadas, apesar do formato irregular adquirido pelas amostras quando moldadas, o material que foi moldado atingiu valores de resistência cerca de duas vezes maior do que o impresso em camadas para as misturas de HPMC e 10 MC, Meurer e Classen (2021) obtiveram um ganho de resistência de 96% em materiais moldados.

O gráfico destes resultados está na Figura 111 e a amostra após a compressão está na Figura 111.

Figura 110 – Resistência à compressão média das amostras extrudadas em duas camadas aos 63 dias



Fonte: Autoria própria (2023).

A mistura 30 MC apresentou um aumento de 43,81% de resistência à compressão axial nas amostras impressas e moldadas em relação as amostras impressas em duas camadas, da mesma forma que Wolfs, Bos e Salet (2019) obtiveram um acréscimo de 31% ao comparar as amostras moldadas e em duas camadas.

Figura 111 – Amostra após o rompimento



Fonte: A autoria própria (2023).

Notou-se uma perda significativa de resistência ao se comparar estes materiais com os moldados, isto pode ter ocorrido pelo processo de extrusão e deposição de forma livre sobre o molde e com a divisão causada pela camada, gerando vazios na amostra e intensificando as características anisotrópicas, apontada por Meurer e Classen (2021) e Padilha (2020) como principal causa desta perda de resistência à compressão.

Mesmo com a perda significativa de resistência entre as amostras impressas em duas camadas e moldadas, a resistência à compressão, independente do formato, geometria e dimensão do material, aumentou com o acréscimo do teor de metacaulim em substituição ao cimento, assim como os resultados de Chen et al. (2019) em que houve um aumento da estruturação do material, ou seja, de sua capacidade construtiva, impresso com 25% de substituição de (MC).

Medina (2011) também verificou que a substituição de 30% de metacaulim em relação a massa de cimento de materiais cimentícios fez com que houvesse um aumento de 2 MPa de resistência à compressão axial, aos 63 dias.

4.3.2 Ensaio de tração na flexão

- **Amostras extrudadas e moldadas**

Para os ensaios de tração na flexão, foram utilizadas amostras somente com a idade de 63 dias. Considerou-se corpos de prova moldados após a saída do bico do maquinário, sem adensamento e as amostras cortadas após serem impressas em duas camadas com perímetro de 160 cm cada camada.

Os resultados de resistência obtidos para o grupo das amostras extrudadas e moldadas para cada mistura (HPMC, 10MC e 30MC) seus desvios-padrão e coeficientes de variação correspondentes, estão apresentados na Tabela 36.

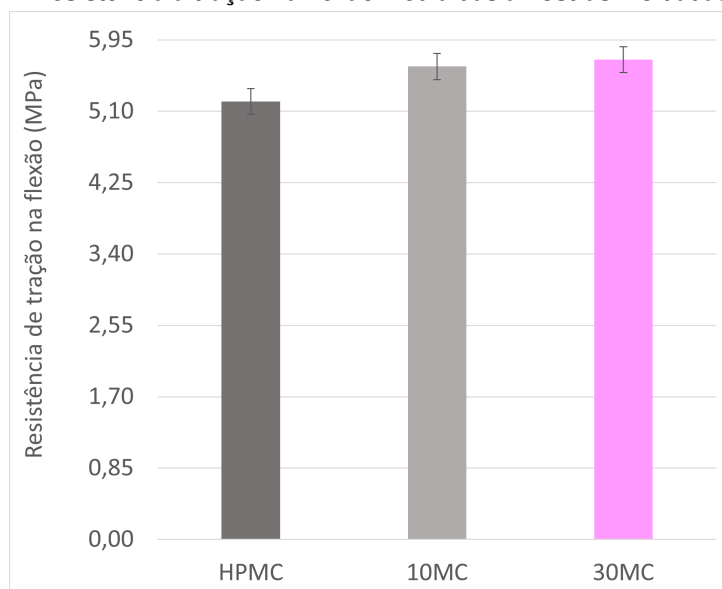
Tabela 36 – Resistência à tração na flexão média* das amostras moldadas aos 63 dias

MISTURAS	MÉDIA DE RESISTÊNCIA DO ENSAIO (MPa)	DESVIO PADRÃO (σ)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
HPMC	5,21	0,36	6,97
10 MC	5,63	0,18	3,12
30 MC	5,71	0,09	1,56

*média com 2 determinações para cada mistura

Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados obtidos com o ensaio de resistência à tração na flexão para amostras moldadas se aproximaram de 5 MPa para as três misturas, correspondendo a cerca de 27% da resistência à compressão, considerando a idade de 63 dias.

Figura 112 – Resistência à tração na flexão média das amostras moldadas aos 63 dias

Fonte: Autoria própria (2023).

*média com 2 determinações para cada mistura

Os resultados deste ensaio também se apresentaram mais homogêneos entre as misturas em relação aos resultados de resistência à compressão axial, isto se deve pela maior conformidade de dimensão adquirida no momento da moldagem deste material. Na Figura 112 é possível observar o gráfico com os resultados de resistência obtidos.

- **Amostras extrudadas em duas camadas**

Os resultados de resistência obtidos para o grupo das amostras impressas em duas camadas e cortadas com o cortador para cada mistura (HPMC, 10MC e 30MC) seus desvios-padrão e coeficientes de variação correspondentes estão apresentados na tabela 37.

Tabela 37 – Resistência à tração na flexão média* das amostras impressas em duas camadas aos 63 dias

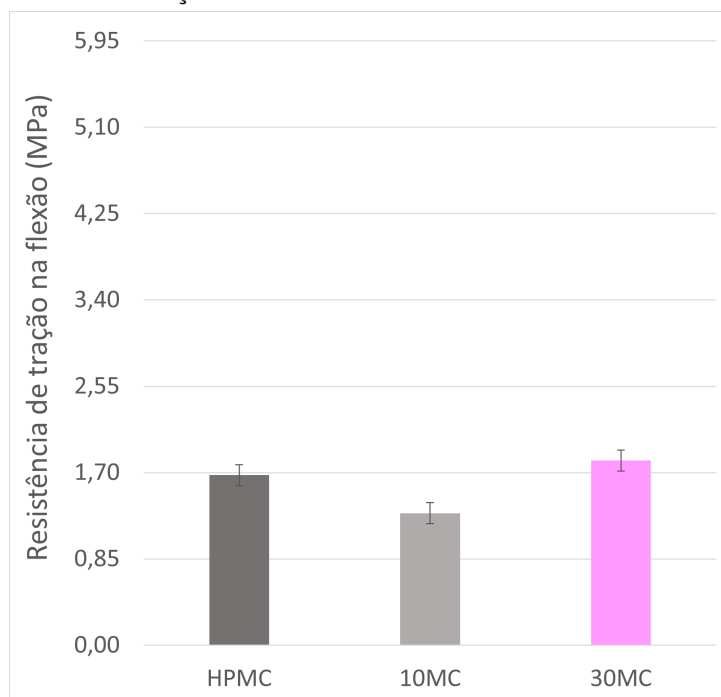
MISTURAS	MÉDIA DE RESISTÊNCIA DO ENSAIO (MPa)	DESVIO PADRÃO (σ)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
HPMC	1,68	0,10	6,14
10 MC	1,30	0,13	9,98
30 MC	1,82	0,01	0,70

*média com 2 determinações para cada mistura

Fonte: Autoria própria (2023).

A resistência de tração na flexão em duas camadas com carga aplicada em seu sentido perpendicular de impressão teve valor máximo de 1,82 MPa contendo 30% de metacaulim em substituição a massa de cimento. Este valor correspondeu a 31,87% da resistência obtida na amostra extrudada e moldada, sendo cerca de três vezes menor do que a resistência da amostra 30MC moldada, esta diferença se aproximou da obtida por Wolfs, Bos e Salet (2019), que obteve a resistência reduzida para 25% da resistência da amostra moldada em relação a impressa em duas camadas.

Na Figura 113 é possível observar o gráfico com os resultados obtidos no ensaio.

Figura 113 – Resistência à tração na flexão média das amostras em duas camadas aos 63 dias

Fonte: Autoria própria (2023).

*média com 2 determinações para cada mistura

Este resultado se diferenciou dos demais de resistência à compressão axial com o material impresso e moldado e impresso em duas camadas e do ensaio de tração à flexão com o material moldado, em que houve uma tendência de comportamento, com aumento de resistência de acordo com o aumento da substituição de (MC).

Neste ensaio a amostra 30MC continuou com maior resistência (1,82 MPa), seguida pela amostra HPMC (1,68 MPa) e a amostra 10MC (1,30 MPa) com menor resistência, sendo 40% menor do que a mistura com 30% de substituição de (MC). Isto pode ser explicado pela posição da aplicação da carga no centro da ligação entre as camadas, que é parte mais frágil do material, verificada também por Geng *et al.* (2020), sendo assim a ligação da interface, umidade superficial e presença de vazios deve ter maior influência nestes resultados do que a composição da mistura.

O resultado foi comparado com o ensaio de aderência entre camadas, que seguiu a mesma lógica e está descrito na seção seguinte. O ensaio se deu com a amostra posicionada com as camadas em perpendicular em relação a aplicação da carga, conforme vídeo contido no QR Code 114 que é a parte mais frágil do material, sendo o local com maior número de vazios. O rompimento ocorreu conforme a Figura 115.

Figura 114 – Momento do ensaio de tração na flexão.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 115 – Ensaio de tração na flexão.



Fonte: Autoria própria (2023).

Após o rompimento, as duas partes resultantes foram cortadas com comprimento de 8 cm e retificadas para serem submetidas aos ensaios de compressão axial.

4.3.3 Ensaio de aderência entre camadas

O ensaio de tração direta para a determinação da resistência de aderência entre camadas ocorreu na idade de 165 dias após algumas tentativas e erros que se encontram descritas no Apêndice. Os resultados médios obtidos no ensaio de tração direta para a aderência entre camadas estão descritos na Tabela 38.

Tabela 38 – Resistência de aderência média* entre as camadas das amostras impressas aos 165 dias

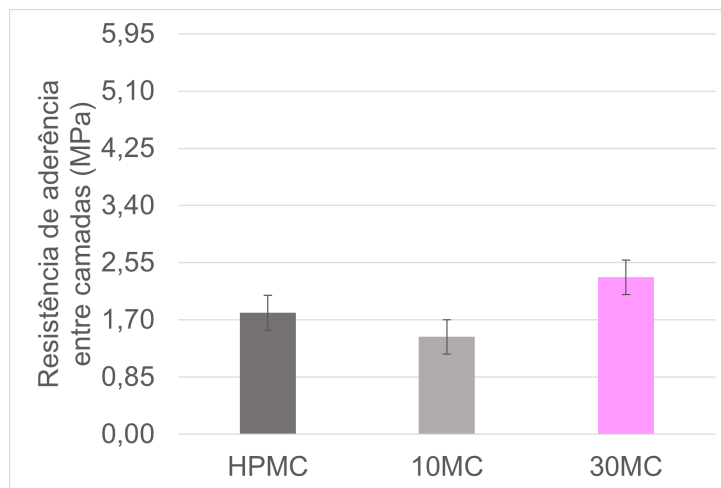
MISTURAS	MÉDIA DE RESISTÊNCIA DO ENSAIO (MPa)	DESVIO PADRÃO (σ)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
HPMC	1,81	0,04	2,49
10 MC	1,45	0,11	7,53
30 MC	2,34	0,23	9,86

*média com 3 determinações para cada mistura

Fonte: Autoria própria (2023).

Com a análise de resistência média de aderência entre as camadas do material impresso, de acordo com a Figura 116, verifica-se uma queda de aproximadamente 20% de resistência do HPMC para a amostra 10MC, por outro lado, houve um aumento de quase 30% de resistência da amostra HPMC para a 30MC.

Figura 116 – Resistência de aderência média entre camadas aos 165 dias.



Fonte: Autoria própria (2023).

*média com 3 determinações para cada mistura

A metodologia para a determinação da resistência de aderência entre as camadas de material cimentício impresso, como citado anteriormente, foi adaptado das pesquisas de Sanjayan *et al.* (2018) e Padilha (2020) que com a aplicação de força no sentido de tração direta tornou possível medir a resistência na interface das amostras. O ensaio foi aprimorado ao longo da pesquisa com a variação de acessórios e ajustes no tamanho e geometria dos elementos.

Sanjayan *et al.* (2018) obtiveram valores de 0,65 MPa de resistência máxima para os seus elementos, o parâmetro de análise proposto por eles girou em torno do intervalo de tempo

entre a impressão das camadas, eles verificaram essa resistência máxima em um intervalo de 10 e 30 minutos, enquanto que houve queda de resistência em um intervalo de 20 minutos e relacionaram este fato a uma umidade superficial propícia para a melhor aderência entre as camadas.

Os resultados obtidos por Padilha (2020) também indicaram variação de resistência de aderência em relação ao tempo de espera de deposição de camadas, atingindo até 1,13 MPa de resistência com intervalo de 40 minutos, com intervalo de tempo semelhante Le *et al.* (2012a), obteve a resistência de 0,8 MPa e uma variação de 2 a 3 MPa entre amostras que romperam próximo à interface, porém ele atribui estes resultados ao comportamento do núcleo da amostra e não à aderência entre as camadas.

Le *et al.* (2012a) ainda afirmam que a resistência de aderência entre as camadas de concreto impresso é a propriedade mecânica mais crítica deste tipo de material porque ela é condicionada por diversas variáveis como composição do material, processo de impressão, tempo de deposição de camadas, que pode originar vazios na interface, reduzindo a durabilidade do objeto impresso, sendo necessário um equilíbrio entre todos os fatores.

Eles concluem que o uso de aditivos superplastificantes e retentores de água pode otimizar esta propriedade por manter a camada com lubrificação suficiente e ao mesmo tempo rígida para suportar o peso de mais camadas, como verificado nesta pesquisa em que foi adicionado 0,3% de (HPMC) e foram obtidos valores de resistência de aderência entre camadas maiores. Na Figura 118 é possível observar como se deu o rompimento da amostra.

Figura 117 – Amostra após ser submetida à tração direta



Fonte: Autoria própria (2023).

Apesar da abertura do chanfro ter sido feita no meio da amostra, o rompimento ocorreu na ligação entre as camadas, sinalizando a região mais frágil do material, é possível verificar na Figura 118 as duas camadas após o ensaio, nota-se o formato adquirido por cada camada após o estado endurecido da argamassa.

Figura 118 – Amostra após ser submetida à tração direta



Fonte: Autoria própria (2023).

A linha de ruptura acompanha a linha da camada. Na Figura 119 se encontram as 9 amostras após serem submetidas ao ensaio.

Figura 119 – Amostras após o rompimento



Fonte: Autoria própria (2023).

Assim como as amostras de Le *et al.* (2012a), os resultados aqui obtidos, com máxima resistência de aderência entre camadas de 2,34 MPa, excede a resistência mínima de aderência recomendada pela Concrete Society (AUSTIN; ROBINS; GOODIER, 2000) de 0,8 MPa e são semelhantes às resistências de aderência de argamassas de reparo, de 0,8 a 2,3 MPa. Meurer

e Classen (2021) obtiveram resultados semelhantes, com máxima de 1,06 MPa, com intervalo de 10 minutos de impressão.

Eles também citam que amostras menores podem produzir melhores resultados em ensaio de tração direta e atribuem a perda de resistência ao tempo de deposição de camadas e ao teor reduzido de agregado na interface com desidratação com o passar do tempo. Verificaram que com o aumento de intervalo de deposição de camadas houve uma perda de resistência de aderência e chamam a atenção da influência da umidade superficial nesta propriedade.

Nesta pesquisa, a umidade superficial inicial entre as amostras foi comparada por meio da câmera termográfica e foi verificado que a mistura com maior umidade, de 10MC, também foi a com menor resistência à tração na flexão e resistência de aderência entre as camadas, sinalizando uma falha maior na interface quando comparada à HPMC e 30MC, com umidades semelhantes, vale destacar que o intervalo entre a impressão das camadas foi o mesmo, de aproximadamente 4 minutos e que a variável em questão foi unicamente a composição das amostras.

Além disso, outros fatores como tamanho da amostra e porosidades diferentes no momento da impressão podem ter influenciado nestes resultados e deve haver uma umidade superficial ideal para garantir a aderência entre as camadas da argamassa impressa. Portanto, a quantificação destes poros na interface de cada amostra foi verificado por meio da microtomografia computadorizada de raios-X e a influência do intervalo de tempo de impressão entre as camadas na umidade superficial com os presentes materiais pode ser foco de pesquisas futuras.

Para melhor visualização do ensaio e de como se comportou a amostra no momento da aplicação da força de tração, a Figura 120 é um QR CODE contendo o trecho de ruptura do material.

Figura 120 – Momento do rompimento da amostra



Fonte: Autoria própria (2023).

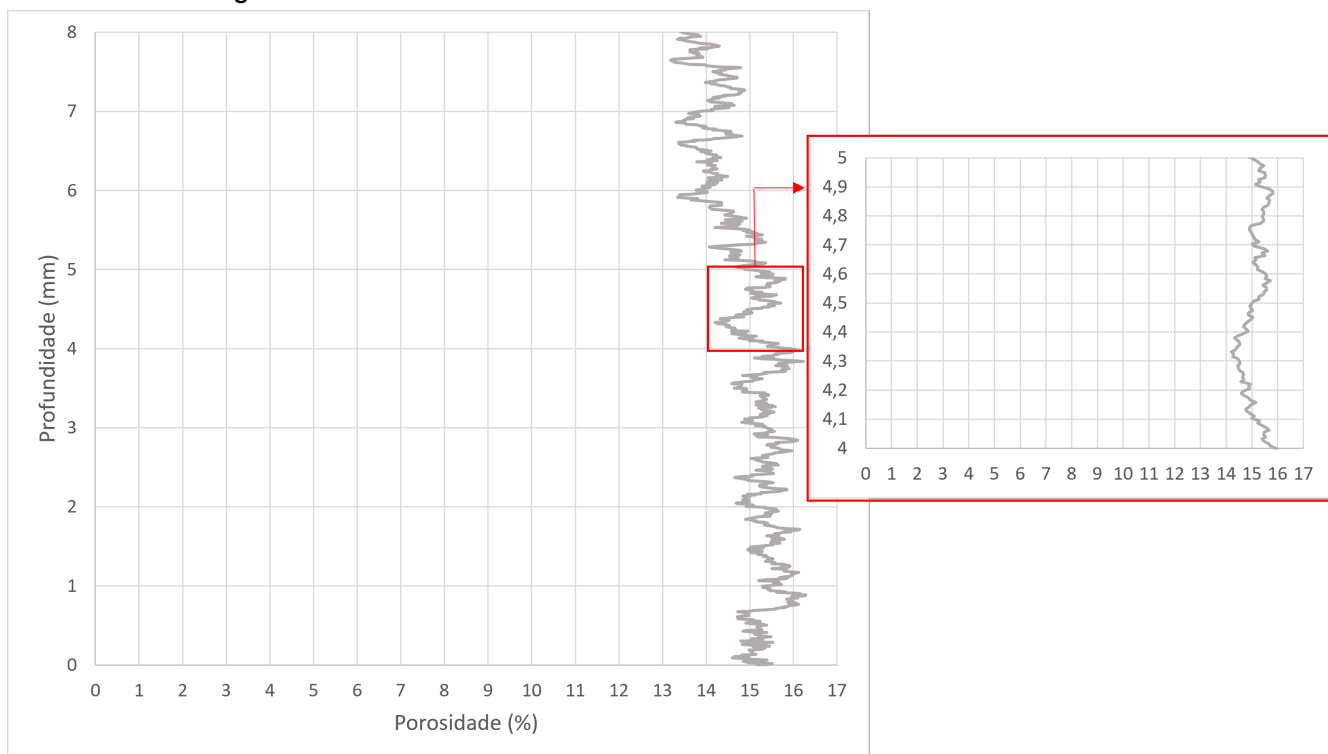
4.3.4 Microestrutura: Análise por microtomografia computadorizada de raios-X (μ -CT)

Com a finalidade de verificar a porosidade existente na região da sobreposição das camadas em comparação com o restante da amostra, o ensaio foi realizado aos 165 dias em

paralelo com os ensaios de aderência entre camadas. A resolução espacial definida na μ -CT foi de 8 μ m, definida pelo tamanho da amostra (8 x 5 x 5) mm.

Os resultados de porosidade total da amostra HPMC, considerando todo o comprimento de análise (8 mm) e a faixa da interface (entre 4 e 5) mm, estão na Figura 121.

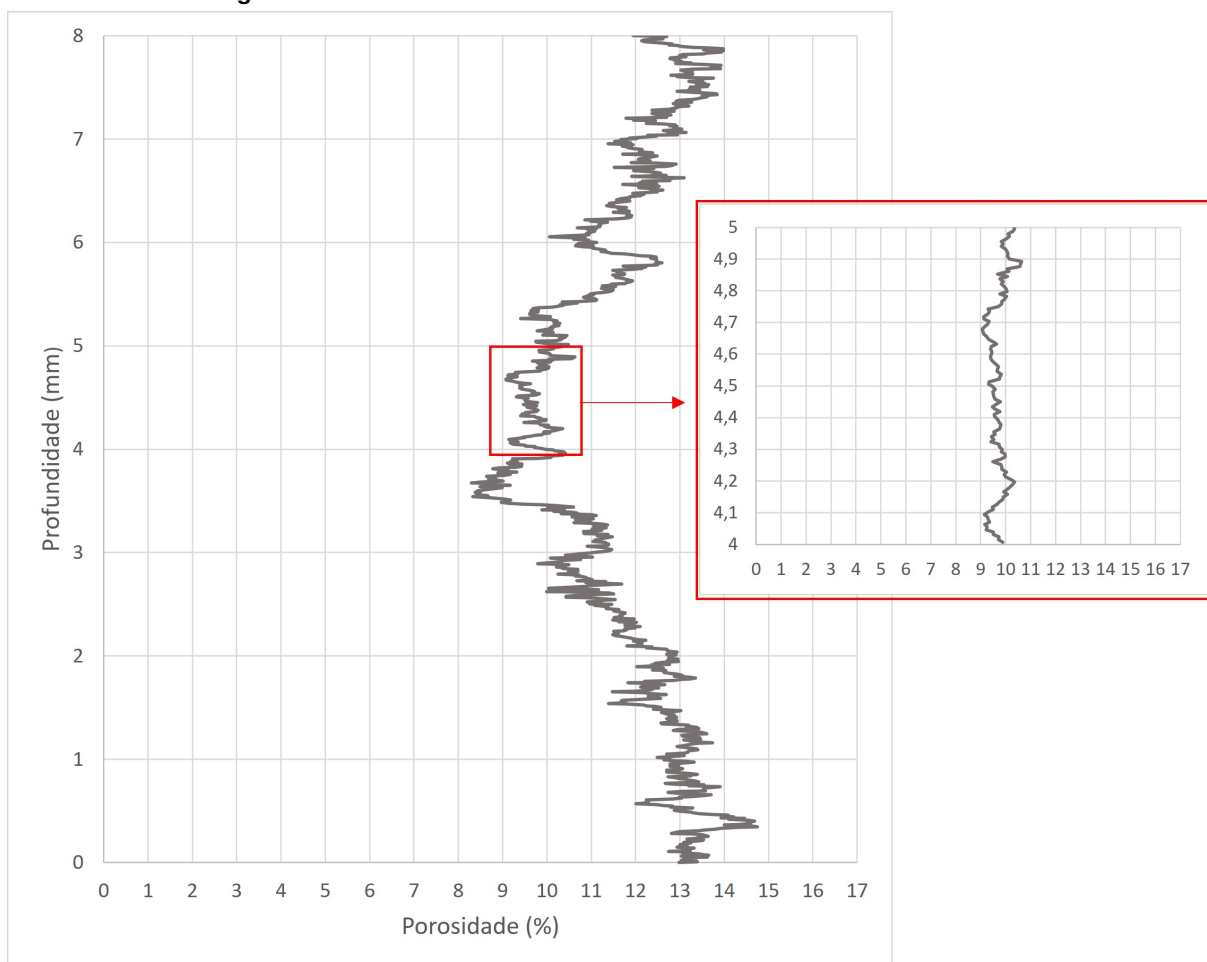
Figura 121 – Porosidade total da amostra HPMC e da faixa da interface



Fonte: Autoria própria (2023).

A porosidade total para a amostra HPMC foi de 13,96% enquanto que a porosidade encontrada na faixa da interface foi de 15%, apesar desta variação, a amostra se manteve homogênea ao longo do seu comprimento ao se comparar com a amostra 10MC e 30MC. O percentual da porosidade obtida na amostra 10MC está na Figura 122.

Figura 122 – Porosidade total da amostra 10MC e da faixa da interface

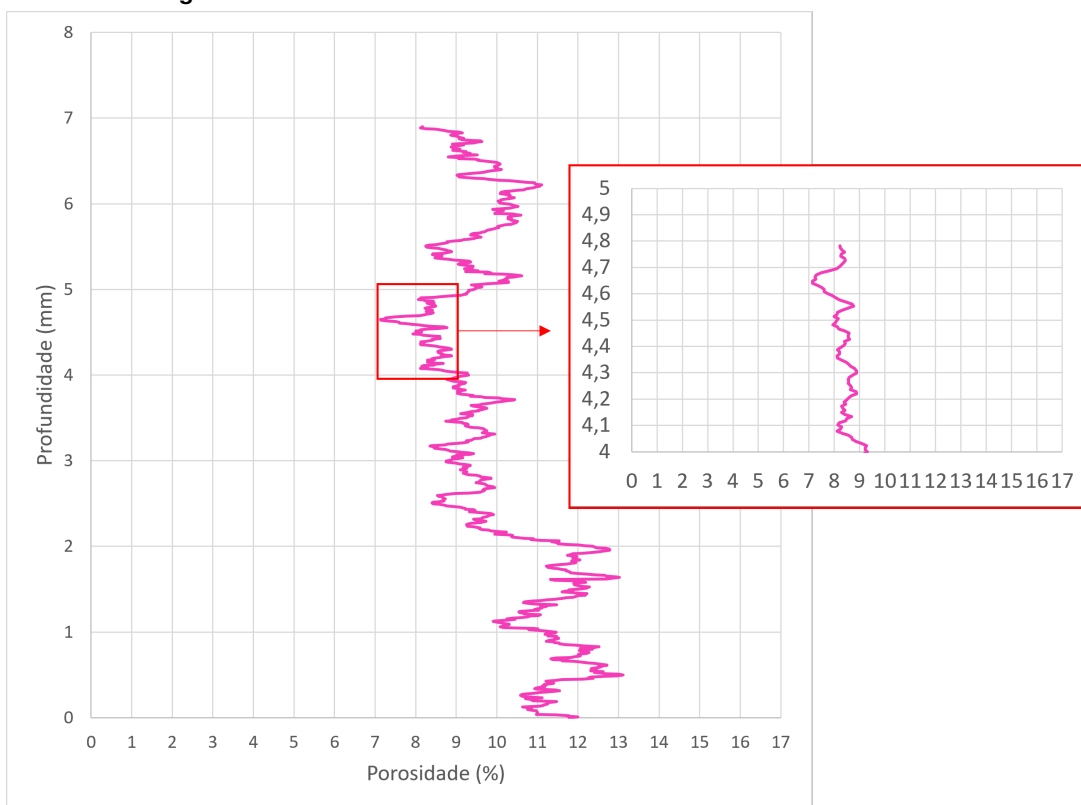


Fonte: Autoria própria (2023).

A porosidade total obtida na amostra 10MC foi de 11,03%, com diminuição na região da faixa da interface, sendo de 9,72%, o percentual de porosidade foi de 64,8% menor do que para a amostra HPMC, indicando maior compactidade do material com a adição de metacaulim que se torna ainda maior ao se aproximar da interface.

A diminuição do percentual de porosidade com a adição de metacaulim e ao se aproximar da interface se confirma com a amostra 30MC, conforme Figura 123.

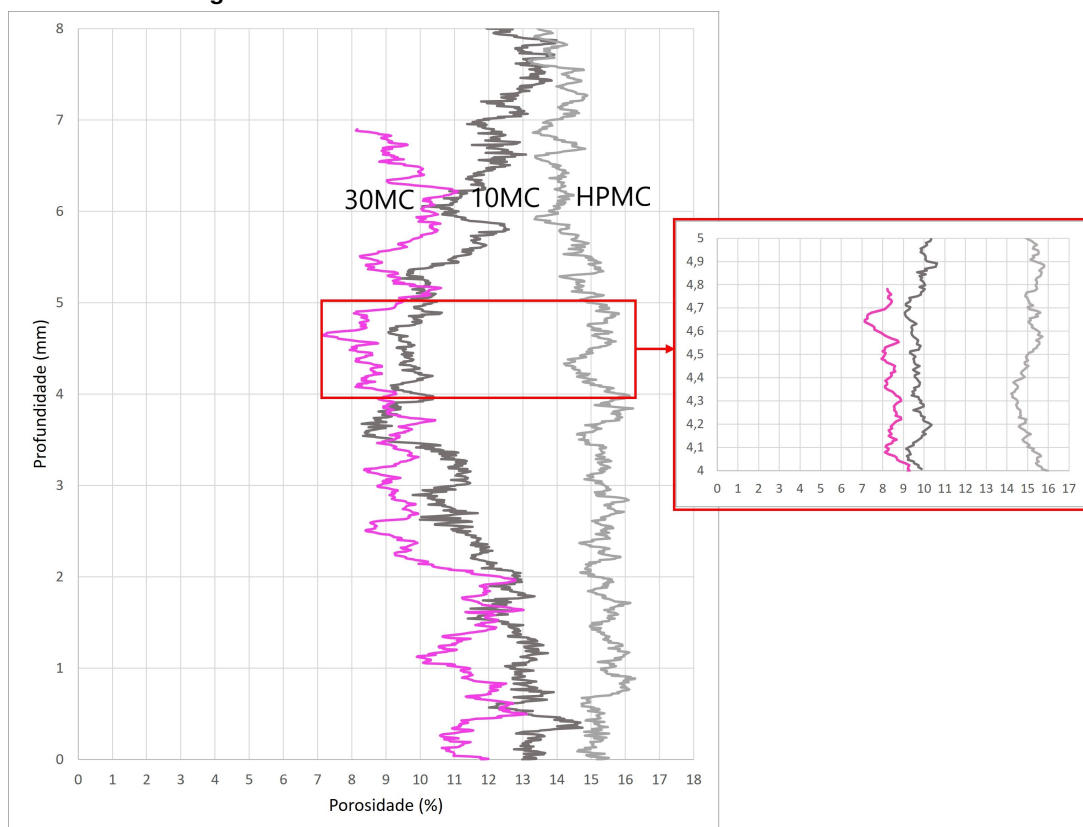
Figura 123 – Porosidade total da amostra 30MC e da faixa da interface



Fonte: Autoria própria (2023).

A porosidade total para a amostra 30MC foi de 9,3%, com diminuição na região da faixa entre 4 a 5 mm para 8,3% em relação a amostra, sendo o menor percentual de porosidade obtido no ensaio, entre a mistura HPMC e 30MC, na região da interface, teve uma diminuição de percentual de porosidade de 55,33%. Com a Figura 124 é possível comparar a distribuição de porosidade para as três amostras e para a faixa da sobreposição da camada.

Figura 124 – Porosidade total das amostra e da faixa da interface

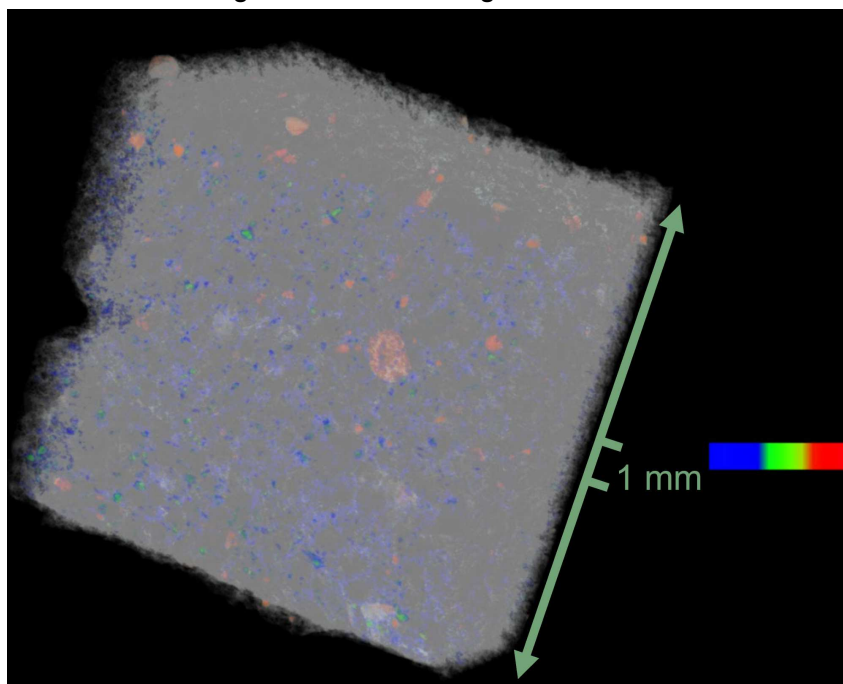


Fonte: Autoria própria (2023).

A distribuição de porosidade se deu com pequenas variações ao longo das amostras, sendo menor para a amostra HPMC que foi a mais homogênea. Com o aumento de substituição de (MC) houve a diminuição da porosidade que foi ainda menor na faixa da interface de 30MC e 10MC, nota-se o comportamento semelhante na região da sobreposição no gráfico para estas duas amostras.

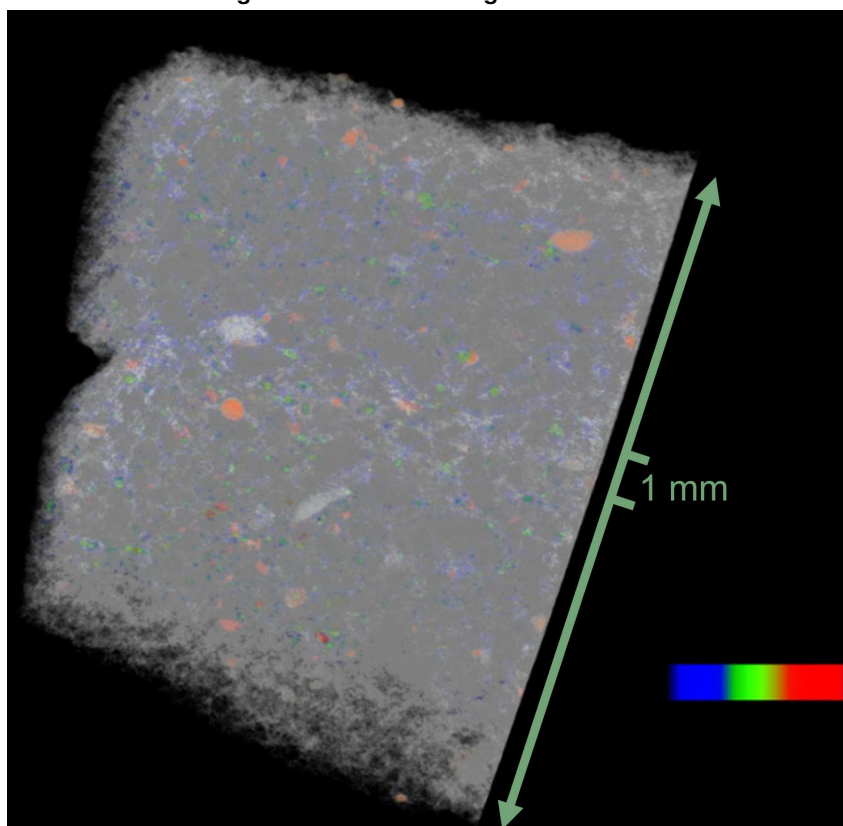
A distribuição da porosidade é possível ser observada nas Figuras 125, 126 e 127, estas foram construídas por meio do microtomógrafo.

Figura 125 – Microtomografia de HPMC



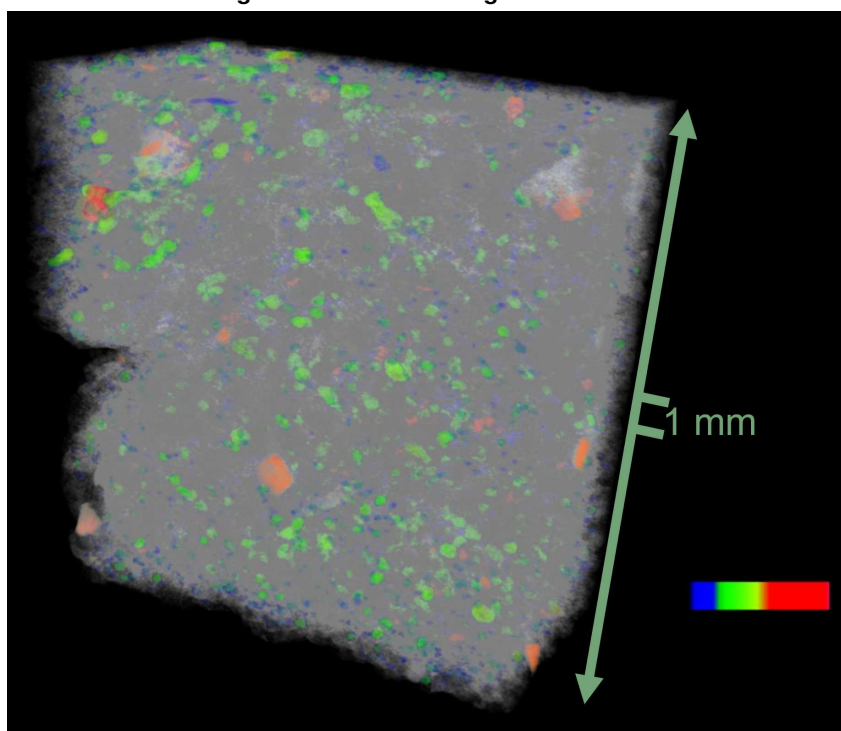
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 126 – Microtomografia de 10MC



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 127 – Microtomografia de 10MC

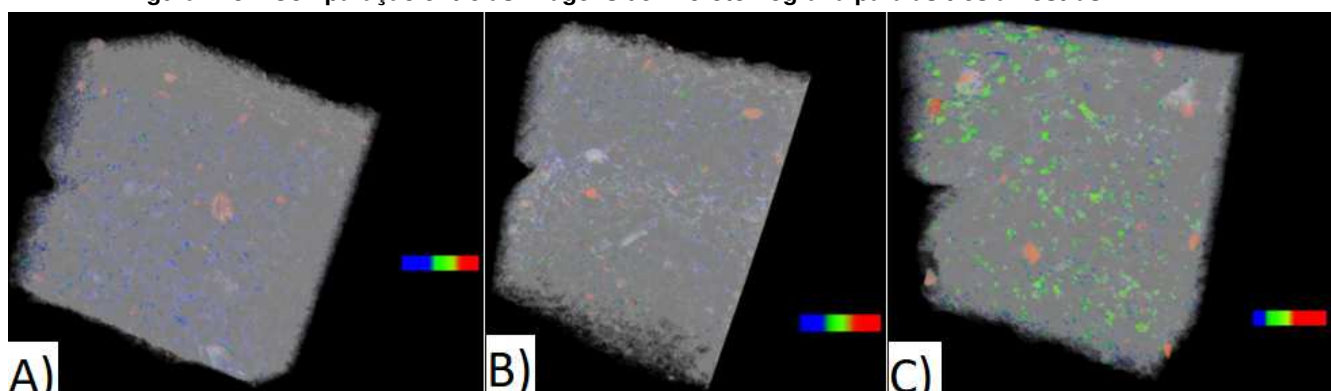


Fonte: Autoria própria (2023).

A escala de cores de azul ao vermelho indica o tamanho dos poros encontrados nas amostras, quanto mais próximo de azul, menor o tamanho dos poros e quanto mais próximo do vermelho, maior o tamanho dos poros. Na Figura 128 é possível comparar as três amostras e verificar que os poros menores se encontram em HPMC e os poros maiores, em verde, se encontram em 30MC.

A interface está indicada na faixa de 1 mm e ainda conclui-se que não é possível visualizar a divisão das camadas para HPMC e 30MC e em 10MC a faixa se torna mais visível.

Figura 128 – Comparação entre as imagens de microtomografia para as três amostras



Fonte: Autoria própria (2023).

Chen *et al.* (2020) também obtiveram um refinamento da microestrutura de suas amostras com a adição de (MC) e sílica, com diminuição de porosidade e aumento da densidade

proporcionado pelas partículas finas. As resistências à compressão de suas pastas alcançaram ganhos significativos chegando a 146% aos 28 dias com teores de 10,6 e 8,28% de sílica e (MC), respectivamente.

Assim como nesta pesquisa, em que o ganho de resistência à compressão axial se deu com o aumento do teor de adição de (MC), sendo a diferença mais significativa entre as amostras HPMC e 30MC extrudadas e moldadas em duas camadas, com 64,7% de aumento aos 63 dias. Em relação a aderência entre as camadas, a amostra 30MC com maior resistência, também foi a com menor porosidade nesta faixa de ligação, porém, não houve a mesma tendência de comportamento para as outras duas amostras, necessitando de uma análise relacionada ao tamanho e formato dos poros de cada amostra e na superfície da interface.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa buscou estudar misturas promissoras para a aplicação ao processo de impressão 3D e verificar as propriedades mecânicas de acordo com o teor de adição de metacaulim (MC) ao material imprimível, bem como estabelecer uma metodologia de ensaio para determinar a resistência de aderência entre as camadas impressas e investigação da interface por meio da umidade superficial e microestrutura do material.

Observou-se que com o aumento da porcentagem de metacaulim, os tempos de início e fim de pega foram antecipados. A adição de (HPMC) se mostrou favorável porque promoveu uma retenção de água no material com lubrificação da superfície ao longo do tempo, adiando o início do tempo de pega e aumento do tempo de trabalho e promovendo a aderência entre as camadas, características importantes para a aplicação na impressão 3D, deste modo, as argamassas selecionadas se mostraram promissoras.

As misturas com 10% e 30% de (MC) apresentaram atraso de tempo de início de pega com a adição (HPMC) em cerca de 85 e 65 minutos, respectivamente, sendo os teores escolhidos para a impressão por este aspecto e por terem maior impacto sustentável. A substituição de (MC) promoveu um aumento de consistência das argamassas após a extrusão indicando a sua influência na fluidez e trabalhabilidade após o bombeamento, sendo mais expressiva para a amostra de 30MC que teve acréscimo de 7,5% de consistência em relação a essa amostra antes da extrusão.

Quanto a influência dos materiais suplementares no processo de impressão 3D em relação as propriedades mecânicas, observou-se um ganho de resistência à compressão axial com o aumento do teor de metacaulim, sendo 19,4% e 10,82% maior na amostra 30MC em relação a amostra HPMC aos 21 e 63 dias, respectivamente. Esta diferença foi ainda mais expressiva para as amostras impressas em duas camadas aos 63 dias, com ganho de resistência de 48,81% na amostra 30MC em relação à HPMC, acentuando que o acréscimo de teor de (MC) em substituição promove um aumento da resistência à compressão.

Já nos ensaios de tração na flexão têm-se inicialmente para as amostras moldadas e ensaiadas aos 63 dias uma homogeneidade de resultados, com resistência 8,7% maior para a amostra 30MC, seguida da 10MC e HPMC, todas na ordem de 5 MPa. Porém, para as amostras extrudadas em duas camadas com a mesma idade, têm-se uma redução de cerca de três vezes a resistência das amostras moldadas com 30MC possuindo o valor maior, de 1,82 MPa, seguida da amostra HPMC e a de 10MC possuindo menor resistência, de 1,30 MPa.

Este resultado se diferenciou da tendência do aumento de resistência com o aumento de teor de metacaulim, isto porque a aplicação de carga neste caso se deu no centro de ligação entre as camadas, se relacionando com a aderência, presença de vazios e umidade superficial no momento da impressão de cada uma delas.

Deste modo, os ensaios de aderência entre camadas aconteceram na idade de 165 dias, sendo necessário o estabelecimento de uma metodologia de ensaio, que consistiu no

corte das amostras com cerca de 5,5 cm de comprimento e largura variando de acordo com o formato inicial de cada mistura e abertura de chanfros no centro de massa de cada amostra com tamanho proporcional à largura.

Além disso destaca-se o método de colagem do material nas pastilhas metálicas para melhor cura e distribuição de carga no momento do ensaio, com rompimento na região de ligação entre as camadas. Quanto aos resultados do ensaio, têm-se uma queda de 20% de resistência do HPMC para a amostra 10MC e um aumento de 30% de resistência da amostra HPMC para a 30MC, sendo a mistura com melhores resultados para as propriedades mecânicas.

Este resultado se relaciona com as resistências de tração na flexão e com a umidade superficial inicial verificada entre as amostras no momento da impressão, já que a amostra 10MC foi a com maior umidade, menor resistência de tração na flexão e menor resistência de aderência entre camadas, enquanto que a amostra 30MC foi a com maior resistência de aderência, de 2,34 MPa, e maior resistência de tração na flexão.

Além disso, outros fatores como a porosidade e a interação entre os poros da interface que ocorrem no momento da impressão podem ter influência na resistência de aderência entre camadas. Os resultados obtidos com μ -CT indicam que houve uma diminuição de percentual de porosidade na região da interface para as amostras 10MC e 30MC, sendo de 9,72% e 8,3%, respectivamente, menores do que para a amostra HPMC com percentual de 15% que se manteve quase que constante ao longo da amostra, indicando maior homogeneidade neste material.

A diminuição de porosidade se deu com o aumento do teor de substituição de (MC) e os resultados de compressão axial foram favoráveis neste sentido, porém, para a aderência entre as camadas, não houve a mesma tendência de comportamento para as amostras HPMC e 10MC, sendo pertinente a investigação do tamanho e formato dos poros de cada amostra na superfície da interface.

Por fim, conclui-se que a resistência de aderência entre as camadas de concreto impresso é uma propriedade mecânica crítica deste material porque ela pode ser condicionada por diversas variáveis como composição, extrusão, janela de impressão entre as camadas, que interfere na umidade superficial e em vazios incorporados nesta região, o que modifica a durabilidade do objeto impresso, sendo importante um equilíbrio entre todos os fatores por meio de normatização e padronização de ensaios e do processo construtivo.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Com a realização desta pesquisa, evidenciou-se a necessidade de continuidade do estudo em materiais cimentícios produzidos por impressão 3D, principalmente no que diz respeito à investigação dos materiais promissores e propriedades mecânicas, neste sentido, sugere-se:

- Desenvolver e executar projeto para edificações aplicado à impressão 3D de materiais cimentícios com o uso da tecnologia BIM;

- Verificar as propriedades mecânicas de construções impressas em 3D por meio da tecnologia BIM;
- Estudar materiais suplementares aplicados à impressão 3D visando o aumento da resistência da construção e sustentabilidade;
- Investigar a janela de impressão com relação à aderência entre as camadas;
- Produzir materiais impressos em diferentes maquinários, variando os parâmetros de impressão;
- Investigar a microestrutura dos materiais impressos em estado endurecido por meio de microscopia eletrônica de varredura e microtomografia computadorizada de raio-X com a finalidade de verificar os poros e tamanhos de poros na interface;
- Estudar diferentes métodos de ensaio de aderência entre camadas.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ, 2016. 6 p.
- ABNT NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ, 2016. 6 p.
- ABNT NBR 13277. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ, 2005. 237 p.
- ABNT NBR 13278. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ, 2005. 6 p.
- ABNT NBR 13279. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ, 2005. 6 p.
- ABNT NBR 16606. **Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ, 2018. 237 p.
- ABNT NBR 16607. **Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ, 2018. 237 p.
- AMORIM, E. M. R. **Avaliação no estado fresco de materiais cimentícios para impressão 3d com substituição de cimento Portland por metacaulim.** Londrina, PR: Trabalho de Conclusão de Curso (UEL), 2019. 81 p.
- ASTM. **Standard Test Method for Pull-Off Adhesion Strength of Coatings on Concrete Using Portable Pull-Off Adhesion Testers.** ASTM International, 2021. 6 p.
- AUSTIN, S. A.; ROBINS, P. J.; GOODIER, C. I. The performance of hardened wet-process sprayed mortars. **Magazine of Concrete Research**, v. 52, n. 3, p. 195–208, 2000.
- BAI, G. *et al.* 3d printing eco-friendly concrete containing under-utilised and waste solids as aggregates. **Cement concrete composites**, Elsevier Ltd, v. 120, p. 104037, 2021. ISSN 0958-9465.
- BALDON, D. V. dos S. **Influência da incorporação de nanossílica, sílica ativa e metacaulim na modificação da macro e microestrutura de compósitos cimentícios.** Londrina, PR: Dissertação de Mestrado (UEL), 2021. 200 p.
- BAZ, B.; AOUAD, G.; REMOND, S. Effect of the printing method and mortar's workability on pull-out strength of 3d printed elements. **Construction building materials**, Elsevier Ltd, v. 230, p. 117002, 2020. ISSN 0950-0618.
- BUSWELL, R. *et al.* 3d printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 37–49, 2018. ISSN 0008-8846. SI : Digital concrete 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617311924>.

BUSWELL, R. *et al.* Freeform construction: Mega-scale rapid manufacturing for construction. **Automation in construction**, Elsevier B.V, Amsterdam, v. 16, n. 2, p. 224–231, 2020. ISSN 0926-5805.

CHEN, Y. *et al.* Effect of different grade levels of calcined clays on fresh and hardened properties of ternary-blended cementitious materials for 3d printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103708, 2020. ISSN 0958-9465.

CHESSER BRIAN K. POST, A. R. R. F. L. A. M. B. L. J. L. P. C.; GAUL, K. T. Fieldable platform for large-scale deposition of concrete structures. **Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference Reviewed Paper**, v. 29, p. 13, 2020. Disponível em: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2018/165\%20FieldablePlatformforLargeScaleDepositionofC.pdf>.

CIMENTO NACIONAL. **Cimentos de Alta Performance e Qualidade Superior**. <https://cimentonacional.com.br/page/produtos?cimento-nacional-181>, 2022.

COSTA, L. T. **Avaliação das propriedades em estado fresco de uma argamassa para impressão 3D com substituição do cimento portland por metacaulim e adição de HPMC**. Londrina, PR: Trabalho de Conclusão de Curso (UEL), 2022. 81 p.

EN UNI 196-3. **Methods of testing cement part 3: determination of setting times and soundness**. EN196-3, 2016.

ENGENHOARTE.

FARIAS, L. *et al.* **Ensaio de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto**. 2018.

FLIR - RESEARCH AND SCIENCE. <<http://www.flir.com/science/display/?id=60812>>, 2016.

FREIRE, G. G. J.; AMARAL, G. M. **Uso da termografia infravermelha na identificação de umidade em elementos de vedação de edifícios**. Goiás, GO: Universidade Federal de Goiás, 2016. 16 p.

FURNAS. **Equipe de Concretos Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo - Ensaio e Propriedades**. 1997.

GENG, Z. *et al.* Layer-interface properties in 3d printed concrete: Dual hierarchical structure and micromechanical characterization. **Cement and Concrete Research**, v. 138, p. 106220, 2020. ISSN 0008-8846. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884620301794>.

HAGER, I.; GOLONKA, A.; PUTANOWICZ, R. 3d printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? **Procedia Engineering**, v. 151, p. 292–299, 2016. ISSN 1877-7058. Ecology and new building materials and products 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816317453>.

HAN, F. *et al.* Hydration heat of slag or fly ash in the composite binder at different temperatures. **Thermochimica acta**, Elsevier B.V, v. 655, p. 202–210, 2017. ISSN 0040-6031.

JIANCHAO, Z. *et al.* 3d printing cement based ink, and its application within the construction industry. **MATEC Web of Conferences**, EDP Sciences, Les Ulis, v. 120, p. 2003, 2017. ISSN 2261-236X.

JIANCHAO, Z. *et al.* 3d printing cement based ink, and its application within the construction industry. **Matec Web of Conferences**, v. 120, p. 13, 2017.

- KAZEMIAN, A. *et al.* Cementitious materials for construction-scale 3d printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 639–647, 2017. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817306657>.
- KHALIL, N. *et al.* Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3d-printing mortars. **Construction building materials**, Elsevier Ltd, v. 157, p. 382–391, 2017. ISSN 0950-0618.
- KHALIL, N. *et al.* Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3d-printing mortars. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 382–391, 2017. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817319311>.
- KHAN, M.; SANCHEZ, F.; ZHOU, H. 3-d printing of concrete: Beyond horizons. **Construction and Building Materials**, v. 133, 2020.
- KHAN, M. S.; SANCHEZ, F.; ZHOU, H. 3-d printing of concrete: Beyond horizons. **Cement and concrete research**, Elsevier Ltd, Elmsford, v. 133, p. 106070, 2020. ISSN 0008-8846.
- KHAN, M. S.; SANCHEZ, F.; ZHOU, H. 3-d printing of concrete: Beyond horizons. **Cement and concrete research**, Elsevier Ltd, Elmsford, v. 133, p. 106070, 2020. ISSN 0008-8846.
- KIDWELL, C. P. S. U. J.; OBISPOFOLLOW, S. L. Best practices and applications of 3d printing in the construction industry. **Cement and Concrete Research**, CalPoly, v. 42, n. 3, 2017.
- KRUGER, J.; ZERANKA, S.; ZIJL, G. van. 3d concrete printing: A lower bound analytical model for buildability performance quantification. **Automation in Construction**, Elsevier, v. 106, p. 102904, 2019.
- LAU, W. **3D-Printed Buildings are Coming Soon to a Planet Near You**. [S.l.]: Architect, 2014.
- LE, T. *et al.* Hardened properties of high-performance printing concrete. **Cement and concrete research**, Elsevier Ltd, OXFORD, v. 42, n. 3, p. 558–566, 2012. ISSN 0008-8846.
- LE, T. T. *et al.* Hardened properties of high-performance printing concrete. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 42, n. 3, p. 558–566, 2012.
- LEWANDOWSKI, J. J.; SEIFI, M. Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties (postprint). Case Western Reserve University Cleveland United States, 2016.
- LIM, S. *et al.* Developments in construction-scale additive manufacturing processes. **Automation in Construction**, v. 21, p. 262–268, 2012. ISSN 0926-5805. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580511001221>.
- LINDE, A. *et al.* Design and analyses of printable strain hardening cementitious composites with optimized particle size distribution. **Construction and Building Materials**, v. 324, p. 126411, 2022. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822001040>.
- LU, E. N. L. S.; KEANE, D. T. X-ray microtomographic studies of pore structure and permeability in portland cement concrete. **Materials and Structures**, v. 39, n. 1, p. 611–620, 2006.
- MA, G. *et al.* A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3d printing. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118305, 2020. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182030310X>.

MASSACINZENTA. 2020. <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/projeto-no-rn-constroi-1a-casa-do-brasil-com-impressora->.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. São Paulo, SP: Dissertação de mestrado, USP, 2011. 151 p.

MENDONÇA, L. V.; AMARAL, M. M. do; CATARINO, P. S. **A termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios**. Lisboa, Portugal: [s.n.], 2010. 16 p.

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. ISSN 1996-1944. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/4/752>.

MIER, J. van; VLIET, M. van. Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art. **Engineering fracture mechanics**, Elsevier Ltd, OXFORD, v. 69, n. 2, p. 235–247, 2002. ISSN 0013-7944.

MLODINOW, L. **Subliminar**. Rio de Janeiro, RJ: Zahar, 2012. 286 p.

NERELLA, V. N.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3d-printing. **Construction building materials**, Elsevier Ltd, v. 205, p. 586–601, 2019. ISSN 0950-0618.

NICOLAS, R. *et al.* Assessing the fresh properties of printable cement-based materials: High potential tests for quality control. **Cement and concrete research**, Elsevier Ltd, v. 158, p. 106836, 2022. ISSN 0008-8846.

NOGUEIRA, G. S. F. **Influência da incorporação de nanopartículas de sílica em compósitos cimentícios**. Londrina, PR: Dissertação de Mestrado (UEL), 2019. 154 p.

NOGUEIRA, L. **Nasa assina contrato para construir base lunar com impressão 3D**. São Paulo, SP: OLHAR DIGITAL, 2020. Disponível em: <https://olhardigital.com.br/2020/10/05/ciencia-e-espaco/nasa-assina-contrato-para-construir-base-lunar-com-impressao-3d/> p.

NOO, X.; WOU, L. Determining tensile properties of mass concrete by direct tensile test. **ACI materials journal**, Amer Concrete Inst, FARMINGTON HILLS, v. 86, n. 3, p. 214–219, 1989. ISSN 0889-3255.

PADILHA, V. Z. **Avaliação das propriedades mecânicas de elementos de concreto produzidos por impressão 3D**. Florianópolis, SC: Dissertação de Mestrado (UFSC), 2020. 118 p.

PANDA, B.; Chandra Paul, S.; Jen Tan, M. Anisotropic mechanical performance of 3d printed fiber reinforced sustainable construction material. **Materials Letters**, v. 209, p. 146–149, 2017. ISSN 0167-577X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X17311679>.

PAUL, S. C. *et al.* Fresh and hardened properties of 3d printable cementitious materials for building and construction. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, Springer London, London, v. 18, n. 1, p. 311–319, 2018. ISSN 1644-9665.

PILEGGI, R. Impressão 3d para concreto e suas aplicações. 2022. Disponível em: <https://digital.concreteshow.com.br/inovao/impresso-3d-para-concreto-e-suas-aplicacoes>.

- PUTTEN, J. V. D. *et al.* Microstructural characterization of 3d printed cementitious materials. **Materials**, v. 12, n. 18, 2019. ISSN 1996-1944. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/18/2993>.
- RAHUL, A. *et al.* Mechanical characterization of 3d printable concrete. **Construction building materials**, Elsevier Ltd, v. 227, p. 116710, 2019. ISSN 0950-0618.
- REITER, L. *et al.* The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 86–95, 2018. ISSN 0008-8846. SI : Digital concrete 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617312930>.
- REZENDE, L. C. S. H. **Comissão Permanente de Seleção de Projetos de Ciência, Tecnologia e Inovação da Fundação Araucária (CPSP)**. Fundação Araucária – Apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico do Paraná.: Chamada Pública 10/2020 - Programa de Pesquisa e Inovação em Desing., 2020. 118 p.
- RUBIN, A. P. **Influência da taxa de estruturação nas propriedades reológicas, físicas e mecânicas de concretos para impressão 3d (3dcp)**. Florianópolis, SC: Tese de Doutorado (UFSC), 2021. 266 p.
- SALMAN, N. M. *et al.* Importance and potential of cellulosic materials and derivatives in extrusion-based 3d concrete printing (3dcp): Prospects and challenges. **Construction and Building Materials**, v. 291, p. 123281, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821010412>.
- SANJAYAN, J. G. *et al.* Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3d printed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 468–475, 2018. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818307384>.
- SILVA, L. F. **Materiais cimentícios suplementares desenvolvidos com metacaulim e hpmc para impressão 3D: influência nos aspectos de extrudabilidade e construtibilidade**. Londrina, PR: Tese de Doutorado (UEL), 2023. Em andamento p.
- SILVA, M. D. L. da. **Desenvolvimento e validação de um protótipo de impressora 3D em escala de bancada visando aplicação na construção civil**. Maringá, PR: Dissertação de Mestrado (Unicesumar), 2021. 92 p.
- TANG, J. *et al.* Synergistic effect of metakaolin and limestone on the hydration properties of portland cementa. Elsevier Ltd, v. 223, p. 177–184, 2019. ISSN 0950-0618.
- VEIT, D. R. **Impactos da manufatura aditiva nos sistemas produtivos e suas repercussões nos critérios competitivos**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo., 2018. 348 p. Disponível em: http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/6927/Douglas\%20Rafael\%20Veit_.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- WINSUN. 2022. <http://www.winsun3d.com/En/>.
- WITZKE, F. B. **Propriedades de concretos estruturais contendo cinza volante em substituição parcial ao Cimento Portland**. Joinville, SC: Dissertação de Mestrado (UDESC), 2018. 108 p.
- WOLFS, R.; BOS, F.; SALET, T. Hardened properties of 3d printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. **Cement and Concrete Research**, v. 119, p. 132–140, 2019. ISSN 0008-8846. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884618310482>.

WU, P.; WANG, J.; WANG, X. A critical review of the use of 3-d printing in the construction industry. **Automation in Construction**, v. 68, p. 21–31, 2016. ISSN 0926-5805. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580516300681>.

WU, P.; WANG, J.; WANG, X. A critical review of the use of 3-d printing in the construction industry. **Automation in Construction**, v. 68, p. 21–31, 2016. ISSN 0926-5805. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580516300681>.

XU, J. *et al.* Volume-forming 3d concrete printing using a variable-size square nozzle. **Automation in Construction**, Elsevier, v. 104, p. 95–106, 2019.

ZAREIYAN, B.; KHOSHNEVIS, B. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3d printing of concrete. **Automation in Construction**, v. 83, p. 212–221, 2017. ISSN 0926-5805. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580516303703>.

ZHENG, W.; KWAN, A.; LEE, P. Direct tension test of concrete. **ACI materials journal**, Amer Concrete Inst, FARMINGTON HILLS, v. 98, n. 1, p. 63–71, 2001. ISSN 0889-325X.

APÊNDICES

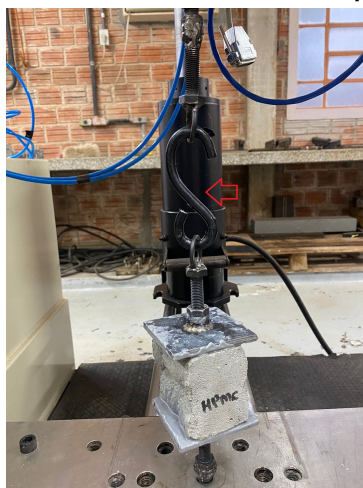
APÊNDICE A – ADAPTAÇÕES DO ENSAIO E TESTES

A primeira idade de realização dos ensaios foi planejada aos 21 dias, em que 12 corpos de prova foram preparados para serem submetidos à tração axial. A segunda idade se deu aos 126 dias, após adaptações feitas ao esquema de ensaio e as amostras, garantindo os resultados esperados.

Contudo, antes da efetiva realização do ensaio com as primeiras amostras, foram feitas algumas tentativas de adaptação à prensa de modo a garantir a melhor distribuição de tensões no eixo. Isto se deu porque após alguns ensaios, o dispositivo começou a apresentar falhas, descritas a seguir:

1. Deformação do arco "C"(IV), sendo substituído por um gancho metálico em "S" de maior seção transversal e que proporcionou melhor alinhamento ao esquema (Figura 129);

Figura 129 – Gancho metálico "S" com a amostra pronta para o ensaio



Fonte: Autoria própria (2023).

2. Rompimento do gancho metálico em "S", sendo substituído por um outro gancho de maior seção transversal e estabilidade Figura 130.

Figura 130 – Gancho metálico com a amostra pronta para o ensaio



Fonte: Aatoria própria (2023).

3. Falha na solda da porca sextavada da pastilha no momento do ensaio, fazendo com que o corpo de prova tivesse que ser removido antes do reforço (para que a solda não fragilizasse a superfície no momento da fusão), Figura 131;

Figura 131 – Falha na solda



Fonte: Aatoria própria (2023).

4. Rompimento da camada cerca de 1 mm abaixo da linha da cola sem alteração na interface, Figura 132.

Figura 132 – Rompimento logo após a cola



Fonte: Aatoria própria (2023).

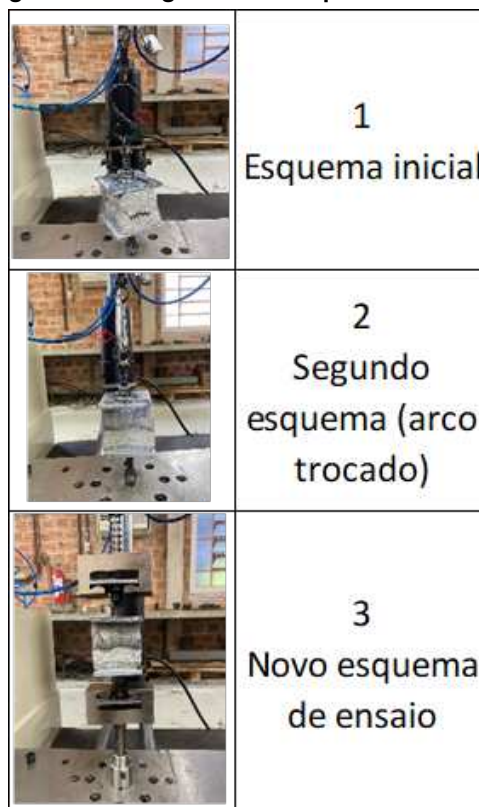
Também é possível observar a descrição dos problemas encontrados ao longo deste método e o número do esquema de ensaio indica em qual a amostra foi submetida, de acordo com a legenda da Figura 133.

Tabela 39 – Ensaio de tração direta para a aderência entre camadas

ENSAIO DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS						
MISTURAS	FORÇA DE TRAÇÃO (N)	ÁREA (mm ²)	RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA (Mpa)	IDADE (dias)	OBS	ESQUEMA DE ENSAIO
HPMC 1	4480	3800	1,179	21	Rompimento na primeira camada	1
HPMC 2	4241	3800	1,116	21	Rompimento na primeira camada	2
HPMC 3	5225	3800	1,375	21	Rompimento na segunda camada	3
HPMC 4	6764	3800	1,780	21	Rompimento na primeira camada	3
10 MC 1	3800	3496	1,087	21	Rompimento entre camadas	2
10 MC 2	3269	3648	0,896	21	Rompimento na primeira camada	1
10 MC 3	4437	3496	1,269	21	Rompimento entre camadas	2
30 MC 1	6705	4940	1,357	21	Rompimento na primeira camada	1
30 MC 2	196	4940	0,040	21	Rompimento na solda que fragilizou o material indo para o ensaio com leve fissura próximo a cola	3
30 MC 3	6725	4940	1,361	21	Rompimento na primeira camada	3

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 133 – Legenda dos esquemas de ensaio



Fonte: Autoria própria (2023).

A média das resistências obtidas está na Tabela 40, com os desvios-padrão correspondentes, considerando a área medida da superfície das amostras retificadas para a argamassa HPMC e 30MC e a área da interface entre as camadas, medida da argamassa de 10MC, única que rompeu na interface.

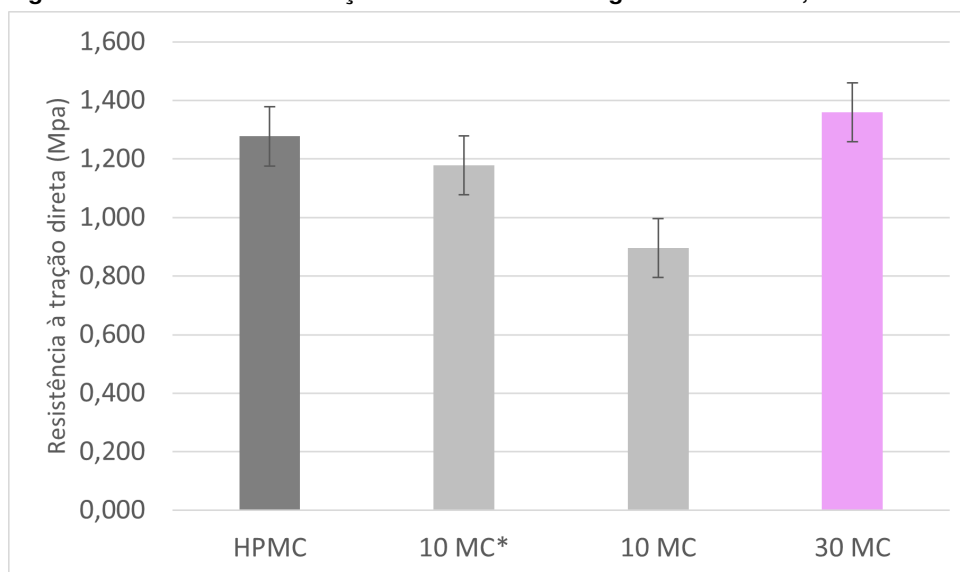
Tabela 40 – Média da resistência obtida no ensaio de tração direta

AMOSTRAS	MÉDIA DE RESISTÊNCIA DO ENSAIO (MPa)	DESVIO PADRÃO σ	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
HPMC	1,277	0,215	16,837
10 MC*	1,178	0,091	7,733
10 MC	0,896	0	0,000
30 MC	1,359	0,002	0,149

* Amostra com rompimento na interface

Fonte: Autoria própria (2023).

O gráfico da Figura 134 expressa estes valores médios encontrados, a argamassa HPMC contou com 4 determinações para a média, a 10MC* contou com 2 determinações, a 10MC teve apenas 1 e a 30MC teve 2 determinações.

Figura 134 – Resistência à tração direta média das argamassas HPMC, 10MC E 30MC.

* Amostra com rompimento na interface

Fonte: Autoria própria (2023).

Ressalta-se que 12 amostras seriam destinadas as idades iniciais, porém com os problemas encontrados e descritos no capítulo 3, uma delas (30MC) foi danificada com a falha da solda e duas (10MC) e (30MC) apresentaram a superfície irregular devido ao teste com a cola inicial, uma sendo destinada para testes posteriores e outra para o processo de retificação novamente para compor a segunda idade de ensaios, a amostra que teve a camada danificada foi descartada. Sendo assim 10 amostras foram analisadas nesta etapa, todas com o mesmo esquema de fixação na pastilha com a cola Tecbond MF conforme descrito.

Os resultados foram obtidos a partir da força máxima aplicada na amostra no momento da ruptura, porém, só foi possível obter o valor da resistência entre as camadas (como foi proposto nos métodos desta pesquisa), em duas amostras 10MC, com valor médio de 1,17 MPa.

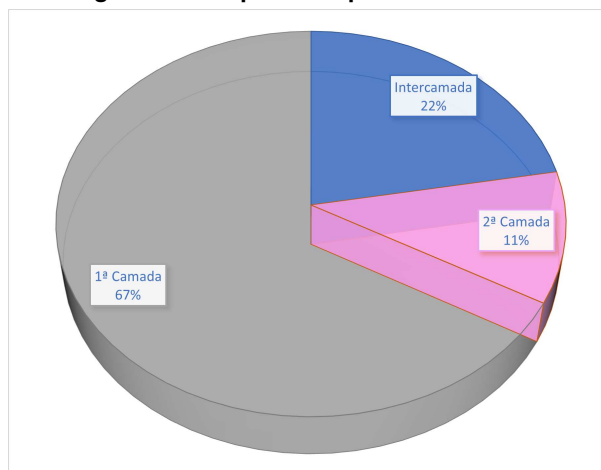
Este método, como citado anteriormente, foi adaptado dos estudos de Sanjayan *et al.* (2018) e Padilha (2020), que por meio de dispositivos semelhantes e cola epóxi nas duas faces da amostra, eram submetidos à um esforço de tração direta, com ruptura na interface mais frágil do elemento.

Sanjayan *et al.* (2018), obtiveram valores de 0,65 MPa em suas amostras impressas com intervalo de tempo de 10 minutos entre elas, e Padilha (2020) obteve como resultado médio 1,06 MPa em suas amostras impressas com o mesmo intervalo de tempo, que é o mais aproximado ao utilizado nesta pesquisa, com 4 minutos de intervalo de tempo de impressão entre uma camada e outra.

Os resultados das amostras HPMC e 30MC foram dados por meio da resistência entre a camada onde houve a ruptura, ocorrendo em 6 das amostras na 1ª camada impressa (que se posicionou na parte de baixo do equipamento) e 1 ocorrendo na 2ª camada impressa (ca-

mada que se posicionou na parte de cima do equipamento). O gráfico da Figura 135 traz as porcentagens de resultados diferentes obtidos.

Figura 135 – Tipos de ruptura encontradas



Fonte: A autoria própria (2023).

Portanto, a maioria das amostras teve o rompimento na camada que se posicionou na parte inferior do equipamento e 22% das amostras se comportaram como o esperado para este ensaio.

Nas Figuras 137, 138 e 139, é possível observar a interface da ruptura de cada uma das misturas, têm-se a imagem original e a ampliação da face indicada por meio de microscópio óptico em 7 vezes e a Figura 136 apresenta o resultado da amostra que teve a ruptura na entre as camadas.

Figura 136 – Rompimento na interface



Fonte: A autoria própria (2023).

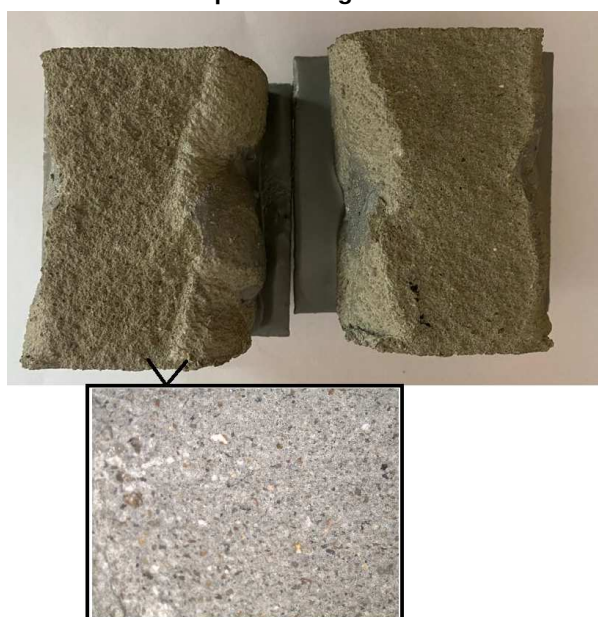
Figura 137 – Interface de ruptura da argamassa HPMC



Fonte: Autoria própria (2023).

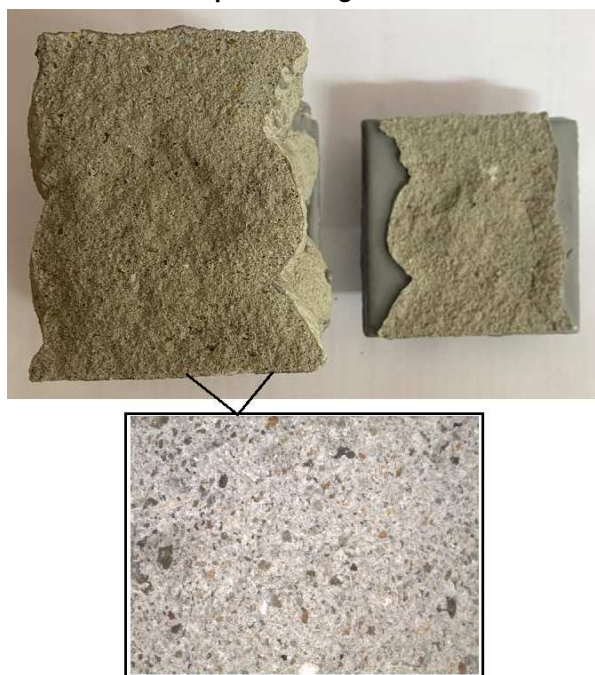
É possível observar a homogeneidade dos materiais na interface, sobretudo a da Figura 138 em que o rompimento se deu no meio da camada, assim como proposto, e este material também possui, de acordo com a Figura 138, elementos menores.

Figura 138 – Interface de ruptura da argamassa com 10% de metacaulim



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 139 – Interface de ruptura da argamassa com 30% de metacaulim



Fonte: Aatoria própria (2023).

De acordo com os resultados apresentados, é possível concluir que os valores das resistências obtidas apresentaram alguma variação entre as misturas, que pode ter sido influenciada pela mudança no esquema de ensaio, visto que dois esquemas distintos foram adotados para a mesma mistura. A geometria do material também pode ter influenciado, já que variou entre as três amostras e neste tipo de ensaio pode modificar a distribuição de tensão, portanto sem a padronização do esquema do ensaio e tamanho da amostra, a composição da mistura tem influência reduzida nesta propriedade.

Porém considerando que somente a argamassa 10MC teve ruptura na interface, pode-se supor que o ponto de ruptura do material da argamassa HPMC e 30MC (cerca de 2 mm após a linha da superfície) possui menor resistência do que a interface entre as duas camadas destes dois materiais, outro fato que indica isso, é que a resistência para o rompimento entre as camadas da argamassa 10MC* foi maior do que a que rompeu na linha próxima a superfície da 1ª camada, 10MC. Ma *et al.* (2020) também obteve este tipo de ruptura concluindo que os valores reais da tração intercamada podem ser maiores.

Com a análise das imagens nos respectivos locais de ruptura, pode-se concluir que a região interface da 10MC* teve uma menor quantidade de vazios quando comparada com a região do rompimento das misturas HPMC e 30MC, que pode ter ocorrido com o processo de impressão, sendo mais significativo na interface de 10MC* do que nas interfaces de HPMC e 30MC que não romperam.

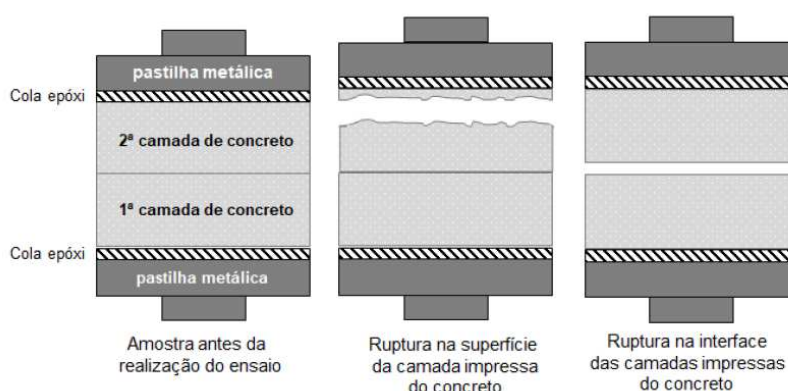
Geng *et al.* (2020) sugerem que a presença do (HPMC) na mistura otimiza os microporos do material, melhorando a estrutura destes, resultando em microfissuras finas e alongadas, o

que configura o aumento da aderência interface. Este fato poderá ser avaliado após o resultado do MEV aplicado ao encontro das camadas e aos locais de ruptura.

Ao analisar os demais materiais constituintes das misturas, têm-se que a amostra com maior substituição de metacaulim também apresentou maior resistência ao ser submetida aos ensaios de tração. Ma *et al.* (2020) também obteve maior resistência à tração (2,15) MPa com a amostra de maior índice de substituição mineral e maior relação água/cimentício (0,40), afirmando que estes valores atrelados a substituição mineral diminuem os efeitos de perda de água superficial por evaporação fazendo com que haja maior ligação entre as camadas e entre os componentes da mistura.

A Figura 140 mostra os tipos de rupturas que surgiram neste ensaio.

Figura 140 – Esquema ilustrativo da ocorrência das rupturas obtidas por meio do ensaio de resistência de aderência entre camadas pelo ensaio de tração



Fonte: Adaptado de Rubin (2021).

Por não existirem normas ou procedimentos padronizados para este tipo de ensaio de tração direta em elementos cimentícios impressos por impressão 3D, cada tentativa origina um método de ensaio e análise de resultados, indicando as falhas mais comuns e críticas. Diversas variáveis podem interferir, como o tipo de cola utilizada, o esquema de ensaio, geometria e componentes do material e idade.

Assim, procurou-se seguir os testes já existentes na literatura, porém estes mesmos também apontaram falhas e utilizaram outros tipos de misturas e variáveis como foco de análise. Pretende-se com estes resultados prévios fazer algumas alterações na geometria da amostra afim de obter mais rupturas como a desejada (no meio da amostra), medindo de fato a aderência entre as camadas.

A esse respeito, duas amostras retiradas das bordas do quadrado impresso foram cortadas para serem utilizadas como teste. Com a finalidade de uniformizar a distribuição de tensões no corpo de prova, estes foram cortados em cubos de aproximadamente 5,5 cm de aresta, de forma a deixar a ligação entre as camadas posicionada no meio do material.

Em um destes cubos foi feito ranhuras com aproximadamente 4 mm de profundidade para aumentar o volume de contato da cola e no outro foram feitos chanfros acompanhando a

linha da camada, semelhantes aos corpos de prova de Sanjayan *et al.* (2018), com a finalidade de direcionar a ruptura para o local desejado.

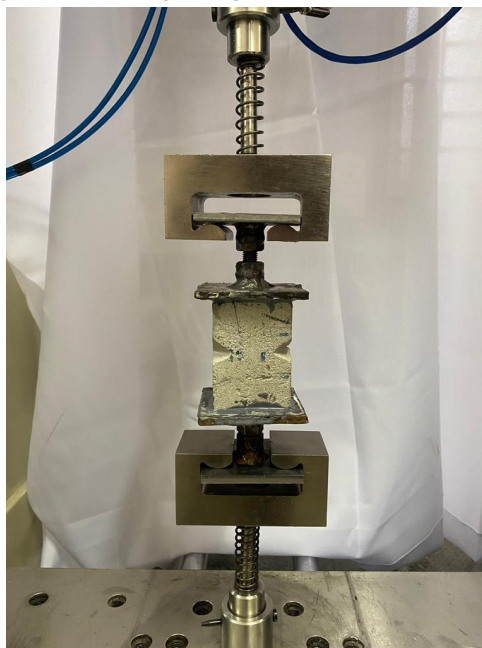
A Figura 141, mostra as adaptações feitas no corpos de prova com a ranhura, e a Figura 142 o corpo de prova pronto para o ensaio com o chanfro.

Figura 141 – Corpo de prova cúbico com ranhuras



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 142 – Corpo de prova cúbico com chanfro



Fonte: Autoria própria (2023).

Ressalta-se que o método de colagem foi o mesmo descrito em 3 e que os corpos de prova foram ensaiados após 56 dias de sua produção.

Os resultados obtidos com o teste estão apresentados na Figura 143 para a amostra com a ranhura e na Figura 144 para a amostra com o chanfro.

Figura 143 – Ruptura com o método da ranhura



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 144 – Ruptura com o método do chanfro



Fonte: Autoria própria (2023).

Os valores de resistência à tração a partir da ruptura foi de 2,26 MPa para o caso da falha próxima à pastilha e de 1,32 MPa para o caso de ruptura no meio da amostra.

De fato a diminuição da amostra propiciou uma melhora nos valores de resistência à tração, Noo e Wou (1989), que analisaram 80 corpos de prova de grandes dimensões

(45x45x360cm) e 80 corpos de prova pequenos (10x10x55cm) de concreto fundido, obtiveram cerca de 63% de ganho de resistência para este último grupo.

A indução à ruptura por meio da abertura de chanfros, assim como Sanjayan *et al.* (2018) pode mitigar o efeito de concentração de tensão que pode ter se formado entre o aço e o concreto, enfraquecendo essa região próxima a pastilha de topo e base, onde se deu a maior parte da ruptura.

A redução dos corpos de prova melhora o alinhamento deste com o esquema de ensaio diminuindo a excentricidade e concentrações de tensão não desejadas. Porém, o tipo de ruptura obtida no ensaio do segundo corpo de prova, indica que o material se fundiu ao longo do comprimento da camada e que o chanfro, por não estar alinhado, já que a linha da camada se deslocou ao longo do comprimento material, fez com que a ruptura respondesse a uma torção.

Portanto, a abertura de chanfros alinhados ao centro de carga da peça pode ser a ideal solução para a obtenção da resistência de fato no meio da camada, de forma a deslocar as tensões geradas para a interface.

A propriedade de resistência de aderência entre as camadas de um material cimentício impresso é uma propriedade de extrema importância, uma vez que é na interface que podem ocorrer falhas de contato de diversas origens, desde o tipo de material, relação a/c, dosagem, até o próprio processo de extrusão, o que pode acarretar em concentração de tensões, deformações excessivas comprometendo a qualidade e durabilidade da obra.

**APÊNDICE B – ÁREAS OBTIDAS PELO SOFTWARE IMAGE J E MEDIDAS UTILIZADAS
PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO E ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS**

Tabela 41 – Áreas para as amostras moldadas e ensaiadas aos 21 dias pelo Image J

MISTURAS	ÁREA (mm^2)
HPMC 1	4033
HPMC 2	4805
10 MC 2	4130
10 MC 3	4695
30 MC 1	4755
30 MC 2	3966

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 42 – Áreas para as amostras moldadas e ensaiadas aos 63 dias pelo Image J

MISTURAS	ÁREA (mm^2)
HPMC 1	4000
HPMC 2	4857
HPMC 3	4805
10 MC 1	4002
10 MC 2	4050
10 MC 3	4534
30 MC 1	4755
30 MC 2	4341
30 MC 3	3960

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 43 – Áreas para as amostras em duas camadas e ensaiadas aos 63 dias pelo Image J

MISTURAS	ÁREA (mm^2)
HPMC 1	2328
HPMC 2	3162
HPMC 3	3113
10 MC 1	3130
10 MC 2	3861
10 MC 3	3331
30 MC 1	4013
30 MC 2	4126
30 MC 3	4273

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 44 – Medidas para o cálculo de resistência de tração na flexão para amostras moldadas

AMOSTRAS	b (mm)	h (mm)	L (mm)
HPMC 1	61	98	160
10 MC	63	95	160
30 MC	80	95	160

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 45 – Áreas para as amostras do ensaio de aderência entre camadas após a metodologia de corte

MISTURAS	ÁREA (mm ²)
HPMC 1	2200
HPMC 2	2035
HPMC 3	1320
10 MC 1	2200
10 MC 2	1815
10 MC 3	1815
30 MC 1	3025
30 MC 2	2200
30 MC 3	2200

Fonte: Autoria própria (2023).