

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA, ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL

**Contribuição para a dosagem de argamassas
sustentáveis para impressão 3D: uso de fíler
calcário**

Douglas Antunes Mota

GOIÂNIA
2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☒ Dissertação ☐ Tese ☐ Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Douglas Antunes Mota

3. Título do trabalho

Contribuição para a dosagem de argamassas sustentáveis para impressão 3D: uso de fíler calcário.

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Helena Carasek Cascudo, Professor do Magistério Superior**, em 17/05/2026, às 10:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Douglas Antunes Mota, Discente**, em 19/05/2026, às 17:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6162124** e o código CRC **2C86F663**.

Douglas Antunes Mota

Contribuição para a dosagem de argamassas sustentáveis para impressão 3D: uso de fíler calcário

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Helena Carasek

GOIÂNIA
2026

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

Mota, Douglas Antunes
Contribuição para a dosagem de argamassas sustentáveis para
impressão 3D: [manuscrito]: uso de fíler calcário / Douglas Antunes Mota. - 2026.
203 f.: 2026

Orientadora: Prof(a). Dra. Helena Carasek
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2026.
Apêndice.
Bibliografia.
Inclui: lista de figuras, lista de tabelas.

1. Impressão 3D. 2. 3DCP. 3. Fíler Calcário. 4. Sustentabilidade. 5.
Dosagem.

I. Carasek, Helena, orient. II. Título.

CDU 624



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata Nº **322/2026** da sessão de Defesa de dissertação de **Douglas Antunes Mota** que confere o título de Mestre em **Geotecnia, Estruturas e Construção Civil**, na área de concentração em **Construção Civil**.

Aos **trinta dias do mês de abril de dois mil e vinte e seis**, a partir das **16:00h**, de forma remota, pelo **link: meet.google.com/teb-tvhr-zti**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação de Mestrado intitulada **“Contribuição para a dosagem de argamassas sustentáveis para impressão 3D: uso de filer calcário”**. Os trabalhos foram instalados pela Professora Doutora **Helena Carasek Cascudo (EECA/UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Renato Resende Angelim (EECA/UFG)**, membro titular interno; Professor Doutor **Renato Costa Araújo (Instituto Federal de Goiás - IFG)**. Durante a arguição, os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato aprovado pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora Helena Carasek Cascudo, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **trinta dias do mês de abril de dois mil e vinte e seis**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Helena Carasek Cascudo, Professor do Magistério Superior**, em 01/05/2026, às 09:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renato Resende Angelim, Professor do Magistério Superior**, em 01/05/2026, às 09:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Douglas Antunes Mota, Discente**, em 01/05/2026, às 09:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renato Costa Araújo, Usuário Externo**, em 01/05/2026, às 10:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6162236** e o código CRC **086F231C**.

Referência: Processo nº 23070.015104/2026-38

SEI nº 6162236

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro concedido por meio da bolsa, que me permitiu dedicar tempo e energia aos estudos e à pesquisa.

Registro meu agradecimento ao Labiteccc pela infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa.

Agradeço também à empresa Votorantim Cimentos pela gentil doação do cimento utilizado nesta pesquisa, e à empresa Realmix Concreto pela doação da sílica ativa.

Registro também meus agradecimentos ao Laboratório de Geotecnia (LABGEO / EECA / UFG) pelo suporte na realização do ensaio de granulometria a laser.

Por fim, deixo meu agradecimento a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A impressão 3D com materiais cimentícios tem se consolidado como uma tecnologia promissora na construção civil, destacando-se pelo potencial de redução de desperdícios, racionalização de processos e ampliação da liberdade geométrica. Entretanto, ainda enfrenta desafios relacionados ao desenvolvimento de argamassas que conciliem capacidade de extrusão, estabilidade dimensional, desempenho mecânico e sustentabilidade, especialmente em função do elevado consumo de cimento. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo contribuir para a dosagem de argamassas sustentáveis destinadas à impressão 3D, por meio da incorporação de fíler calcário como material fino plastificante, visando à redução do consumo de cimento sem comprometer o desempenho técnico. Especificamente, buscou-se: validar experimentalmente um método de dosagem para argamassas extrudáveis; avaliar a influência do teor de fíler calcário e da fração de areia na estrutura volumétrica e nas propriedades nos estados fresco e endurecido; comparar o desempenho e as diferenças decorrentes da incorporação de fíleres calcários e dolomíticos; investigar os efeitos do aumento progressivo do teor de fíler em composições otimizadas; e, por fim, refinar traços tecnicamente viáveis para aplicação em impressão 3D. A metodologia foi estruturada em quatro etapas experimentais sequenciais. Na Etapa 1, foram desenvolvidas formulações iniciais com base no método de dosagem de Selmo (1989), adaptado às exigências da manufatura aditiva. Na Etapa 2, procedeu-se à validação das composições por meio de ensaios mecânicos e análise da estabilidade dimensional. Na Etapa 3, investigou-se a influência do teor de fíler calcário sobre as propriedades da mistura. Na etapa 4, realizou-se a otimização das misturas, com avaliação integrada nos estados fresco e endurecido. Os resultados demonstraram que as misturas apresentaram comportamento adequado à extrusão e estabilidade geométrica compatível com a deposição sucessiva de camadas. Em termos mecânicos, observou-se evolução significativa das resistências ao longo do tempo, tendo atingido valores de resistência à tração na flexão de até 11,74 MPa e resistência à compressão de até 39,2 MPa aos 28 dias nas composições otimizadas. O aumento do teor de fíler calcário promoveu melhorias no comportamento e na coesão das misturas, contribuindo para a estabilidade das camadas e para a redução de defeitos, como segregação e exsudação. Por outro lado, verificou-se redução da resistência mecânica com o aumento do teor de fíler, variando conforme o tipo de calcário e a fração de agregados. De modo geral, a incorporação de finos favoreceu o empacotamento de partículas e a retenção de água, melhorando o desempenho global das argamassas. Conclui-se que a metodologia proposta é eficaz para o desenvolvimento de argamassas destinadas à impressão 3D, permitindo o controle das propriedades nos estados fresco e endurecido. A utilização de fíler calcário mostrou-se tecnicamente viável, contribuindo para o desempenho das misturas e para a redução do consumo de cimento, configurando-se como uma alternativa promissora para aplicações em manufatura aditiva na construção civil.

Palavras-chave: Impressão 3D; 3DCP; Fíler calcário; Sustentabilidade; Dosagem.

ABSTRACT

3D printing with cementitious materials has been established as a promising technology in the construction industry, standing out for its potential to reduce waste, streamline processes, and expand geometric freedom. However, challenges still remain regarding the development of mortars capable of combining extrudability, dimensional stability, mechanical performance, and sustainability, especially due to the high cement consumption involved. In this context, this study aimed to contribute to the mix design of sustainable mortars for 3D printing through the incorporation of limestone filler as a fine plasticizing material, seeking to reduce cement consumption without compromising technical performance. Specifically, the objectives were to: experimentally validate a mix design method for extrudable mortars; evaluate the influence of limestone filler content and sand fraction on the volumetric structure and properties in both fresh and hardened states; compare the performance and differences resulting from the incorporation of calcitic and dolomitic fillers; investigate the effects of progressively increasing filler content in optimized compositions; and, finally, refine technically viable mixtures for 3D printing applications. The methodology was structured into four sequential experimental stages. In Stage 1, initial formulations were developed based on the mix design method proposed by Selmo (1989), adapted to the requirements of additive manufacturing. In Stage 2, the compositions were validated through mechanical testing and dimensional stability analysis. In Stage 3, the influence of limestone filler content on the properties of the mixtures was investigated. In Stage 4, the mixtures were optimized through an integrated evaluation of both fresh and hardened states. The results demonstrated that the mixtures exhibited suitable extrusion behavior and geometric stability compatible with the successive deposition of layers. In terms of mechanical performance, a significant increase in strength over time was observed, reaching flexural tensile strengths of up to 11.74 MPa and compressive strengths of up to 39.2 MPa at 28 days in the optimized compositions. Increasing the limestone filler content improved the behavior and cohesion of the mixtures, contributing to layer stability and reducing defects such as segregation and bleeding. On the other hand, a reduction in mechanical strength was observed with increasing filler content, varying according to the limestone type and aggregate fraction. Overall, the incorporation of fine materials enhanced particle packing and water retention, improving the overall performance of the mortars. It can be concluded that the proposed methodology is effective for the development of mortars for 3D printing, allowing control of properties in both fresh and hardened states. The use of limestone filler proved to be technically feasible, contributing to the performance of the mixtures and to the reduction of cement consumption, thus representing a promising alternative for additive manufacturing applications in the construction industry.

Keywords: 3D printing; 3DCP; limestone filler; sustainability; mix design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Uso da técnica de <i>Contour Crafting</i> na construção civil.....	30
Figura 2 - Impressão em <i>concrete printing</i>	30
Figura 3 - Tecnologia de Impressão 3D D-Shape	31
Figura 4 - Ponte em 3DCP instalada na ciclovía Lieve Vrouwensteeg, na vila de Gemert, na Holanda	35
Figura 5 - (a) Vista frontal da Casa Apis Cor na Rússia; (b) Processo de <i>Contour Crafting</i> na Casa Apis Cor.....	36
Figura 6 - Maior ponte em 3DCP do mundo, Xangai, China	36
Figura 7 - Casa Zero da empresa ICON com escritório Lake Flato, Austin, Texas.....	37
Figura 8 - Casa modelo Wolf Ranch, Georgetown, Texas.	37
Figura 9 - Casa em 3DCP executada pela Citizen Robotics, Detroit, Michigan	38
Figura 10 - Tecla House, Massa Lombarda, Itália	38
Figura 11 - Projeto Milestone, Eindhoven, Holanda.....	39
Figura 12 - Primeira casa modelo impressa em 3D no Brasil.....	40
Figura 13 - Fundação de linha de transmissão impressa por 3DCP	40
Figura 14 - Configuração experimental para monitorar deformações e falhas durante o processo de impressão.....	53
Figura 15 - Alteração na geometria do filamento extrudado conforme variação do tempo ..	55
Figura 16 - Avaliação da variação de largura e índice de altura das argamassas	56
Figura 17 - Distribuição dos estudos por tipo de material cimentício suplementar (MCS) ...	59
Figura 18 - (a) Distribuição dos estudos por número de ligantes; e (b) classificação das misturas por composição.....	61
Figura 19 - Relação dos principais agregados utilizados nas misturas	62
Figura 20 – Tipos de fibras utilizadas nas misturas 3D	63
Figura 21 - Relação dos principais aditivos utilizados nas misturas.....	64
Figura 22 - Distribuição das relações água/ligante (a) e ligante/agregado (b) nas misturas levantadas	66
Figura 23 - Distribuição do espalhamento das argamassas em relação à faixa de referência proposta por Skibicki <i>et al.</i> (2024) e Zhang <i>et al.</i> (2019b).....	67

Figura 24 - Materiais constituintes da argamassa	72
Figura 25 - Curva de distribuição granulométrica da areia	74
Figura 26 - Distribuição do material retido em cada peneira no ensaio de granulometria da areia utilizada.....	75
Figura 27 - Imagens dos grãos de areia obtidas com lupa estereoscópica: (a) 6x; (b) 32x de ampliação	76
Figura 28 - Curva de distribuição granulométrica dos calcários	77
Figura 29 - Distribuição do material retido em cada peneira no ensaio de granulometria do calcário calcítico	78
Figura 30 - Distribuição do material retido em cada peneira no ensaio de granulometria do calcário dolomítico	78
Figura 31 - Distribuição granulométrica obtida por difração a laser: (a) calcário calcítico; (b) calcário dolomítico	80
Figura 32 - Imagens de lupa estereoscópica dos grãos de calcário: (a, b) calcário calcítico com ampliações de 6x e 32x; (c, d) calcário dolomítico com as mesmas ampliações.....	81
Figura 33 - Equipamento utilizado nos testes de extrusão: (a) pistola aplicadora Makita DCG180RMEB; (b) bico adaptado com seção retangular (10 × 30 mm)	84
Figura 34 - Avaliação visual da capacidade de extrusão da argamassa: (a) Filamento com falhas de coesão, considerado não aceitável; (b) Filamento contínuo e estável, aceito como satisfatório para impressão.....	85
Figura 35 - Empilhamento de camadas de argamassa para verificação de estabilidade.....	85
Figura 36 - Composição das argamassas da Etapa Experimental 1 no estado fresco	89
Figura 37 - Composição das argamassas da Etapa Experimental 1 no estado endurecido	90
Figura 38 - Composição percentual por fase das misturas da Etapa Experimental 1	90
Figura 39 - Filamentos extrudados das misturas finais da Etapa Experimental 1	91
Figura 40 - Densidade no estado fresco das misturas da Etapa Experimental 1	93
Figura 41 – Teor de ar incorporado nas das misturas da Etapa Experimental 1	93
Figura 42 - Índice de consistência das misturas da Etapa Experimental 1	94
Figura 43 - Resistência à compressão aos 14 dias da Etapa Experimental 1.....	95
Figura 44 - Curvas de resistência à compressão em função do parâmetro E.....	96
Figura 45 - Relação entre a quantidade de calcário e areia	97
Figura 46 - Aproximação linear da relação água/cimento em função do parâmetro E	98

Figura 47 - Evolução da variação percentual do comprimento das amostras da Etapa Experimental 2.....	101
Figura 48 - Variação linear das misturas da Etapa Experimental 2 aos 28 dias em função do fator H.....	102
Figura 49 - Evolução da variação percentual de massa das amostras da Etapa Experimental 2.....	103
Figura 50 – Perda de massa das misturas da Etapa Experimental 2 aos 28 dias em função do fator H.....	103
Figura 51 - Evolução da resistência à tração na flexão das misturas da Etapa Experimental 2	104
Figura 52 - Resistência à flexão da Etapa Experimental 2 aos 28 dias em função do fator H	105
Figura 53 - Evolução da resistência à compressão das misturas da Etapa Experimental 2	106
Figura 54 - Resistência à compressão da Etapa Experimental 2 aos 28 dias em função do fator H.....	106
Figura 55 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas da Etapa Experimental 2 ..	107
Figura 56 - Ganho relativo do módulo de elasticidade das misturas da Etapa Experimental 2	108
Figura 57 - Módulo de elasticidade da Etapa Experimental 2 aos 28 dias em função do fator H	109
Figura 58 - Filamentos extrudados na Etapa Experimental 3.....	113
Figura 59 - Composição das argamassas na Etapa Experimental 3 no estado fresco	113
Figura 60 - Composição das argamassas na Etapa Experimental 3 no estado endurecido.....	114
Figura 61 - Composição percentual por fase das argamassas da Etapa Experimental 3 ...	114
Figura 62 - Comparação da densidade no estado fresco das misturas das Etapas Experimentais 2 e 3.....	116
Figura 63 - Relação entre a densidade e o fator E	117
Figura 64 - Comparação dos teores de ar incorporado das misturas das Etapas Experimentais 2 e 3.....	118
Figura 65 - Comparação do índice de consistência das misturas das Etapas Experimentais 2 e 3.....	119
Figura 66 - Correlação entre índice de consistência e o parâmetro E.....	120
Figura 67 - Evolução da variação linear das misturas na Etapa Experimental 3.....	122

Figura 68 - Análise comparativa da variação linear aos 28 dias entre as Etapas Experimentais 2 e 3.....	123
Figura 69 - Variação de massa das misturas na Etapa Experimental 3	123
Figura 70 - Perda de massa das misturas da Etapa Experimental 3 aos 28 dias em função do fator H.....	124
Figura 71 - Comparação da variação de massa aos 28 dias entre as Etapas Experimentais 2 e 3.....	124
Figura 72 - Evolução da resistência à flexão das misturas da Etapa Experimental 3	125
Figura 73 - Resistência à flexão da Etapa Experimental 3 aos 28 dias em função do fator H	126
Figura 74 - Comparação da resistência à flexão aos 28 dias entre misturas das Etapas Experimentais 2 e 3	127
Figura 75 - Correlação entre a resistência à flexão e o volume de poros teóricos calculados	128
Figura 76 - Evolução da resistência à compressão das misturas da Etapa Experimental 3	128
Figura 77 - Resistência à compressão da Etapa Experimental 3 aos 28 dias em função do fator H.....	129
Figura 78 - Comparação da resistência à compressão aos 28 dias entre as Etapas Experimentais 2 e 3	129
Figura 79 - Correlação entre a resistência à compressão e o volume de poros teóricos calculados.....	130
Figura 80 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas da Etapa Experimental 3 ..	131
Figura 81 - Módulo de elasticidade da Etapa Experimental 3 aos 28 dias em função do fator H	131
Figura 82 - Comparação do módulo de elasticidade aos 28 dias entre as Etapas Experimentais 2 e 3	132
Figura 83 - Avaliação da estabilidade geométrica de filamentos extrudados	136
Figura 84 - Densidade no estado fresco e densidade teórica das misturas avaliadas	138
Figura 85 - Influência do teor de superplastificante na densidade das misturas	139
Figura 86 - Teor de ar incorporado no estado fresco das misturas da Etapa Experimental 4	141
Figura 87 - Relação do teor de superplastificante com o teor de ar incorporado	141
Figura 88 - Espalhamento das misturas da Etapa Experimental 4	143
Figura 89 - Relação entre superplastificante e espalhamento.....	143

Figura 90 - Registros fotográficos do ensaio de espalhamento das misturas de referência e das misturas com maior teor de superplastificante	144
Figura 91 - Variação linear das misturas de referência da Etapa Experimental 4	146
Figura 92 - Variação linear das misturas M0,6 e M0,6-SA	147
Figura 93 - Variação linear das misturas M0,55 e M0,55-SA	147
Figura 94 - Comparação da variação de linear das misturas da Etapa Experimental 4 aos 28 dias	148
Figura 95 - Evolução da variação de massa das misturas de referência da Etapa Experimental 4.....	149
Figura 96 - Relação entre teor de superplastificante e perda de massa na Etapa Experimental 4.....	149
Figura 97 - Evolução da variação de massa das misturas M0,6 e M0,6-SA	150
Figura 98 - Evolução da variação de massa das misturas M0,55 e M0,55-SA	151
Figura 99 - Comparação da variação de massa das misturas da Etapa Experimental 4 aos 28 dias	151
Figura 100 - Comparação gráfica da evolução da resistência à compressão das misturas aos 14 e 28 dias	152
Figura 101 - Relação entre o teor de superplastificante e a resistência à flexão aos 28 dias	153
Figura 102 - Comparação gráfica da evolução da resistência à compressão das misturas aos 14 e 28 dias	154
Figura 103 - Relação entre teor de superplastificante e resistência à compressão aos 28 dias	155
Figura 104 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas de referência.....	157
Figura 105 - Relação entre o teor de superplastificante e o módulo de elasticidade aos 28 dias	157
Figura 106 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas do grupo M0,6 e M0,6-SA	158
Figura 107 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas do grupo M0,55	158
Figura 108 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas do grupo M0,5-SA em função do teor de superplastificante.....	159
Figura 109 - Comparação do módulo de elasticidade aos 28 dias para as misturas da Etapa Experimental 4.....	159
Figura 110 - Filamentos extrudados e ensaio de empilhamento das misturas com relação $a/l = 0,6$	160

Figura 111 - Filamentos extrudados e ensaio de empilhamento das misturas M0,6 com 10% de sílica ativa	161
Figura 112 - Filamentos extrudados e ensaio de empilhamento das misturas com relação $a/l = 0,55$	162
Figura 113 - Filamentos extrudados e ensaio de empilhamento das misturas M0,55 com 10% de sílica ativa	162
Figura 114 - Filamentos extrudados e ensaio de empilhamento das misturas com relação $a/l = 0,5$	163
Figura 115 - Comparação entre variação da altura e largura para as misturas extrudadas com pistola	164
Figura 116 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,6-REF: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte	164
Figura 117 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,6-SP2,75: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte	165
Figura 118 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,6-SP3: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte	165
Figura 119 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,6-REF-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte	166
Figura 120 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,6-SP2,5-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte	166
Figura 121 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,6-SP2,75-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte	167
Figura 122 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,55-SP3,5: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte	167
Figura 123 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,55-SP3,75: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte	168
Figura 124 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,55-REF-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte	168
Figura 125 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,55-SP3,5-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte	169
Figura 126 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,55-SP3,75-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte	169
Figura 127 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,5-SP4-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte	170

Figura 128 - Distribuição de publicações nas bases de dados - não aderentes, duplicatas e aderentes.....	195
Figura 129 - Distribuição das publicações selecionadas nos 10 principais periódicos.....	196
Figura 130 - Evolução anual das publicações sobre misturas cimentícias para impressão 3D	197
Figura 131 - (a) Distribuição dos primeiros autores por número de publicações; (b) Percentagem de Publicações com Base no Número de Autores	198
Figura 132 - Principais instituições por número de publicações.....	199
Figura 133 - Publicações totais e participações de instituições por país.....	199
Figura 134 - distribuição e frequência das principais palavras-chave encontradas nos estudos	200
Figura 135 - Registros fotográficos do ensaio de espalhamento das misturas com relação $a/l = 0,60$, antes e após as 30 pancadas, para sistemas com 5% e 10% de sílica ativa	201
Figura 136 - Registros fotográficos do ensaio de espalhamento das misturas com relação $a/l = 0,55$, antes e após as 30 pancadas, para sistemas com 5% e 10% de sílica ativa	202
Figura 137 - Registros fotográficos do ensaio de espalhamento das misturas com relação $a/l = 0,50$, antes e após as 30 pancadas.....	203

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Técnicas de manufatura aditiva e materiais utilizados 29

Quadro 2 - Relação de materiais cimentícios suplementares levantados e respectivos autores
..... 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição granulométrica da areia: porcentagem de material retido em cada peneira.....	74
Tabela 2 - Dados de caracterização da areia.....	75
Tabela 3 - Distribuição granulométrica do calcário calcítico: porcentagem de material retido em cada peneira.....	77
Tabela 4 - Distribuição granulométrica do calcário dolomítico: porcentagem de material retido em cada peneira.....	77
Tabela 5 - Dados de caracterização dos fíleres calcários.....	79
Tabela 6 - Diâmetros característicos obtidos por difração a laser para os materiais estudados.....	80
Tabela 7 - Composição inicial das misturas estudadas.....	87
Tabela 8 - Composições das argamassas testadas na Etapa Experimental 1.....	89
Tabela 9 - Resultados dos no estado fresco das misturas da Etapa Experimental 1.....	92
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 14 dias da Etapa Experimental 1.....	94
Tabela 11 - Variação do comprimento (mm/m) dos corpos de prova da Etapa Experimental 2.....	101
Tabela 12 - Variação percentual de massa dos corpos de prova da Etapa Experimental 2.....	102
Tabela 13 - Resistência à tração na flexão das misturas da Etapa Experimental 2.....	104
Tabela 14 - Resistência à compressão das misturas da Etapa Experimental 2.....	105
Tabela 15 - Módulo de Elasticidade das misturas da Etapa Experimental 2.....	107
Tabela 16 - Composições das argamassas testadas na Etapa Experimental 3.....	112
Tabela 17 - Variação percentual das frações volumétricas das fases constituintes das argamassas da Etapa Experimental 3 em relação as Etapas Experimentais 1 e 2.....	115
Tabela 18 - Resultados dos no estado fresco das misturas da Etapa Experimental 3.....	116
Tabela 19 - Variação do comprimento (mm/m) dos corpos de prova da Etapa Experimental 3.....	121
Tabela 20 - Variação percentual de massa dos corpos de prova da Etapa Experimental 3.....	123
Tabela 21 - Resultados de resistência à flexão das misturas da Etapa Experimental 3.....	125
Tabela 22 - Variação percentual da resistência à flexão aos 28 dias entre as Etapas Experimentais 2 e 3.....	126

Tabela 23 - Resultados de resistência à compressão das misturas da Etapa Experimental 3	128
Tabela 24 - Variação percentual da resistência à compressão entre as Etapas Experimentais 2 e 3.....	129
Tabela 25 - Valores do módulo de elasticidade das misturas da Etapa Experimental 3	131
Tabela 26 - Variação percentual do módulo de elasticidade em relação a Etapa Experimental 2.....	132
Tabela 27 - Parâmetros de dosagem e ajustes da Etapa Experimental 4	136
Tabela 28 - Densidade no estado fresco experimental e densidade teórica das misturas avaliadas.....	137
Tabela 29 - Teor de ar incorporado das misturas da Etapa Experimental 4.....	140
Tabela 30 - Valores de espalhamento das misturas da Etapa Experimental 4	142
Tabela 31 - Variação do comprimento (mm/m) dos corpos de prova a Etapa Experimental 4	145
Tabela 32 - Variação de percentual massa das misturas da Etapa Experimental 4	148
Tabela 33 - Resistência à tração das misturas da Etapa Experimental 4	152
Tabela 34 - Resistência à compressão (MPa) das misturas da Etapa Experimental 4.....	154
Tabela 35 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas da Etapa Experimental 4 ..	156
Tabela 36 - Variação dimensional da largura da primeira camada e da altura total dos corpos de prova impressos em relação às dimensões teóricas.....	163
Tabela 37 - Quantidade de publicações identificadas em cada base de dados	195

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	23
CAPÍTULO 2 AVANÇOS E DESAFIOS DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL ...	28
CAPÍTULO 3 CASOS PRÁTICOS DE IMPRESSÃO 3D PELO MUNDO	35
CAPÍTULO 4 SUSTENTABILIDADE NA IMPRESSÃO 3D	42
CAPÍTULO 5 A UTILIZAÇÃO DE FÍLER CALCÁRIO EM CONCRETOS E ARGAMASSAS 47	
CAPÍTULO 6 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS PARA IMPRESSÃO 3D.....	50
6.1 CAPACIDADE DE IMPRESSÃO.....	51
6.2 CAPACIDADE DE CONSTRUÇÃO	52
6.3 TEMPO ABERTO.....	54
6.4 FATOR DE RETENÇÃO DE FORMA	55
6.5 CONTROLE DE RETRAÇÃO	56
6.6 RESISTÊNCIA MECÂNICA	57
CAPÍTULO 7 ARGAMASSAS PARA 3DCP - UMA REVISÃO SISTEMÁTICA	59
7.1 ANÁLISE DOS LIGANTES	59
7.2 ANÁLISE DOS AGREGADOS E FIBRAS.....	62
7.3 ANÁLISE DOS ADITIVOS	64
7.4 ANÁLISE DAS MISTURAS.....	66
7.5 CONCLUSÕES SOBRE A RSL	70
CAPÍTULO 8 MATERIAIS E ESTRUTURA GERAL DA METODOLOGIA.....	72
8.1 MATERIAIS	72
8.2 ESTRUTURA GERAL DA METODOLOGIA.....	82
8.2.1 Procedimento de preparo das misturas	83
8.2.2 Avaliação da capacidade de extrusão e estabilidade geométrica	84
8.2.3 Caracterização das misturas no estado fresco.....	85
8.2.4 Caracterização das misturas no estado endurecido	86

CAPÍTULO 9 ETAPA EXPERIMENTAL 1: FORMULAÇÃO BÁSICA E AJUSTES INICIAIS **87**

9.1	RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 1	88
9.1.1	Definição dos traços e caracterização inicial das misturas	88
9.1.2	Comportamento no estado fresco e capacidade de extrusão	91
9.1.3	Desempenho no estado endurecido: resistência à compressão	94
9.1.4	Análises de correlação e relações empíricas de dosagem	95
9.2	SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 1	98

CAPÍTULO 10 ETAPA EXPERIMENTAL 2: VALIDAÇÃO FUNCIONAL..... 100

10.1	RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 2	100
10.1.1	Variação dimensional e variação de massa	100
10.1.2	Resistência à tração na flexão	104
10.1.3	Resistência à compressão	105
10.1.4	Evolução do módulo de elasticidade	107
10.2	SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 2	109

CAPÍTULO 11 ETAPA EXPERIMENTAL 3: PLASTIFICAÇÃO POR ALTO TEOR DE FÍLER **111**

11.1	RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 3	112
11.1.1	Definição dos traços, ajustes de dosagem e estrutura volumétrica	112
11.1.2	Comportamento no estado fresco	115
11.1.3	Desempenho no estado endurecido: estabilidade dimensional	121
11.1.4	Desempenho no estado endurecido: resistência à flexão	125
11.1.5	Desempenho no estado endurecido: resistência à compressão	128
11.1.6	Desempenho no estado endurecido: módulo de elasticidade	131
11.2	SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 3	133

CAPÍTULO 12 ETAPA EXPERIMENTAL 4: OTIMIZAÇÃO FINAL 135

12.1	RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 4	136
12.1.1	Comportamento no estado fresco: densidade	137
12.1.2	Comportamento no estado fresco: teor de ar incorporado	140

12.1.3	Comportamento no estado fresco: índice de consistência	142
12.1.4	Variação de massa e retração	145
12.1.5	Comportamento no estado endurecido: resistência à flexão e compressão	152
12.1.6	Comportamento no estado endurecido: módulo de elasticidade	156
12.1.7	Capacidade de extrusão e estabilidade dimensional	160
12.2	SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 4	170
CAPÍTULO 13 CONCLUSÕES		172
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		175
APÊNDICE A - Revisão Sistemática da Literatura (RSL)		191
APÊNDICE B - Registros Fotográficos do Ensaio de Espalhamento		201

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As técnicas de impressão 3D, também conhecidas como manufatura aditiva, envolvem diversos processos para a produção de uma ampla variedade de estruturas e geometrias complexas a partir de modelos tridimensionais (Muhammad *et al.*, 2021). De forma simplificada, os processos envolvem a adição de camadas de materiais, uma sobre a outra, formando os modelos tridimensionais.

De acordo com Al Jassmi *et al.* (2018), a impressão 3D tem uma história relativamente longa, com início na década de 1980. Diversos autores indicam que o processo de manufatura aditiva foi criado por Hideo Kodama como forma de prototipagem rápida para produtos (Baigarina *et al.*, 2023; Hunbus *et al.*, 2023). No entanto, a tecnologia evoluiu de forma tão significativa que não apenas superou suas aplicações iniciais, como também vem substituindo progressivamente a manufatura subtrativa convencional, tornando-se cada vez mais acessível ao público (Al Jassmi *et al.*, 2018).

Diversas indústrias já utilizam os processos de impressão 3D para criar protótipos físicos, bem como peças para uso final (Paolini *et al.*, 2019). No setor da construção, embora essas tecnologias tenham sido bem-sucedidas para prototipagem e criação de modelos em pequena escala, sua utilização como forma de substituir métodos tradicionais de construção ainda é um desafio (Al Jassmi *et al.*, 2018; Paolini *et al.*, 2019).

De modo geral, o setor da construção tem se mostrado consideravelmente mais lento do que outras áreas para introduzir técnicas mais modernas e, observando sua história recente, raramente experimentou transformações disruptivas significativas (Baigarina *et al.*, 2023; Muhammad *et al.*, 2021). Mesmo assim, dado o grande potencial de utilização em projetos de construção, vários dispositivos e técnicas de impressão 3D estão sendo amplamente pesquisados (Hunbus; Almangour, 2023).

Na construção civil, a impressão 3D oferece diversas vantagens em relação à construção convencional, destacando-se pela redução da necessidade de recursos humanos e materiais, ao automatizar processos, além da eliminação de moldes e ferramentas, o que resulta em menor desperdício e maior agilidade na execução das obras (Hunbus; Almangour, 2023; Quintella; Florêncio, 2024; Robayo-Salazar *et al.*, 2023b; Tu *et al.*, 2023). Além disso, o impacto ambiental pode ser reduzido, gerando menos resíduos, consumindo menos energia

e emitindo menos CO₂ (Hunbus; Almangour, 2023). A impressão 3D também permite que as empresas de construção produzam estruturas geometricamente complexas, variem os materiais dentro de um componente de acordo com suas funções e automatizem o processo de construção a partir de um modelo digital (Paolini *et al.*, 2019).

Apesar das vantagens, a construção por impressão 3D enfrenta diversos desafios, para além dos custos ainda elevados dos equipamentos. Entre as barreiras mais significativas estão a influência das condições climáticas na qualidade do concreto, a deformação das camadas devido ao peso próprio, o entupimento dos bicos de extrusão e a necessidade de controle preciso do tempo de pega (Hunbus; Almangour, 2023). Além disso, a qualidade dos itens impressos em 3D depende substancialmente das propriedades do concreto fresco e dos parâmetros de impressão, como a duração e a velocidade do processo (Baigarina *et al.*, 2023).

Nesse contexto, observa-se que uma parte dos problemas relacionados à implementação da impressão 3D na construção civil está vinculada ao material de impressão (concreto/argamassa). Existe, ainda, dificuldades em se produzir concretos e argamassas que possam ser bombeados e extrudados sem entupir os bicos das máquinas, preservando sua forma e tendo resistência suficiente para suportar seu peso e o das camadas subsequentes até a cura (Baigarina *et al.*, 2023). Outro ponto importante é que os componentes impressos podem ser fortemente anisotrópicos, o que prejudica a capacidade de carga e a distribuição de tensões na estrutura resultante (Pasco *et al.*, 2022).

Paralelamente, é amplamente reconhecido que a construção civil é uma das maiores responsáveis pelo consumo de recursos naturais não renováveis e pela geração de resíduos. Estima-se que mais de 10 bilhões de toneladas de resíduos de construção civil (RCC) sejam gerados globalmente, o que causa impactos ambientais significativos e contribui para as altas emissões de gases de efeito estufa (Silva *et al.*, 2020). No Brasil, esse número é estimado em cerca de 100 milhões de toneladas por ano (Silva *et al.*, 2020).

Embora o uso de concreto tenha aumentado continuamente nos últimos anos, sua produção e utilização no setor da construção civil geram efeitos ambientais adversos, principalmente devido às altas emissões de CO₂ associadas à produção do cimento Portland, o que resulta em uma pegada ecológica considerável (Fonseca; Matos, 2023; Mohammad *et al.*, 2020). No caso das misturas para impressão 3D, os aspectos ambientais são particularmente relevantes, pois essas formulações frequentemente possuem alto teor de cimento (Buswell *et al.*, 2018). Além disso, grande parte das pesquisas publicadas ainda se baseiam em formulações empíricas com altas relações cimento/agregado, resultando em traços com elevado teor de

cimento Portland, contribuindo para o aumento da pegada de carbono e comprometendo a sustentabilidade das soluções (Soares *et al.*, 2023).

Observa-se uma tendência crescente na pesquisa e desenvolvimento de materiais mais eficientes e menos poluentes (Quintella; Florêncio, 2024; Silva *et al.*, 2021). O uso de materiais alternativos, como resíduos e materiais reciclados, para substituir recursos naturais tem ganhado destaque na pesquisa sobre concretos e argamassas para impressão 3D.

Os finos provenientes de resíduos de rochas, também denominados fileres, são gerados em pedreiras, usinas de produção de misturas asfálticas e instalações de beneficiamento de rochas ornamentais, sendo originados principalmente durante o processo de britagem para a produção de agregados graúdos (Pacheco-Menor *et al.*, 2025). A aplicação desses fileres, especialmente os de origem calcária, como adições minerais em concretos e argamassas convencionais é amplamente documentada na literatura técnica. Além disso, seu uso como material suplementar ao cimento é reconhecido por diversas normas internacionais, como a Norma Europeia EN 197-1:2011 (desde 2000) e a ASTM C150:2018 (desde 2004), que permitem a substituição parcial do cimento por filer calcário em determinadas condições.

Diversos estudos indicam que a incorporação de fileres de calcário pode contribuir significativamente para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas das matrizes cimentícias, além de possibilitar a valorização e o reaproveitamento de um subproduto abundante da indústria da mineração. No estudo de Bederina *et al.* (2011), por exemplo, a adição de filer calcário ao concreto resultou em melhorias nas propriedades mecânicas da mistura, com a identificação de um teor ótimo de adição que maximiza a resistência à compressão. Em relação às variações dimensionais, observou-se uma redução inicial com o aumento do teor de filer até o valor ótimo, a partir do qual essas variações voltaram a crescer, embora permanecessem dentro de limites considerados aceitáveis (Bederina *et al.*, 2011). Resultados semelhantes foram observados por Panesar e Zhang (2020), cujos dados indicam que a utilização de filer calcário pode proporcionar um aumento de até 20% na resistência à compressão e uma redução de aproximadamente 10% na permeabilidade rápida ao íon cloreto.

No entanto, no que se refere a aplicações em impressão 3D de concreto (3DCP, do inglês *3D Concrete Printing*), o uso de formulações contendo filer calcário ainda é relativamente limitado. Estudos recentes, como van Overmeir *et al.* (2022), Giridhar *et al.* (2023) e Soares *et al.* (2023), investigaram a adição desse material em misturas para 3DCP, apontando resultados promissores quanto ao seu potencial para o desenvolvimento de composições mais sustentáveis. Contudo, tais estudos se limitam à utilização do filer, sem apresentar

comparações sistemáticas ou análises aprofundadas dos seus efeitos nas propriedades das misturas. Observa-se, portanto, uma lacuna relevante na literatura no que se refere à avaliação abrangente de diferentes formulações e seus efeitos no desempenho das argamassas extrudadas.

Diante dos avanços recentes na construção aditiva com materiais cimentícios e do crescente interesse na aplicação da impressão 3D na construção civil, torna-se essencial explorar soluções que conciliem desempenho técnico e sustentabilidade. A incorporação de fíleres de calcário em formulações para impressão 3D representa uma alternativa promissora, considerando a abundância, o baixo custo e o potencial desse material em melhorar as propriedades das misturas. Além de contribuir para a redução do consumo de cimento e das emissões de CO₂, essa abordagem permite o reaproveitamento de resíduos industriais, promovendo uma construção mais eficiente e ambientalmente responsável. Nesse contexto, a continuidade de estudos que avaliem o comportamento de materiais alternativos, como os fíleres de calcário, é fundamental para o aprimoramento das formulações, assegurando não apenas benefícios ambientais, mas também a viabilidade técnica das estruturas impressas por extrusão.

Assim, este trabalho tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento na dosagem de argamassas sustentáveis destinadas à impressão 3D cimentícia, por meio da incorporação de fíler calcário como material fino complementar. Como objetivos específicos, estabelecem-se:

1. Validar experimentalmente um método de dosagem, verificando sua aplicabilidade na formulação de argamassas extrudáveis para impressão 3D.
2. Avaliar a influência do aumento do teor de fíler calcário e da variação da fração de areia na estrutura volumétrica das misturas, analisando seus efeitos sobre propriedades no estado fresco e no estado endurecido.
3. Comparar o desempenho de dois tipos de fíler calcário (calcítico e dolomítico) quanto à eficiência de empacotamento, comportamento das misturas, desenvolvimento de rigidez e estabilidade dimensional.
4. Investigar os efeitos do aumento progressivo do teor de fíler calcário em composições previamente otimizadas, analisando as alterações estruturais, volumétricas e mecânicas decorrentes dessa modificação.
5. Refinar e selecionar traços tecnicamente viáveis para aplicação prática em impressão 3D, considerando desempenho mecânico, estabilidade dimensional, trabalhabilidade e critérios técnico-econômicos.

Este trabalho está estruturado em treze capítulos. Inicialmente, apresentam-se os avanços recentes da impressão 3D na construção civil, seus desafios e aplicações práticas, bem como aspectos relacionados à sustentabilidade e ao uso de filler calcário em materiais cimentícios. Em seguida, são discutidas as características e propriedades requeridas para argamassas destinadas à impressão 3D, complementadas por uma revisão sistemática da literatura. Posteriormente, descrevem-se os materiais e a metodologia geral adotada, seguidos da apresentação sequencial das quatro etapas experimentais, organizados de forma evolutiva, desde a formulação básica e ajustes iniciais até a etapa final de otimização. Por fim, são apresentadas as conclusões do estudo, destacando as contribuições técnicas e científicas alcançadas, bem como as referências bibliográficas e os apêndices que complementam a pesquisa.

CAPÍTULO 2

AVANÇOS E DESAFIOS DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Nos últimos anos, a grande concorrência enfrentada pelos profissionais da construção civil trouxe à tona discussões acerca do uso de processos industrializados na área. Ao mesmo tempo, a escassez de mão de obra qualificada, os desafios relacionados à automação e as questões de segurança nos canteiros de obras têm dificultado o atendimento a demandas como a redução do tempo de construção, da poluição e dos desperdícios (Veras *et al.*, 2023). Segundo os autores, essas problemáticas teriam uma solução comum: a impressão 3D. Isto porque essa técnica construtiva é uma forte vertente da industrialização da construção civil.

Conforme Quintella e Florêncio (2024) há pouco mais de uma década, criou-se um movimento midiático de entusiasmo em torno dos processos de impressão 3D, onde se vislumbravam mudanças revolucionárias nos modelos construtivos, tratando essa como uma tecnologia disruptiva que substituiria por completo os métodos tradicionais. Com o fim do entusiasmo inicial em torno dessa tecnologia, torna-se viável analisar de forma mais crítica seu nível de evolução, identificando seus benefícios, limitações e os aspectos que sustentam sua relevância como um dos principais fundamentos da Indústria 4.0 (Robayo-Salazar *et al.*, 2023).

Também chamados de manufatura aditiva (MA), esses processos consistem, de forma simplificada, na deposição controlada por computador de materiais cimentantes para criar objetos físicos camada por camada. Conforme Buswell *et al.* (2018), esses processos passaram por grande desenvolvimento nos últimos 10 anos, e diversos grupos em todo o mundo, incluindo empresas e universidades, estão atualmente envolvidos em pesquisas na área. No cenário nacional, por exemplo, a impressão 3D encontra-se em estágio de desenvolvimento e vem ganhando grande atenção do meio técnico devido às suas inúmeras vantagens (Carasek *et al.*, 2021).

Atualmente, o setor da construção apresenta um baixo nível de digitalização e pouco uso de tecnologias digitais (Robayo-Salazar *et al.*, 2023). No entanto, os processos de manufatura aditiva têm mostrado um futuro promissor, podendo, sem dúvida, vir a ser amplamente empregados no setor da construção. Suas aplicações na indústria da construção são diversas, desde impressões de pequenas peças e componentes plásticos até impressões de estruturas utilizando concreto (Santos, 2022).

Existem hoje diversas tecnologias de manufatura aditiva que utilizam diferentes materiais, como polímeros, metais e concreto no âmbito da construção civil (Santos, 2022). De acordo com a norma ISO/ASTM 52900:2021, a manufatura aditiva pode ser dividida em sete categorias de processos: extrusão de material (*material extrusion*), jato de material (*material jetting*), jato de ligante (*binder jetting*), fotopolimerização em cuba (*vat photopolymerization*), fusão em leito de pó (*powder bed fusion*), deposição de energia dirigida (*directed energy deposition*) e laminação de folhas (*sheet lamination*) (ISO/ASTM 52900:2021). Pessoa *et al.* (2021) fazem um levantamento dos principais materiais utilizados em cada técnica (Quadro 1).

Quadro 1 - Técnicas de manufatura aditiva e materiais utilizados

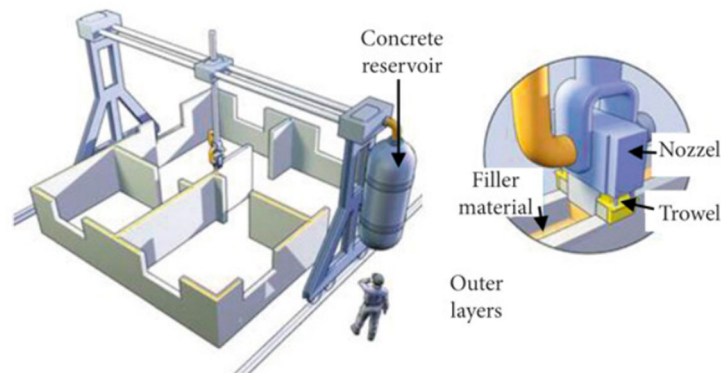
MANUFATURA ADITIVA	MATERIAL IMPRESSO
Binder Jetting	Polímeros em pó Metais Cerâmicas Ligas com memória de forma
Directed Energy Deposition	Pó metálico Material de alimentação em forma de fio
Material Extrusion	Filamentos termoplásticos Pastas fluidas
Material Jetting	Fotopolímeros Polímeros Ceras
Powder Bed Fusion	Pós de poliamida Pós metálicos Pós cerâmicos
Sheet Lamination	Folhas de papel Folhas de polímero Folhas de metal
Vat Photopolymerization	Resinas de polímeros curáveis por ultravioleta

Fonte: Pessoa *et al.*, 2021

Wu *et al.* (2018) apontaram três metodologias de impressão 3D que têm ganhado grande destaque na construção: *Contour Crafting*, *Concrete Printing*, que trabalham com o princípio de extrusão, e *D-Shape*, que trabalha com deposição de pó.

O *Contour Crafting* (Figura 1), ou contorno em concreto, consiste em um processo de fabricação híbrido que combina extrusão para formar as paredes dos objetos e preenchimento para construir o núcleo em camadas. Neste processo, a impressora refaz o percurso dos contornos diversas vezes, depositando o concreto que, paralelamente, é raspado nas laterais com a ajuda de pás que acompanham o bico de impressão, garantindo uma forma final alinhada e obtendo a estrutura desejada (Santos, 2022).

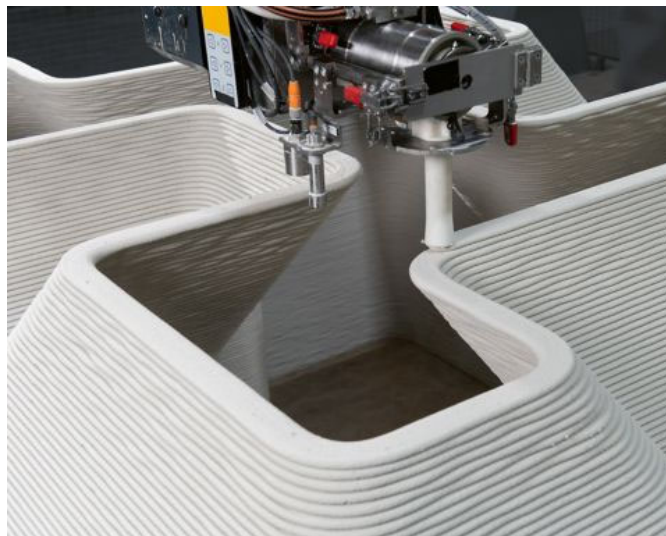
Figura 1 - Uso da técnica de *Contour Crafting* na construção civil



Fonte: Allouzi *et al.*, 2020

O *Concrete Printing* (Figura 2), ou impressão em concreto, também é um método de construção baseado na extrusão, diferenciando-se do *Contour Crafting* pela menor resolução na deposição das camadas, mas permitindo maior liberdade tridimensional. Geralmente, nesse método, o tamanho da estrutura para impressão é menor e não há auxílio de pás para o acabamento lateral da impressão (Santos, 2022).

Figura 2 - Impressão em *concrete printing*



Fonte: SIKA, 2025

Ao contrário dos dois modelos anteriores, a impressão *D-Shape* (Figura 3) não utiliza a extrusão de materiais, mas sim a deposição seletiva de um ligante sobre uma camada de material particulado, promovendo sua consolidação. Essa tecnologia utiliza um granulado orgânico, como rochas trituradas ou areia, que são depositados na espessura desejada e, então, prensados no padrão determinado pelo projeto 3D, sendo ligados por uma tinta inorgânica aplicada pela impressora (Wu *et al.*, 2018).

Figura 3 - Tecnologia de Impressão 3D D-Shape



Fonte: Al Jassmi *et al.*, 2018

De modo geral, na área de construção civil, a técnica que vem sendo mais amplamente adotada e estudada é a que opera por bombeamento e extrusão de materiais cimentícios, chamada de 3DCP (*3D Concrete Printing*) (Buswell *et al.*, 2018; Pessoa *et al.*, 2021). De acordo com os autores, mais da metade dos processos em desenvolvimento empregam extrusão, normalmente de um filamento contínuo, com diâmetro entre 6 mm e 50 mm, bombeado através de um bico montado em um pórtico ou braço robótico que deposita o material, geralmente uma argamassa com alto teor de cimento, durante o processo de construção (Buswell *et al.*, 2018).

Nos processos por extrusão, as etapas do processo de fabricação incluem: (a) o design e modelagem 3D da peça a ser impressa, fatiamento, planejamento do percurso e simulação; (b) dosagem dos materiais, podendo ser utilizadas formulações próprias ou misturas prontas para 3DCP; (c) ativação da matriz cimentícia pela adição de água, que pode ser realizada em lotes ou por meio de misturadores contínuos; (d) transporte do material, geralmente feito por meio de bombas de cavidade progressiva; (e) extrusão do material (Quintella; Florêncio, 2024).

Este processo de impressão pode ser realizado diretamente no canteiro de obras (*on-site*), ou em um ambiente de fabricação controlado, com posterior transporte para o canteiro (*off-site*). Tem-se, hoje, que a construção *on-site* se mostra uma solução econômica e amplamente adotada na 3DCP, principalmente por eliminar a necessidade de logística das peças e permitir a impressão de elementos de maiores dimensões e em maior volume. No entanto, sua produtividade pode ser afetada por intempéries e pelo tempo gasto na montagem do equipamento no local.

Por outro lado, a fabricação 3DCP *off-site* tem como vantagem o princípio da pré-fabricação, proporcionando maior versatilidade e maior complexidade nas formas impressas. Porém, em geral, apresenta desvantagens, como uma menor área de produção alcançada e a necessidade de transportar e montar as peças no canteiro, o que pode encarecer e tornar o processo mais complexo (Quintella; Florêncio, 2024).

Em geral, a impressão 3D aplicada à Indústria da Construção Civil demonstra uma grande capacidade de transformá-la, apresentando uma série de benefícios. Essa tecnologia proporciona maior liberdade no design das peças, facilita o projeto de edifícios funcionais e favorece a construção modular; permite construções mais autônomas, com redução da dependência de mão de obra; viabiliza a adoção da otimização topológica, promovendo a aplicação de material apenas onde ele é estruturalmente necessário; reduz custos e desperdícios, o que aumenta a sustentabilidade; acelera o processo de construção e melhora a qualidade final da obra, com aumento de eficiência, tanto nos processos de construção quanto nos de desconstrução (Ma *et al.*, 2022; Robayo-Salazar *et al.*, 2023b; Wu *et al.*, 2018).

A eliminação da necessidade de fôrmas, responsáveis por grande parte do tempo e dos custos associados à construção em concreto, é destacada por Quintella e Florêncio (2024) como uma das principais vantagens. Em termos de tempo da obra, algumas pesquisas indicam que a 3DCP pode reduzir o tempo de construção em até um quarto, quando comparada aos métodos convencionais, fazendo com que construções que tradicionalmente levariam meses ou até anos para serem concluídas possam ser finalizadas em apenas alguns dias (Robayo-Salazar *et al.*, 2023b; Tu *et al.*, 2023).

Apesar de já existirem casos de sucesso relatando o uso da impressão 3D na construção, alguns autores ainda defendem que, como tecnologia, ela está em evolução, e várias questões precisam ser resolvidas para que seu potencial seja plenamente aproveitado e ela seja totalmente integrada ao mercado da construção civil (Ma *et al.*, 2022; Robayo-Salazar *et al.*, 2023b). Entre os principais desafios que ainda vêm sendo amplamente investigados, tanto no setor acadêmico quanto na indústria, destacam-se: (a) a alteração das propriedades dos materiais cimentícios nos estados fresco e endurecido por meio do uso de adições e aditivos especiais; (b) a impressão de concretos reforçados com fibras; (c) a integração de sistemas de reforço durante o processo de impressão 3D; (d) a análise da durabilidade das estruturas produzidas em concreto impresso; e (e) a adaptação e inserção da tecnologia de impressão 3D nas normas e regulamentações da construção civil (Robayo-Salazar *et al.*, 2023b).

Ma *et al.* (2022) apontam uma limitação dos processos de 3DCP em relação à sua capacidade construtiva, que geralmente é usada apenas para construir paredes e elementos construtivos

isolados, e não para a construção de edificações completas, fazendo com que ainda haja a presença de mão de obra e de tecnologias tradicionais para a produção de uma parte da edificação. Além disso, os projetos em 3DCP enfrentam limitações quanto ao tamanho máximo de impressão, velocidade de construção e eficiência, além desses projetos também poderem gerar custos relativamente elevados, devido à necessidade de novos equipamentos e infraestrutura específicos para a tecnologia (Alami *et al.*, 2023).

Em relação ao material, apesar de ser chamado de impressão 3D em concreto, geralmente são utilizados microconcretos ou argamassas, devido à limitação na utilização de agregados graúdos para o bombeamento e extrusão na maioria dos equipamentos. O material precisa ser suficientemente fluido para ser bombeado, mas, ao ser depositado, precisa se estruturar rapidamente, manter sua forma e suportar o peso das demais camadas, o que torna o desenvolvimento de formulações com vários aditivos mais complexo (Ma *et al.*, 2022).

Adicionalmente, a compensação entre os diferentes ligantes de cimento e/ou agregados que influenciam as propriedades reológicas e a consistência dos materiais, bem como o procedimento de cura nos processos de 3DCP, limita o desempenho das estruturas impressas em comparação com as técnicas convencionais de construção (Alami *et al.*, 2023).

Outro aspecto relevante é que, apesar da otimização no uso de materiais na construção, a pegada de carbono das formulações usadas em 3DCP tende a ser mais elevada devido à maior quantidade de cimento empregada. Isso ocorre pelos impactos negativos das emissões de gases de efeito estufa liberados na produção do cimento Portland e pelo alto consumo de água, levantando questionamentos sobre sua pegada ecológica e sustentabilidade (Alami *et al.*, 2023; Ma *et al.*, 2022). Além disso, o 3DCP pode gerar deslocamento de empregos, considerando a redução na demanda por mão de obra (Alami *et al.*, 2023).

Embora, em âmbito internacional, tenham sido publicados a ISO/ASTM 52939 (2023) e a AC509 (2023), que regulamentam os processos de impressão 3D, no Brasil a ausência de regulamentação específica para estruturas fabricadas com 3DCP acaba por exigir o uso de elementos estruturais em concreto convencional. Além disso, por se tratar de regulamentações recentes, muitos dos exemplares conhecidos e efetivamente construídos pelo mundo são, na verdade, cascas impressas em 3D usadas como fôrmas permanentes, nas quais o concreto armado tradicional é adotado em pilares estruturais no interior das paredes impressas, que funcionam apenas como elementos de fechamento. (Ma *et al.*, 2022).

De modo geral, apesar do destaque que a impressão 3D na construção civil ganhou nos últimos anos, ainda existe uma certa resistência por parte do mercado quanto à confiabilidade

do produto final. Mesmo assim, observa-se um crescimento no número de edifícios produzidos com 3DCP. Quintella e Florêncio (2024) levantaram dados que mostram que, em 2022, havia cerca de 130 edifícios ao redor do mundo feitos com essa tecnologia, sendo que 55 foram construídos naquele ano. A Fundação Dubai Future, no Oriente Médio, prevê que a impressão 3D na construção civil reduzirá em 70% a necessidade de trabalho humano e em 90% os custos da construção (Quintella; Florêncio, 2024). Para tanto, foi anunciado que a meta para a cidade seja de que 25% de seus novos edifícios sejam construídos com tecnologia de impressão 3D até 2030 (Quintella; Florêncio, 2024).

Na América Latina, a adoção de tecnologias 3D tem sido mais lenta em comparação com os países europeus. Segundo Robayo-Salazar *et al.* (2024), uma das hipóteses levantadas está relacionada ao cenário empresarial, já que o alto investimento inicial necessário, aliado ao desconhecimento sobre os benefícios e aplicações da manufatura aditiva em relação aos métodos construtivos tradicionais, dificulta sua adoção pelas empresas. Além disso, na região analisada, a tecnologia 3DCP ainda se encontra em estágio experimental e apresenta baixa disseminação, sendo marcada por iniciativas pontuais e pela existência de apenas cinco edificações concluídas até 2022 (Robayo-Salazar *et al.*, 2023). No cenário brasileiro, algumas empresas vêm se destacando no desenvolvimento da impressão 3D aplicada à construção civil. Entre elas, está a startup 4Constru, que atua em parceria com a Inova House e a 3D Home Construction, responsável pela execução da primeira residência impressa em 3D no país, além da atuação da Domus 3D (Quintella; Florêncio, 2024).

Dessa forma, observa-se que, embora as tecnologias de impressão 3DCP sejam complexas e ainda não tenham atingido um nível de desenvolvimento plenamente comercial, principalmente devido aos desafios relacionados aos aspectos humanos e organizacionais de sua adoção, os processos de manufatura aditiva já fazem parte da Indústria da Construção e vêm sendo aprimorados para viabilizar projetos cada vez mais ambiciosos (Santos, 2022; Wu *et al.*, 2018). A aplicação desses processos na construção civil surge como uma alternativa promissora e sustentável para enfrentar o atual déficit habitacional, especialmente pela possibilidade de empregar matérias-primas disponíveis na própria região, bem como resíduos e subprodutos industriais, contribuindo, em certa medida, para os princípios da economia circular (Robayo-Salazar *et al.*, 2023).

Dessa forma, a 3DCP vem se consolidando como uma tecnologia importante para a digitalização e automação da construção civil, integrando etapas que vão do projeto à execução. O avanço tecnológico e a expansão do mercado nos últimos anos indicam um cenário promissor para sua adoção futura, especialmente em busca de processos construtivos mais produtivos, eficientes e sustentáveis.

CAPÍTULO 3

CASOS PRÁTICOS DE IMPRESSÃO 3D PELO MUNDO

A implementação do 3DCP no setor da construção tem se mostrado uma alternativa viável para diversos tipos de infraestrutura, elementos de fachada, suportes de construção modular, escadas, mobiliário externo e aplicações em design de paredes complexas, podendo ter um impacto significativo em várias áreas da construção (Alami *et al.*, 2023). O uso da impressão 3D para criar estruturas de concreto, como paredes, pilares e lajes, é, em especial, uma área de crescente interesse e promete expandir as possibilidades de aplicação no setor da construção civil (Tu *et al.*, 2023).

Na engenharia de tráfego, por exemplo, a adoção da tecnologia 3DCP tem viabilizado o fortalecimento e a construção de pontes e túneis. Um exemplo notável foi o projeto de renovação da ciclovia Lieve Vrouwensteeg, na vila de Gemert, na Holanda (Figura 4). Em 2017, como parte desse projeto, foi impressa e instalada uma ponte para bicicletas que atravessa o canal Peelse Loop, com um vão de 6,5 metros e 3,5 metros de largura (Salet *et al.*, 2018). A estrutura foi produzida em uma fábrica por meio de 3DCP e tornou-se a primeira ponte impressa do mundo a utilizar modelagem por deposição fundida com pré-tensionamento, incorporando cabos de reforço no filamento de impressão, uma inovação para a época (Salet *et al.*, 2018).

Figura 4 - Ponte em 3DCP instalada na ciclovia Lieve Vrouwensteeg, na vila de Gemert, na Holanda



Fonte: Salet *et al.*, 2018

Ainda em 2017, outra demonstração prática do 3DCP foi realizada em Moscou com a construção rápida de uma moradia de aproximadamente 37 m², finalizada em apenas 24 horas (Sakin; Kiroglu, 2017). Conforme os autores, esse projeto se destacou pela utilização

de uma impressora 3D portátil, permitindo que toda a estrutura fosse erguida diretamente no local. As paredes e a fundação foram impressas com uma mistura de concreto, enquanto janelas, acabamentos e mobiliário foram instalados posteriormente, conforme ilustrado na Figura 5 (Sakin; Kiroglu, 2017). Apesar de seu tamanho compacto, a casa é totalmente funcional e habitável, tendo tido um custo total de produção de aproximadamente US\$10.000 (cerca de R\$57.000), evidenciando a relação custo-benefício dessa tecnologia de construção (Sakin; Kiroglu, 2017).

Figura 5 - (a) Vista frontal da Casa Apis Cor na Rússia; (b) Processo de Contour Crafting na Casa Apis Cor



Fonte: Sakin; Kiroglu, 2017

Em janeiro de 2019, foi inaugurada em Xangai a maior ponte construída com tecnologia de impressão 3D (Figura 6). A estrutura, com aproximadamente 26 metros de comprimento, foi desenvolvida por uma equipe da Escola de Arquitetura da Universidade de Tsinghua e demorou cerca de 450 horas para ser impressa (Dixon, 2019). Os membros da equipe afirmaram que o custo total foi cerca de um terço menor em comparação a uma ponte convencional de mesmo tamanho (Dixon, 2019).

Figura 6 - Maior ponte em 3DCP do mundo, Xangai, China



Fonte: Dixon, 2019

Nos Estados Unidos, as casas impressas em 3D chegaram ao mercado no início de 2021, e desde então, diversos avanços têm sido observados na área (Becher, 2024). Um exemplo notável é a residência de três quartos e dois banheiros e meio, construída pela empresa ICON

em parceria com o escritório de arquitetura Lake|Flato, nos arredores do centro de Austin, Texas (Figura 7). Com aproximadamente 218 m², a casa foi impressa em menos de duas semanas e foi nomeada pela revista Time como uma das Melhores Invenções de 2022 (Becher, 2024).

Figura 7 - Casa Zero da empresa ICON com escritório Lake|Flato, Austin, Texas



Fonte: Becher, 2024

Outra iniciativa, também da empresa ICON, é o desenvolvimento de um bairro inteiramente construído com impressão 3D na cidade de Georgetown, Texas (Molitch-Hou, 2023). A comunidade, chamada Wolf Ranch, consiste em 100 casas impressas em 3D (Figura 8), com dimensão variando de aproximadamente 140 m² a 195 m², com ambientes que incluem sala, cozinha, três a quatro quartos e dois ou três banheiros com planejamento para a construção entre 2022 e 2024 (Becher, 2024; Molitch-Hou, 2023). Espera-se que a construção das paredes em concreto ofereçam melhor resistência a cupins e proteção contra o clima rigoroso do Texas (Becher, 2024).

Figura 8 - Casa modelo Wolf Ranch, Georgetown, Texas.



Fonte: Molitch-Hou, 2023

Em 2023, na cidade de Detroit, Michigan, a empresa Citizen Robotics, em parceria com a developARCHITECTURE, construiu a primeira casa impressa em 3D no estado (Becher, 2024). O projeto da casa, que possui dois quartos e um banheiro (Figura 9), ocupa

aproximadamente 93 m² e começou a ser planejado em 2020, mas a fase de impressão ocorreu apenas entre outubro de 2023 e janeiro de 2024 (Citizen Robotics, 2024; Rahman, 2023). A Citizen Robotics buscou aplicar técnicas de construção robótica e automatizada para reduzir custos e materiais necessários, imprimindo as paredes nas instalações da empresa e, posteriormente, montando as peças no local da obra (Becher, 2024).

Figura 9 - Casa em 3DCP executada pela Citizen Robotics, Detroit, Michigan



Fonte: Citizen Robotics, 2024

Em Massa Lombarda, Itália, o grupo MCA Architects, em parceria com a empresa WASP, desenvolveu o projeto Tecla House em 2021 (PourMohammadi, 2023). O projeto buscou criar um elo entre o passado e a tecnologia atual e foi reconhecido por utilizar materiais locais, especialmente uma mistura de solo, para construir uma estrutura ecologicamente correta, com menor impacto ambiental (PourMohammadi, 2023). Segundo dados do projeto, para executar os quase 60 m² da obra (Figura 10) foram necessárias cerca de 200 horas de impressão, com consumo médio de 6 kW de energia, reduzindo quase totalmente o desperdício típico da construção (Pintos, 2021). Outro diferencial do projeto é o mobiliário, que também foi parcialmente impresso em 3D a partir de solo local e projetado para ser reciclável ou reutilizável, refletindo a filosofia de uma casa circular (Pintos, 2021).

Figura 10 - Tecla House, Massa Lombarda, Itália



Fonte: PourMohammadi, 2023

Em abril de 2021, os moradores da primeira casa realizada em 3DCP na Holanda receberam suas chaves. Localizada na cidade de Eindhoven, essa casa faz parte do Projeto Milestone, que visa a impressão de cinco residências que atendam a todos os rigorosos requisitos de construção do país (Souza, 2021). Com uma área de 94 m², a construção térrea apresenta uma estrutura que se assemelha a uma grande rocha (Figura 11), harmonizando-se com o ambiente natural e ilustrando a liberdade de formas proporcionada pela impressão 3D de concreto (Becher, 2024). A casa é composta por 24 elementos de concreto que foram impressos em uma fábrica, sendo posteriormente transportados para o canteiro de obras, onde foram montados sobre uma fundação, instalados os telhados, caixilharia e realizados os acabamentos finais (Souza, 2021).

Figura 11 - Projeto Milestone, Eindhoven, Holanda



Fonte: Souza, 2021

No Brasil, em 2020, a empresa 3D Home Construction, em parceria com a Inova House 3D, executou a primeira casa modelo impressa em 3D do país (Figura 12) em Macaíba, no Rio Grande do Norte. O projeto, que possui aproximadamente 68 m², levou cerca de uma semana para ser concluído, com um custo médio de R\$ 50,00 por metro quadrado (Martinelli, 2020). Já em 2024, a empresa gaúcha Printek 3D utilizou uma impressora gigante para erguer uma casa térrea de cerca de 80 m² em Caxias do Sul, no Rio Grande do Sul (Laporta, 2024). A estrutura das paredes, com 4,5 m de altura, foi finalizada em menos de três dias e contou com apenas duas pessoas na mão de obra (Laporta, 2024). Embora o projeto tenha sido temporariamente paralisado devido a fortes chuvas que causaram destruição na região no início de 2024, ele foi concluído com sucesso em 60 horas (Laporta, 2024; Sika, 2024).

Figura 12 - Primeira casa modelo impressa em 3D no Brasil



Fonte: Martinelli, 2020

A tecnologia também tem sido aplicada em outras áreas além da construção civil. A empresa espanhola de energia renovável Iberdrola iniciou, em 2022, uma colaboração com a Hyperion Robotics e o Peikko Group para utilizar o 3DCP a fim de aprimorar a construção de suas linhas de transmissão (Figura 13) (Alami *et al.*, 2023). Com mais de 1,2 milhões de quilômetros de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica e enfrentando desafios como a escassez de mão de obra e a falta de automação na construção civil, as soluções de 3DCP oferecidas pela Hyperion Robotics impulsionaram o projeto, reduzindo em 75% a necessidade de material para as estruturas de transmissão (Alami *et al.*, 2023; Tegl, 2022).

Figura 13 - Fundação de linha de transmissão impressa por 3DCP



Fonte: Tegl, 2022

Paralelamente, as propriedades de modelagem digital da impressão 3D a tornam amplamente empregada na produção de cerâmica e outras obras artísticas, além de estarem abrindo caminho para potenciais aplicações no desenvolvimento de materiais para reparo ou reforço de estruturas danificadas ou deterioradas (Tu *et al.*, 2023).

Apesar de ser uma tecnologia ainda considerada nova, a 3DCP apresenta um futuro promissor, evidenciado por diversos casos implementados ao redor do mundo, que demonstram sua capacidade de revolucionar a forma como edificações são projetadas e construídas. Projetos inovadores, como casas, pontes e até bairros inteiros, têm mostrado a viabilidade e os benefícios dessa abordagem. No entanto, ainda existem incertezas e fatores que requerem estudos mais aprofundados, como a durabilidade das estruturas, a eficiência dos materiais utilizados e as implicações sociais e ambientais da sua adoção em larga escala. Esses desafios precisam ser abordados para garantir que a 3DCP possa se consolidar como uma solução sustentável e eficaz no setor da construção civil.

CAPÍTULO 4

SUSTENTABILIDADE NA IMPRESSÃO 3D

Questões de sustentabilidade tem se tornado uma pauta global em diversas esferas da sociedade. Em uma análise abrangente, um dos documentos mais recentes sobre a iniciativa global para integrar os conceitos de sustentabilidade em questões ambientais, econômicas e sociais é a Agenda 2030 (Laslett; Urmee, 2020). Esta agenda apresenta os princípios e propósitos da Carta das Nações Unidas e contém um plano de ações composto por dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas, tendo se mostrado uma maneira eficaz de incentivar a busca por meios de mitigar os impactos ambientais negativos (Laslett; Urmee, 2020).

Acompanhando essa tendência mundial de avanço rumo à sustentabilidade, é notório que as tecnologias se tornaram importantes aliadas no desenvolvimento das cidades, inclusive com o monitoramento da qualidade ambiental, social e econômica, conhecidos como o tripé da sustentabilidade (Silva *et al.*, 2021). Neste cenário, profissionais da área de arquitetura e engenharia também têm demonstrado interesse na execução de obras, projetos e processos mais eficientes no setor da construção civil, buscando, assim, alcançar construções mais sustentáveis (Carvajal-Arango *et al.*, 2019; Jalaei *et al.*, 2020).

Tais fatores explicam o crescimento das investigações científicas com o intuito de aprimorar as técnicas de manufatura aditiva aplicadas no setor da construção (Silva *et al.*, 2021). Apesar de os estudos sobre seu real impacto sustentável ainda serem escassos, estima-se que as técnicas de 3DCP podem ser uma alternativa sustentável em potencial, apresentando até 49% menos pegada ambiental e 78% mais custo-efetividade em comparação com as técnicas de construção convencionais (Ibrahim *et al.*, 2022).

A 3DCP também pode contribuir para a sustentabilidade na construção civil ao adotar processos automatizados de projeto e fabricação mais eficientes (Quintella; Florêncio, 2024). De acordo com os autores, essa tecnologia possibilita o uso mais racional dos materiais, aplicando-os apenas onde necessário, além de reduzir a geração de resíduos e a utilização de fôrmas, o que contribui para diminuir impactos ambientais e custos de produção.

Mesmo assim, apesar do potencial e dos possíveis benefícios da 3DCP, a tecnologia não está isenta de desvantagens, apresentando limitações técnicas e problemas de sustentabilidade (Ibrahim *et al.*, 2022).

Em termos de lucratividade, por exemplo, Abdalla *et al.* (2021) realizaram uma análise do custo do ciclo de vida de um projeto em 3DCP e de um projeto convencional onde os resultados apontaram que a impressão 3D foi 78% mais lucrativa do que sua contraparte convencional (Abdalla *et al.*, 2021). Mesmo assim, Ibrahim *et al.* (2022) defendem que embora dados da literatura sugiram que as tecnologias de 3DCP possam ser mais econômicas em projetos de construção do que as técnicas convencionais, essa vantagem ainda permanece questionável (Ibrahim *et al.*, 2022).

Outra grande limitação é a escassez de opções de materiais disponíveis para os construtores. As misturas de materiais para 3DCP ainda são formuladas de maneira básica, não diferindo significativamente da argamassa tradicional, apesar de apresentarem propriedades reológicas substancialmente diferentes (Adaloudis; Bonnin Roca, 2021). Além disso, as propriedades mecânicas dos componentes impressos são geralmente inferiores às do concreto moldado e se mostram extremamente sensíveis a pequenas variações nos parâmetros do processo de fabricação (Wolfs *et al.*, 2019).

Apesar do uso de concreto ter apresentado um aumento constante nos últimos anos, diversos efeitos ambientais adversos de sua produção e uso no setor da construção civil têm sido observados (Mohammad *et al.*, 2020). Além de possuir um alto valor de emissão de CO₂ incorporado, a dependência da humanidade desse composto gerou diversas preocupações, principalmente pelo fato de as matérias-primas básicas para a fabricação do concreto serem recursos naturais não renováveis, o que faz com que o cimento Portland tenha uma forte pegada ecológica (Fonseca; Matos, 2023). Assim, uma tendência que tem sido observada é o estudo para o desenvolvimento de materiais mais eficientes e menos poluentes (Quintella; Florêncio, 2024; Silva *et al.*, 2021).

Desta forma, diversas pesquisas em 3DCP têm se concentrado em reduzir a pegada de carbono do concreto, buscando desenvolver materiais alternativos, incorporar materiais locais, reciclados ou que absorvem carbono, entre outras estratégias (Quintella; Florêncio, 2024). De acordo com Robayo-Salazar *et al.* (2023), uma das principais recomendações para a adoção da tecnologia de impressão 3D consiste na utilização de materiais disponíveis localmente, a fim de assegurar sua viabilidade técnica, econômica e ambiental. Além disso, os autores também ressaltam a importância do aproveitamento de materiais reciclados e resíduos industriais, incorporando os princípios da Economia Circular ao processo construtivo.

Fica claro que, no nível dos materiais, a dosagem das misturas desempenha um papel crucial no impacto ambiental do 3DCP e é um fator chave para melhorar sua sustentabilidade. No entanto, apesar de o cimento afetar significativamente os aspectos de sustentabilidade do

3DCP, quantidades maiores de cimento têm se mostrado necessárias para atingir propriedades de impressão adequadas (Fonseca; Matos, 2023). Os materiais cimentícios suplementares, como sílica ativa, cinza volante, escória de alto-forno e argila calcinada, são, nesse cenário, uma opção viável para substituir parcialmente o cimento Portland e diminuir a pegada ecológica do 3DCP (Fonseca; Matos, 2023). Mesmo assim, esses materiais precisam ser analisados cuidadosamente. Mohammad *et al.* (2023) apontam que, mesmo com a utilização de materiais cimentícios suplementares, o 3DCP pode requerer mais cimento na mistura de concreto para que a estrutura impressa mantenha sua forma, o que pode aumentar a contribuição do 3DCP para o aquecimento global (Mohammad *et al.*, 2020).

Marsh *et al.* (2022), no entanto, defendem que não se deve considerar apenas as matérias-primas envolvidas. Dependendo do contexto estrutural, pode ser mais benéfico utilizar um teor de cimento mais alto para obter uma mistura de concreto de maior resistência, o que resultaria no uso de menos material para o projeto e, conseqüentemente, uma menor pegada ambiental (Marsh *et al.*, 2022). Dessa forma, escolher um material com base apenas em seu menor impacto ambiental não necessariamente resultaria em um menor impacto geral para a estrutura. Portanto, otimizar o projeto de uma mistura de concreto requer o entendimento da função estrutural e os requisitos específicos de cada elemento para um determinado ambiente (Marsh *et al.*, 2022).

Outro fator de destaque é que os materiais utilizados para impressão podem ser reciclados e utilizados na mistura juntamente com agregados secundários e agregados de resíduos ou subprodutos, reduzindo o impacto ambiental do 3DCP (Fonseca; Matos, 2023; Ibrahim *et al.*, 2022). A substituição total de agregado natural por agregado reciclado na 3DCP pode reduzir o aquecimento global, a acidificação, a poluição fotoquímica e a eutrofização (Fonseca; Matos, 2023). Portanto, o desenvolvimento de compósitos cimentícios que atendam satisfatoriamente às propriedades mecânicas, além da capacidade de impressão para serem utilizados na 3DCP, ainda se mostra como um desafio que carece de mais pesquisas (Silva *et al.*, 2021).

De uma perspectiva mais ampla, a avaliação do ciclo de vida (ACV) se revela uma forte ferramenta para apoiar o desenvolvimento de uma Economia Circular no setor da construção. Embora haja uma quantidade significativa de literatura sobre estratégias de Economia Circular aplicadas ao concreto, a maior parte dessa pesquisa se concentra em aspectos técnicos, ambientais e econômicos de algumas estratégias-chave, como a reciclagem, de forma detalhada, mas limitada (Marsh *et al.*, 2022).

Paralelamente, abordagens que consideram aspectos sociais e políticos mais amplos, assim como perspectivas em escala de sistema, têm sido relativamente negligenciadas (Marsh *et*

al., 2022). As avaliações ambientais e econômicas do 3DCP costumam ignorar aspectos relacionados à sustentabilidade social e são frequentemente limitadas a estudos de caso isolados, além de não analisam fatores de nível industrial, como regulamentação e cultura (Adaloudis; Bonnin Roca, 2021). Em especial, determinar os aspectos sociais da 3DCP tem se mostrado uma tarefa difícil e, portanto, raramente tem sido discutido na literatura (Ibrahim *et al.*, 2022). Esses fatores contextuais, no entanto, podem impactar significativamente a adoção da tecnologia, a sustentabilidade dos modelos de negócios e, consequentemente, a extensão dos benefícios em termos de sustentabilidade (Adaloudis; Bonnin Roca, 2021).

A fim de avaliar o impacto ambiental total de uma estrutura, todas as fases do processo de construção deveriam ser adequadamente analisadas, começando antes da construção e continuando até a fase de demolição e a análise das possibilidades de reutilização dos materiais (Mohammad *et al.*, 2020). Os autores apontam que vários estudos têm destacado o potencial do 3DCP para influenciar a pegada energética e ambiental de edifícios de concreto. Além disso, as comparações de ACV realizadas pelos diversos autores analisados entre a fabricação convencional e a fabricação aditiva indicam que a fabricação aditiva reduz o impacto ambiental geral e aumenta a possibilidade de reciclagem (Mohammad *et al.*, 2020).

Mohammad *et al.* (2020) investigaram o desempenho ambiental de paredes impressas em 3D em comparação com as convencionais de concreto armado. Os resultados mostraram que os cenários de 3DCP geraram emissões mais baixas em relação ao potencial de aquecimento global e à acidificação (Mohammad *et al.*, 2020). Além disso, quando o reforço convencional foi combinado com 3DCP, os impactos ambientais continuaram a ser inferiores aos das técnicas de construção convencionais (Mohammad *et al.*, 2020).

Abdalla *et al.* (2021) realizaram um estudo comparativo entre a 3DCP e a construção convencional utilizando concreto moldado *in loco*. Sob os pontos de vista ambiental e econômico, a análise revelou um desempenho ambiental superior do método de impressão 3D, devido à ausência de diversos componentes, como fôrmas e reforços de aço, além da redução no uso de materiais, em comparação com as alternativas de construção convencionais (Abdalla *et al.*, 2021). O estudo também destacou que a diminuição das proporções de cimento em argamassas de impressão 3D pode reduzir significativamente os impactos ambientais (Abdalla *et al.*, 2021).

Han *et al.* (2021) desenvolveram um modelo 3D para simular uma casa impressa em 3D, calculando as emissões de poluentes com base em equações da literatura. Diferentemente de outros estudos, os resultados mostraram que a construção com impressão 3D gerou maiores emissões em comparação ao concreto convencional moldado *in loco*, principalmente

devido ao maior teor de cimento utilizado. Além disso, observou-se que à medida que a quantidade de agregado reciclado aumenta, as emissões geradas durante o transporte diminuem, compensando pequenos aumentos no teor de cimento (Han *et al.*, 2021). Do ponto de vista econômico, embora a impressão 3D não tenha apresentado uma vantagem no custo dos materiais em relação à construção tradicional, devido ao uso de aditivos mais caros, ela pode resultar em economia total devido à redução nos custos de cofragem e mão de obra, especialmente em estruturas complexas (Han *et al.*, 2021).

Do ponto de vista social, a substituição da mão de obra por impressoras 3D reduz o envolvimento humano, o que pode diminuir a ocorrência de ferimentos e fatalidades (Ibrahim *et al.*, 2022). Além disso, o equipamento de 3DCP poderia, com supervisão mínima, operar à noite ou em condições ambientais adversas, quando as atividades manuais de construção normalmente seriam interrompidas (Adaloudis; Bonnin Roca, 2021). Assim, em países com escassez de mão de obra, a adoção da tecnologia 3DCP pode ser uma solução eficaz para esse problema. Outro benefício social do 3DCP é que ele pode proporcionar locais de trabalho mais limpos e silenciosos, beneficiando as comunidades ao redor (Ibrahim *et al.*, 2022). No entanto, apesar da redução de custos proporcionada pela menor intervenção humana, essa automação coloca muitos empregos em risco, ameaçando a estabilidade social e o emprego, especialmente entre a população de baixa renda (El-Sayegh *et al.*, 2020).

Pode-se concluir, portanto, que o 3DCP ainda está em estágio inicial, com muitas questões sobre sua sustentabilidade a longo prazo permanecendo sem resposta. Do ponto de vista dos materiais, há incertezas significativas sobre o quanto misturas alternativas podem realmente mitigar esses impactos. Em termos de sustentabilidade ambiental, torna-se essencial realizar avaliações completas do ciclo de vida para determinar o impacto real da produção de matérias-primas utilizadas na impressão 3D.

CAPÍTULO 5

A UTILIZAÇÃO DE FÍLER CALCÁRIO EM CONCRETOS E ARGAMASSAS

A utilização de materiais residuais e subprodutos industriais na produção de concreto pode oferecer diversos benefícios ambientais. Elementos como vidro, tereftalato de polietileno (PET), cerâmica, tijolos de barro, pneus, resíduos de concreto, resíduos agrícolas, sílica ativa e cinza volante, entre outros, podem ser integrados à produção de concreto como substitutos parciais dos componentes tradicionais, reduzindo a demanda por matérias-primas virgens, preserva recursos naturais e diminui o descarte de grandes volumes de RCC. (Purchase *et al.*, 2022; Tu *et al.*, 2023).

A incorporação de materiais residuais e subprodutos industriais não só torna a produção de concreto mais sustentável, como também pode melhorar suas propriedades, aumentando resistência e durabilidade, o que resulta em materiais de construção de maior qualidade (Tu *et al.*, 2023).

Atualmente, como alternativa para mitigar os impactos decorrentes das elevadas emissões de CO₂ provenientes da produção do cimento, tem-se adotado o uso de adições minerais, inertes ou reativas, em substituição parcial ao cimento (Paulino; Toralles, 2019). Tais adições não apenas reduzem a pegada de carbono da construção, como também podem melhorar as propriedades físicas e a durabilidade do concreto (Khokhar *et al.*, 2010). Dentre essas alternativas, o uso de fíler calcário destaca-se como uma opção viável e sustentável, por ser um material amplamente disponível, de baixo custo e com potencial para proporcionar benefícios ambientais significativos (Feltrin; Isaia, 2018; Garcia; Mario, 2017).

As rochas calcárias, por serem as sedimentares mais abundantes na crosta terrestre, constituem a principal fonte para a obtenção do fíler calcário (FC), um material carbonático gerado como subproduto dos processos de britagem ou moagem dessas rochas (Isaia, 2021). Devido à sua finura, este material tem capacidade de promover dois efeitos distintos no concreto: um efeito físico e um efeito químico (Feltrin; Isaia, 2018). O efeito físico, também denominado “efeito fíler”, é mais evidente e está relacionado à melhoria no empacotamento granulométrico da matriz cimentícia, atuando como ponto de nucleação para os produtos de hidratação do cimento e contribuindo para a redução da porosidade da mistura (Dal Molin, 2011). Já o efeito químico, menos expressivo, envolve a formação de carboaluminatos, com influência no tempo de pega, e a incorporação do carbonato de cálcio (CaCO₃) à estrutura do

silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o que pode impactar a resistência mecânica (Battagin, 2011).

De modo geral, a literatura indica que a substituição do cimento por FC em teores entre 10% e 20% em concretos resulta em desempenho técnico satisfatório, com propriedades mecânicas e reológicas comparáveis às aquelas de misturas produzidas exclusivamente com cimento Portland (Isaia, 2021). No entanto, no contexto brasileiro, a utilização de FC na produção de cimentos é restrita a um limite máximo de 10%, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 16697:2018. Em contraste, normas internacionais, como a EM 197-1:2011, adotada em diversos países europeus, permitem a substituição de até 35%.

Diversos estudos têm investigado a viabilidade do uso do fíler calcário como adição mineral em distintas aplicações no setor da construção civil, abrangendo a produção de argamassas (Silva, 2008), concretos convencionais (Moura *et al.*, 2013) e misturas autoadensáveis (Galvão *et al.*, 2016; Queiroz, 2017).

No estudo conduzido por Paulino e Toralles (2019), foi investigado o uso de fíler calcário dolomítico na produção de argamassas autoadensáveis. Os resultados demonstraram melhora na fluidez e viscosidade das argamassas com a relação fíler/materiais secos de 0,25. Já Mercês (2017) investigou a aplicação do resíduo de serragem da pedra Cariri, um tipo de rocha calcária, como substituição parcial do agregado miúdo natural na formulação de concretos e argamassas autoadensáveis. Para as argamassas, foram avaliados teores de substituição de 5%, 10%, 15% e 20%, enquanto para os concretos foi adotado o teor de 10%. No estado fresco, observou-se aumento da coesão e da fluidez das misturas contendo o resíduo, enquanto no estado endurecido todas as composições apresentaram acréscimo na resistência à compressão axial, quando comparadas à mistura de referência com 5% de substituição. O autor atribui esses resultados à melhora na distribuição granulométrica dos materiais, o que resultou na redução dos vazios presentes nas misturas.

No estudo de Feltrin e Isaia (2018), os resultados indicaram que, quando utilizados conceitos de empacotamento de partículas, o FC pode melhorar a resistência à compressão, especialmente com baixas relações água/aglomerante e uso adequado de aditivos. Além disso, observou-se redução da permeabilidade por capilaridade, devido ao preenchimento de vazios e à densificação da matriz cimentícia, contribuindo para maior durabilidade do concreto. Apesar dos benefícios observados, o impacto do FC sobre as propriedades mecânicas do concreto ainda é considerado limitado, com estudos na literatura reportando tanto aumentos quanto reduções na resistência à compressão (Feltrin; Isaia, 2018).

Pesquisas anteriores, no entanto, apontam alguns resultados contraditórios quanto à substituição parcial do cimento por esse material. Itim *et al.* (2011), por exemplo, observaram redução na retração por secagem em argamassas com 25% de substituição até a idade de 28 dias; no entanto, após um ano de ensaio, os valores de retração foram praticamente equivalentes aos da amostra de referência. De modo semelhante, Garcia e Mario (2017) observaram que o aumento do volume de fíler na pasta resultou em menores valores de retração por secagem, efeito atribuído ao aumento da relação água/ligante e à consequente modificação na microestrutura da matriz cimentícia. Já Courard e Michel (2014) constataram que, com 23% de substituição, a retração por secagem não apresentou variações significativas, mas com 27%, foi observada redução na retração em comparação à amostra controle aos 28 dias.

No estudo de Reginato *et al.*, (2023), foi analisado o efeito da substituição parcial do agregado miúdo por calcário calcítico na formulação de argamassas de reparo, com foco nas propriedades mecânicas e na retração por secagem. Os autores avaliaram teores de substituição da areia por calcário calcítico, com dimensão inferior a 0,075 mm, nos percentuais de 0%, 5%, 15% e 30%. Os resultados indicaram que a incorporação do fíler calcítico promoveu aumento das propriedades mecânicas das argamassas, efeito associado à melhoria do empacotamento das partículas na matriz. Por outro lado, a influência sobre a retração por secagem foi pouco significativa, possivelmente em função do equilíbrio entre a densificação da matriz e o aumento da superfície específica promovido pela adição (Reginato *et al.*, 2023).

Diante dos estudos analisados, conclui-se que a utilização de fíler calcário, tanto como substituinte parcial do cimento quanto do agregado miúdo, representa uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável para a produção de concretos e argamassas. Os benefícios mais recorrentes estão associados à melhoria do empacotamento das partículas, à redução da porosidade e, consequentemente, ao incremento das propriedades mecânicas e da durabilidade dos materiais. No entanto, observa-se que os efeitos do fíler calcário sobre propriedades como retração por secagem ainda apresentam comportamentos variáveis, dependendo dos teores empregados, das características físicas do material e das condições de dosagem. De modo geral, quando corretamente dosado, o fíler calcário contribui para a melhoria do desempenho técnico dos materiais cimentícios, ao mesmo tempo em que promove a redução dos impactos ambientais relacionados à extração de matérias-primas e à produção de cimento.

CAPÍTULO 6

CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS PARA IMPRESSÃO 3D

A argamassa utilizada na impressão 3D demanda propriedades específicas, especialmente em seu estado fresco, diferentes daquelas das argamassas tradicionais. Primeiramente, o material deve apresentar uma consistência que permita a extrusão contínua e que possibilite manter sua forma após ser depositado na superfície de impressão, além de cada camada ser capaz de suportar o peso das camadas subsequentes sem sofrer deformações ou colapsos (Kazemian *et al.*, 2017). Paralelamente, para alcançar boas propriedades no estado endurecido, é essencial garantir uma boa aderência entre as camadas depositadas, o que aumenta a resistência estrutural do conjunto (Kazemian *et al.*, 2017).

Em geral, essas características se resumem a três parâmetros principais que devem ser considerados para concretos voltados para impressão 3D: trabalhabilidade e capacidade de extrusão, relacionadas à capacidade de impressão do material, e capacidade de construção (Alami *et al.*, 2023). A trabalhabilidade de uma mistura para impressão 3D de cimento é determinada pelo “tempo aberto”, o intervalo em que a mistura permanece viável para aplicação após o contato do cimento com a água (Alami *et al.*, 2023). A capacidade de extrusão, relacionada à capacidade de impressão do material, descreve o comportamento da mistura ao ser forçada a passar por um bico de impressão (Tu *et al.*, 2023). Finalmente, a capacidade de construção refere-se à possibilidade de empilhar o material em camadas sucessivas, mantendo sua estabilidade e forma, seja sobre uma base inicial ou sobre o próprio material previamente depositado (Alami *et al.*, 2023).

Nos últimos anos, a impressão 3D tem mostrado bons resultados ao utilizar a extrusão de materiais poliméricos em estado fluido que endurecem após a aplicação. Assim, a adaptação dessa técnica para materiais cimentícios, que também passam por uma transição de fase do estado fresco ao endurecido, surge como uma extensão natural (Wangler *et al.*, 2016). No entanto, a argamassa ou concreto convencional, em geral, por exemplo, apresentam maior trabalhabilidade e maior abatimento, enquanto os materiais para 3DPC exigem menor trabalhabilidade e um tempo de pega rápido (Fonseca; Matos, 2023).

Assim, a dosagem das misturas é fundamental para o sucesso de um projeto de 3DCP. Ela influencia diversas propriedades reológicas que são essenciais tanto para o processo de impressão quanto para as características da estrutura final (Tu *et al.*, 2023). O desenvolvimento de uma mistura para 3DPC requer, portanto: (i) menor teor de agregados,

com uma relação de peso agregado-aglutinante menor que 1,0; (ii) maior quantidade de materiais em pó fino (cimento e materiais cimentícios suplementares); e (iii) o uso de diferentes tipos de aditivos (Fonseca; Matos, 2023).

Fatores como reologia, capacidade de extrusão, capacidade de construção, capacidade de bombeamento e resistência precisam ser cuidadosamente considerados para o desenvolvimento de um concreto adequado para impressão. Aumentar o teor de cimento tem sido uma solução comum para atender a esses requisitos; no entanto, o uso elevado de cimento pode gerar problemas críticos, como rachaduras de retração, sendo necessário aplicar diferentes aditivos minerais ou químicos para aprimorar o desempenho do concreto imprimível (Han *et al.*, 2021).

6.1 CAPACIDADE DE IMPRESSÃO

Como mencionado, a capacidade de impressão descreve a habilidade de um material ser bombeado e extrudado de forma rápida e confiável através de um sistema de impressão. Essa propriedade é crucial para os projetos de 3DCP, pois determina a forma final e a qualidade da estrutura impressa. No entanto, a avaliação da capacidade de impressão ainda não conta com testes de referência ou normas padronizadas, sendo geralmente realizada por meio de métodos de inspeção visual (Buswell *et al.*, 2018; Guamán-Rivera *et al.*, 2022).

Como fator constituinte da capacidade de impressão, tem-se a capacidade de bombeamento, que se refere à facilidade com que a mistura fresca é transportada da bomba até o bico de extrusão. Misturas inadequadas para bombeamento podem apresentar problemas de segregação de partículas na mangueira, o que pode resultar em bloqueios e entupimentos nas mangueiras ou no bico de impressão. (Buswell *et al.*, 2018).

A análise da capacidade de bombeamento pode ser realizada por meio do ajuste da pressão de extrusão da bomba e da configuração do bico de impressão empregado, uma vez que esses parâmetros operacionais influenciam diretamente os resultados obtidos (Robayo-Salazar *et al.*, 2023). No entanto, nota-se que o comportamento fluido da mistura e suas propriedades reológicas têm um impacto significativo e diverso nas etapas de bombeamento e extrusão. Entender e controlar essas propriedades é crucial para garantir o sucesso do 3DCP, fazendo com que haja um aumento considerável de estudos sobre a capacidade de extrusão de materiais cimentícios (Tu *et al.*, 2023).

Em pesquisas recentes, já foi possível constatar que a capacidade de impressão é afetada principalmente pela quantidade e distribuição dos componentes secos na mistura, exigindo,

assim, uma reologia adequada dos agregados (Guamán-Rivera *et al.*, 2022). As misturas padrão de concreto, por exemplo, que contêm altas quantidades de agregados grossos, não conseguiriam passar pelo bico de extrusão, que, em geral, é muito estreito para acomodar o tamanho desses agregados.

Para superar essa limitação, a composição de argamassas para 3DCP geralmente inclui, além de cimento e água, uma grande proporção de agregados finos que necessitam de uma distribuição de partículas cuidadosamente avaliadas para garantir as propriedades mecânicas apropriadas da mistura (Pessoa *et al.*, 2021). Por meio de uma dosagem adequada da mistura, o emprego de agregados com diferentes granulometrias contribui para a densificação da microestrutura, ao preencher os vazios existentes entre as partículas, promovendo maior compactação do material. Além disso, esses materiais de enchimento atuam como agentes lubrificantes, reduzindo a aglomeração das partículas de cimento e favorecendo a fluidez da mistura no estado fresco (Robayo-Salazar *et al.*, 2023).

Do ponto de vista econômico, aumentar a quantidade de agregado em uma mistura reduz o custo de produção, considerando a facilidade de obtenção desses materiais. Além disso, a estrutura grosseira dos grãos utilizados afeta a textura final da mistura de concreto, permitindo ajustes para alcançar acabamentos específicos (Alami *et al.*, 2023). Da mesma forma, a dosagem de aditivos minerais e químicos, como superplastificantes e incorporadores de ar, bem como a adição de fibras, também são fatores importantes relacionados a esse parâmetro (Guamán-Rivera *et al.*, 2022).

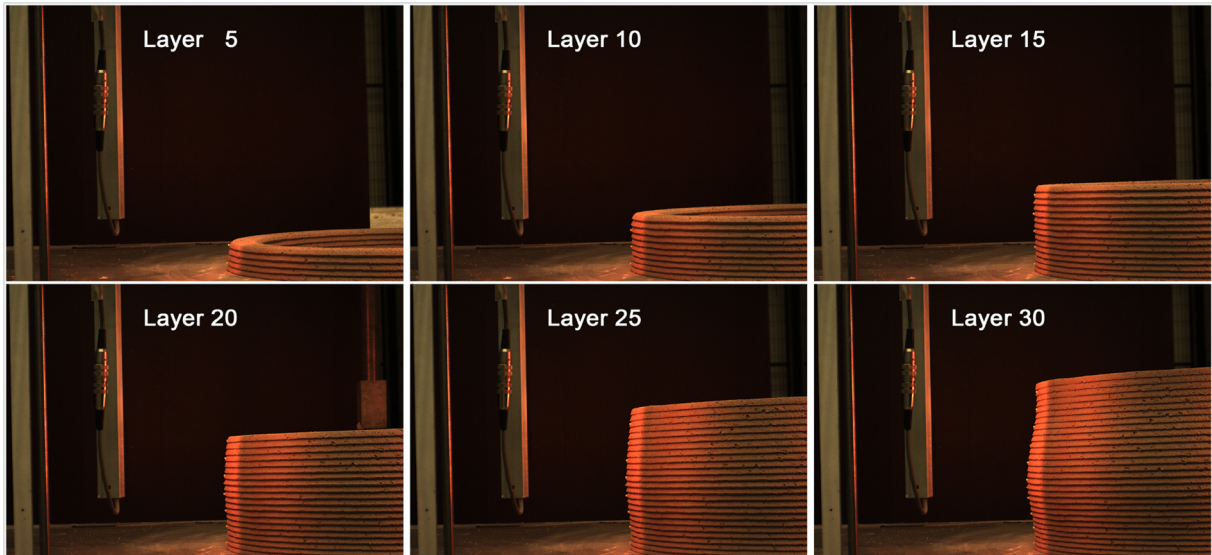
6.2 CAPACIDADE DE CONSTRUÇÃO

Diferentemente do sistema tradicional de viga e pilar, nos processos de 3DCP as próprias paredes assumem a função de suporte estrutural e devem ser autossustentáveis, uma vez que não se utiliza fôrma. Portanto, o material impresso e suas propriedades, que servem como base para os cálculos do projeto, precisam ser adequadamente considerados para garantir o sucesso da estrutura impressa (Pessoa *et al.*, 2021).

Dentro deste contexto, a capacidade de construção pode ser definida como a habilidade do material fresco de manter sua forma e restringir a deformação estrutural, a fim de evitar o colapso durante os processos de 3DCP (Guamán-Rivera *et al.*, 2022; Tu *et al.*, 2023) (Figura 14). Dessa forma, as propriedades reológicas do material cimentício devem garantir uma deposição precisa e a estabilidade da geometria logo após a aplicação, apresentando resistência adequada para suportar o peso das camadas subsequentes sem ocorrer colapso

estrutural. Ao mesmo tempo, o material deve possibilitar uma boa aderência entre as camadas adjacentes, assegurando a integridade do elemento impresso (Robayo-Salazar *et al.*, 2023).

Figura 14 - Configuração experimental para monitorar deformações e falhas durante o processo de impressão



Fonte: Wolfs *et al.*, 2018

É natural e esperado que o processo de deposição cause uma leve deformação controlada no filamento, o que contribui para a adesão à camada anterior (Buswell *et al.*, 2018). No entanto, a baixa tensão de escoamento necessária para o bombeamento contrasta com a exigência de que o filamento impresso mantenha sua geometria após a aplicação, destacando a importância de um cuidadoso ajuste das misturas (Buswell *et al.*, 2018).

Neste contexto, considerando que as propriedades reológicas da mistura influenciam diretamente sua capacidade de construção, um equilíbrio ideal de viscosidade, tensão de escoamento, tixotropia e comportamento de afinamento por cisalhamento é necessário para imprimir concreto com sucesso (Tu *et al.*, 2023). Assim, a adição de modificadores adequados, como sílica ativa ou nanoargila, pode ajudar a obter a viscosidade e o esforço normal apropriados, proporcionando as propriedades reológicas necessárias para que a mistura flua corretamente e atinja a estabilidade de forma adequada (Guamán-Rivera *et al.*, 2022).

Em relação às propriedades reológicas da mistura para 3DCP, Alami *et al.* (2023) observaram que a adição de nanosílica aumentou o limite de escoamento inicial e a taxa de acúmulo tixotrópico da pasta de cimento. No entanto, surgiu uma limitação imposta pelas velocidades máxima e mínima de impressão, que precisou ser mitigada com o uso de aditivos aceleradores (Alami *et al.*, 2023).

Fatores relacionados ao projeto, como a geometria do elemento e a quantidade de camadas aplicadas (altura da impressão), podem afetar a capacidade construtiva do material cimentício, devendo também serem levados em consideração durante a avaliação e o desenvolvimento da mistura (Robayo-Salazar *et al.*, 2023). O comprimento do caminho de extrusão e a velocidade de deposição do material, por exemplo, são fatores essenciais que influenciam tanto o tempo de produção do componente quanto o intervalo necessário para sobrepor camadas, o que impacta a resistência da ligação entre as camadas e podem favorecer a ocorrência de juntas frias (Wangler *et al.*, 2016).

Assim, mostra-se necessário realizar testes com a mistura antes do início dos trabalhos de impressão. Embora não haja padronização para esses testes, Tu *et al.* (2023) apontam, com base na análise de diversos estudos, que, para avaliar a capacidade de construção de uma mistura de concreto fresco, é comum medir o número de camadas ou a altura do objeto impresso, garantindo que não haja deformação perceptível.

6.3 TEMPO ABERTO

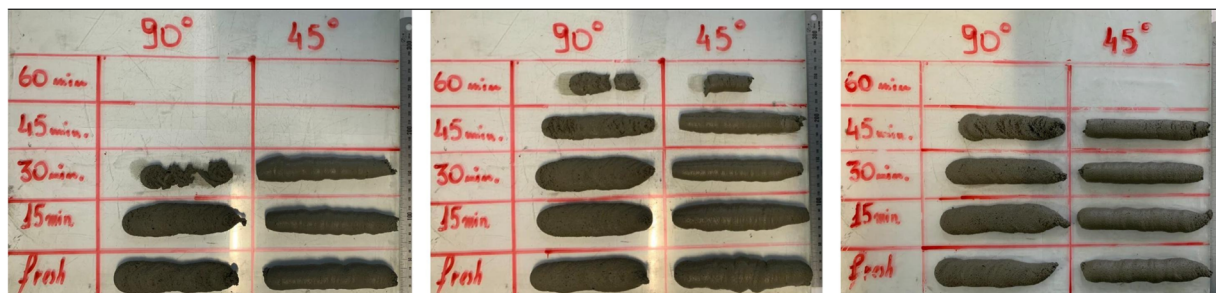
Para as misturas convencionais, o termo "tempo aberto" está relacionado à perda de abatimento do concreto. No contexto do 3DCP, o tempo aberto refere-se ao período em que há a manutenção da viscosidade e da tensão de escoamento da mistura, fatores críticos para o processo de impressão (Buswell *et al.*, 2018). Em resumo, trata-se do intervalo em que a pasta pode ser extrudada com a plasticidade adequada, gerando camadas estáveis e consistentes que mantêm sua forma (Lim *et al.*, 2012). Esse tempo está diretamente relacionado à trabalhabilidade da mistura e ao processo de hidratação do cimento, que, à medida que perde água, reduz a trabalhabilidade e fluidez (Guamán-Rivera *et al.*, 2022).

De maneira ideal, o tempo de pega deve ser equilibrado, sendo suficientemente longo para permitir o fluxo contínuo do material pelos tubos de bombeamento e, simultaneamente, curto o bastante para que, após a deposição, o material desenvolva resistência adequada para sustentar as camadas subsequentes (Robayo-Salazar *et al.*, 2023). Um tempo de pega reduzido em excesso pode prejudicar a aderência entre as camadas, comprometendo a resistência mecânica do elemento impresso. Por outro lado, um tempo de pega muito elevado afeta negativamente a capacidade construtiva, podendo ocasionar deslizamentos e até o colapso da estrutura durante o processo de impressão (Robayo-Salazar *et al.*, 2023).

O tempo aberto está fortemente associado a uma "janela de operação" em que um volume específico de material precisa ser extrudado (Figura 15). Esse processo é, além de outros fatores, influenciado pelo volume do componente a ser impresso e pela área da superfície de

trabalho, que determina o comprimento total do material depositado em cada camada (Buswell *et al.*, 2018). Dessa forma, o ajuste do tempo de pega da mistura deve considerar fatores como as dimensões do elemento a ser impresso e o intervalo de tempo entre a deposição das camadas. Para atender a essas exigências, é possível modificar o tempo de pega das misturas cimentícias por meio da adição de aditivos aceleradores, que reduzem esse tempo, ou retardadores, que promovem seu prolongamento (Robayo-Salazar *et al.*, 2023).

Figura 15 - Alteração na geometria do filamento extrudado conforme variação do tempo



Fonte: Soares *et al.* 2023

Outro fator que influencia a trabalhabilidade da mistura é a evaporação do teor de água sob condições ambientais específicas, como temperatura, umidade e vento (Guamán-Rivera *et al.*, 2022). Além disso, durante a mistura, o tempo aberto tixotrópico é, em geral, maior enquanto a mistura permanece sem movimento e, portanto, o tempo de preparo e extrusão possui limites que também precisam ser considerados e encontrados por meio de testes experimentais (Le *et al.*, 2012; Robayo-Salazar *et al.*, 2023).

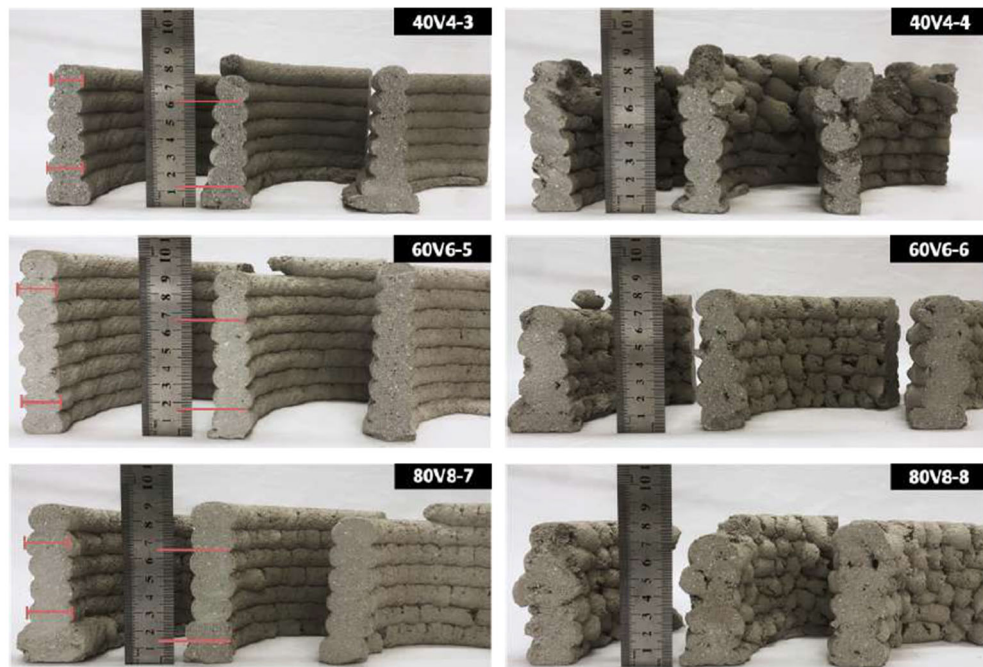
Kazemian *et al.* (2017) identificam um segundo tempo crítico para a impressão 3D em concreto, denominado "limite de bloqueio". Este se refere ao momento em que o concreto deixa de ser extrudado pelo bico de impressão, e um atraso prolongado poderia levar à solidificação da mistura e potencial dano ao bico (Kazemian *et al.*, 2017). Dessa forma, o primeiro instante em que os critérios de qualidade de impressão não forem atendidos marcaria o final do tempo aberto e o primeiro momento em que o concreto não puder mais ser extrudado registraria o limite de bloqueio (Kazemian *et al.*, 2017).

6.4 FATOR DE RETENÇÃO DE FORMA

Assim como a capacidade de impressão, a retenção da forma é essencial para a 3DCP (Figura 16). Após a extrusão, o material deve manter as dimensões impostas pela extrusora, o que é quantificado por meio de um fator adimensional de retenção de forma (Weng *et al.*, 2018). Três principais fontes de deformação impactam uma camada depositada: o peso próprio da

camada, o peso das camadas subsequentes impressas sobre ela e a pressão gerada durante a extrusão (Kazemian *et al.*, 2017).

Figura 16 - Avaliação da variação de largura e índice de altura das argamassas



Fonte: Araújo, 2024

Para alcançar um alto fator de retenção de forma, o concreto precisa apresentar baixo abatimento e alto limite de escoamento, garantindo estabilidade sob o próprio peso (Guamán-Rivera *et al.*, 2022). Na prática, testes de estabilidade têm demonstrado que estruturas multicamadas impressas em 3D inevitavelmente se expandem e deslizam verticalmente durante o empilhamento e endurecimento (Chen *et al.*, 2021). Observa-se também que o aumento no teor de agregado e a redução correspondente na pasta resultam em menor densidade interna, o que torna a mistura menos fluida e mais suscetível à deformação (Chen *et al.*, 2021). Além disso, a relação água/ligante influencia o grau de deslizamento e deformação do concreto durante e após o processo de impressão (Chen *et al.*, 2021).

6.5 CONTROLE DE RETRAÇÃO

Os materiais cimentícios empregados na 3DCP estão sujeitos a fenômenos de retração provocados pela secagem, o que pode levar ao aparecimento de fissuras e trincas. Essas manifestações comprometem não apenas a estética dos elementos impressos, mas também seu desempenho mecânico, além de favorecer possíveis desprendimentos entre as camadas depositadas (Robayo-Salazar *et al.*, 2023). A retração é um fator crítico que tem sido relacionada ao desempenho e a durabilidade do concreto impresso, uma vez que, quando

ocorre, impacta a precisão dimensional e a construtibilidade do concreto em seu estado endurecido (Lim *et al.*, 2012).

Esse fenômeno pode ser intensificado pela quantidade elevada de cimento necessária nas misturas para 3DCP e, na ausência de fôrmas durante as primeiras horas de cura, a perda excessiva de água por evaporação aumentaria o risco de contração durante o processo de pega e o endurecimento inicial da mistura (Guamán-Rivera *et al.*, 2022).

A retração é, em parte, atribuída ao alto teor de agregados finos e à baixa relação água/ligante das misturas, o que torna essencial a incorporação de superplastificantes como forma de compensação (Panda *et al.*, 2019). Felizmente, pesquisas indicam que o uso de fibras e certas adições minerais pode ser uma abordagem eficaz para controlar a retração, proporcionando uma solução viável para melhorar o desempenho das misturas impressas (Robayo-Salazar *et al.*, 2023; Rubio *et al.*, 2017).

Estudos apontam que a direção de impressão pode influenciar significativamente a retração do material impresso. Em uma análise de argamassa reforçada com fibras de PVA, a retração por secagem ao ar aos 56 dias revelou uma diferença de 27% entre as duas direções de impressão: amostras impressas na direção paralela às fibras mostraram menor deformação em comparação com aquelas impressas na direção perpendicular (Aslani *et al.*, 2022). Assim, muitos fatores influenciam a retração da mistura em 3DCP e precisam ser cuidadosamente avaliados.

6.6 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Em aplicações estruturais, o desempenho mecânico do material é crucial. Embora o concreto seja o material estrutural mais utilizado, ele ainda apresenta fragilidade e, nos materiais cimentícios impressos em 3D, exibe comportamento anisotrópico, com resistência dependente da direção de deposição das camadas (Aslani *et al.*, 2022; Robayo-Salazar *et al.*, 2023). Estudos mostram que as melhores propriedades mecânicas são alcançadas na direção paralela à impressão (longitudinal), enquanto as propriedades na direção perpendicular (90°) são consideravelmente menores (Robayo-Salazar *et al.*, 2023).

Os ensaios de desempenho mecânico também indicam que a variação de resistência em função da direção de impressão está associada à distribuição não uniforme dos vazios no material (Chen *et al.*, 2021). Como não há fôrmas, a vibração para eliminar bolsas de ar não pode ser aplicada. Dessa forma, a liberação dessas bolsas depende exclusivamente da

pressão mecânica exercida durante o processo de extrusão, o que pode resultar em falhas no filamento impresso (Aslani *et al.*, 2022).

Uma forma de reduzir esse comportamento anisotrópico é a adição de fibras curtas dispersas aleatoriamente, que tem se mostrado uma das soluções mais eficazes, desempenhando um papel importante no desenvolvimento de compósitos cimentícios com propriedades avançadas (Aslani *et al.*, 2022; Robayo-Salazar *et al.*, 2023). Mesmo assim, a introdução de reforços de fibra requer uma cuidadosa otimização do projeto da mistura.

Embora a adição de fibras possa melhorar significativamente as propriedades do material impresso, ela pode também afetar negativamente a capacidade de impressão, especialmente em misturas com mais de 1,5% de fibras em volume (Hambach *et al.*, 2019). Em concentrações elevadas, é comum observar bloqueios e entupimentos no bico da impressora, comprometendo a fluidez e a consistência do processo de extrusão (Hambach *et al.*, 2019).

Materiais de reforço como aço, entre outros, também podem ser utilizados para melhorar as características no projeto, principalmente relacionadas à resistência à tração. Esses reforços são incorporados à medida que o projeto é impresso e são essenciais para muitas aplicações práticas (Buswell *et al.*, 2018). No entanto, adicionar reforços ao longo do processo de impressão 3D apresenta desafios significativos: os reforços podem ser inseridos paralelamente às camadas, necessitando de encapsulamento, ou podem precisar ser posicionados perpendicularmente, o que é ainda mais complexo (Buswell *et al.*, 2018).

Embora as misturas impressas apresentem valores de resistência adequados, o material é utilizado estruturalmente em poucos casos (Bos *et al.*, 2022). Na maioria das aplicações, ele é empregado de forma não estrutural, para estruturas de concreto convencional, devido às regulamentações existentes em muitas regiões. Em situações onde ocorre o uso estrutural isso se dá pela isenção de testes específicos por parte dos órgãos regulamentadores locais (Bos *et al.*, 2022). A ausência de métodos de reforço adequados também permanece como um desafio, levando à aplicação de analogias com alvenaria não reforçada, o que frequentemente dificulta a implementação da tecnologia (Bos *et al.*, 2022).

CAPÍTULO 7

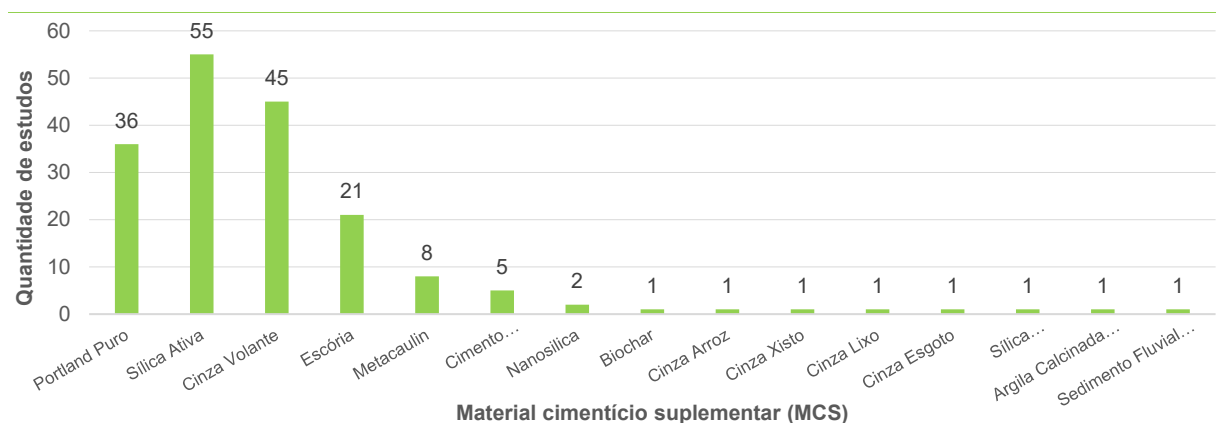
ARGAMASSAS PARA 3DCP - UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Com base no exposto até o momento, fica evidente que o desempenho do material utilizado é um fator crucial para o sucesso ou fracasso de projetos de 3DCP. Para compreender melhor as direções que as pesquisas nessa área têm seguido, foi realizada uma revisão sistemática da literatura (RSL). O objetivo desta revisão foi identificar os principais traços de argamassas empregados na impressão 3D para a construção civil, além de analisar as adições e aditivos utilizados para melhorar o desempenho dos materiais. Adicionalmente, buscou-se mapear as formulações que se destacaram em termos de resistência mecânica, trabalhabilidade e estabilidade dimensional, com a finalidade de apoiar o desenvolvimento de composições mais eficientes e sustentáveis para a impressão 3D na construção civil. A metodologia adotada e as informações referentes aos dados bibliométricos levantados encontram-se descritas no APÊNDICE A deste trabalho.

7.1 ANÁLISE DOS LIGANTES

Analisando o conteúdo dos artigos, foi possível levantar um total de 1.085 misturas descritas nos trabalhos. A Figura 17 um gráfico de barras da distribuição dos estudos segundo o tipo de material cimentício suplementar (MCS) empregado nas misturas, conforme a classificação adotada pelos autores de cada artigo. Dos 121 estudos analisados, 36 não utilizaram MCS como substituição ao cimento Portland, enquanto 85 fizeram uso de pelo menos um material suplementar. Ao todo, foram identificados 14 tipos distintos de MCS nas pesquisas, empregados com o objetivo de modificar propriedades reológicas, mecânicas e/ou relacionadas à sustentabilidade das misturas.

Figura 17 - Distribuição dos estudos por tipo de material cimentício suplementar (MCS)



Fonte: Autoria própria, 2026

O Quadro 2 apresenta a relação detalhada dos ligantes identificados, associando-os aos respectivos estudos e autores que os utilizaram. Essa análise reforça a ampla diversidade de abordagens e a transversalidade da pesquisa em misturas cimentícias, evidenciando o crescente interesse em soluções que aliam inovação, desempenho e sustentabilidade.

Quadro 2 - Relação de materiais cimentícios suplementares levantados e respectivos autores

(continua)

LIGANTE	AUTORES
Cimento Portland puro	Al Thib <i>et al.</i> , (2023); Álvarez-Fernández <i>et al.</i> , (2021); Araújo <i>et al.</i> , (2022); Cuevas <i>et al.</i> , (2021, 2024); Daher <i>et al.</i> , (2023); Ding <i>et al.</i> , (2020a, 2020b); Dulaj <i>et al.</i> , (2022); Giwa <i>et al.</i> , (2023); Hou <i>et al.</i> , (2021, 2024); Lesovik <i>et al.</i> , (2021, 2022); Li <i>et al.</i> , (2023a, 2023b); Li e Tier, (2023); Martins <i>et al.</i> , (2021); Pimentel Tinoco <i>et al.</i> , (2023); Rama Krishana <i>et al.</i> , (2024); Rangel <i>et al.</i> , (2024); Robayo-Salazar <i>et al.</i> , (2023a, 2024); Sergis e Ouellet-Plamondon, (2022); Shoaie <i>et al.</i> , (2024); Soares <i>et al.</i> , (2023); Spurina <i>et al.</i> , (2022); Sun <i>et al.</i> , (2022); Ungureanu <i>et al.</i> , (2023); Wang <i>et al.</i> , (2021); Wang <i>et al.</i> , (2021b); Xu <i>et al.</i> , (2023b, 2023c); Zhang e Xiao, (2021); Zhou <i>et al.</i> , (2024); Zou <i>et al.</i> , (2023)
Cinzas volantes	Ambily <i>et al.</i> , (2024); Bai <i>et al.</i> , (2023); Chougan <i>et al.</i> , (2024); Christen <i>et al.</i> , (2022); Colyn <i>et al.</i> , (2024); Cui <i>et al.</i> , (2024); Daniel Oosthuizen <i>et al.</i> , (2023); Federowicz <i>et al.</i> , (2023); Giridhar <i>et al.</i> , (2023); Gou <i>et al.</i> , (2024); Kaszyńska <i>et al.</i> , (2020); Kaushik <i>et al.</i> , (2022, 2023a, 2023b); Kilic <i>et al.</i> , (2023); Kim <i>et al.</i> , (2019); Klyuev <i>et al.</i> , (2022); Liu <i>et al.</i> , (2023a); Liu <i>et al.</i> , (2022); Long <i>et al.</i> , (2019); Ma <i>et al.</i> , (2018); Ogura <i>et al.</i> , (2018); Panda <i>et al.</i> , (2019); Pantiru <i>et al.</i> , (2023); Şahin <i>et al.</i> , (2024a, 2024b); Singh <i>et al.</i> , (2023); Skibicki <i>et al.</i> , (2022a, 2022b, 2024); Sonebi <i>et al.</i> , (2021); Sukontasukkul <i>et al.</i> , (2024); Ting <i>et al.</i> , (2019); Wang <i>et al.</i> , (2022a, 2022b); Xiong <i>et al.</i> , (2024); Xu <i>et al.</i> , (2024, 2022b); Yan <i>et al.</i> , (2024); Yang <i>et al.</i> , (2022); Ye <i>et al.</i> , (2023); Yu <i>et al.</i> , (2021); Zafar <i>et al.</i> , (2023); Zhang e Aslani, (2021); Zhu <i>et al.</i> , (2019, 2023)
Sílica ativa	Ali <i>et al.</i> , (2024); Ambily <i>et al.</i> , (2024); Arunothayan <i>et al.</i> , (2020, 2023); Bai <i>et al.</i> , (2023); Chougan <i>et al.</i> , (2024); Christen <i>et al.</i> , (2022); Chu <i>et al.</i> , (2021); Çitek <i>et al.</i> , (2024); Colyn <i>et al.</i> , (2024); Cui <i>et al.</i> , (2024); Daniel Oosthuizen <i>et al.</i> , (2023); Federowicz <i>et al.</i> , (2023); Giridhar <i>et al.</i> , (2023); Gou <i>et al.</i> , (2024); Hojati <i>et al.</i> , (2022); Kaszyńska <i>et al.</i> , (2020); Kilic <i>et al.</i> , (2023); Kim <i>et al.</i> , (2019); Liu <i>et al.</i> , (2023a, 2022, 2024, 2023b); Liu <i>et al.</i> , (2022); Long <i>et al.</i> , (2019); Ma <i>et al.</i> , (2018); Niu <i>et al.</i> , (2024); Ogura <i>et al.</i> , (2018); Pantiru <i>et al.</i> , (2023); Pham <i>et al.</i> , (2020); Sambucci e Valente, (2021); Skibicki <i>et al.</i> , (2022a, 2022b, 2024); Sukontasukkul <i>et al.</i> , (2024); Ting <i>et al.</i> , (2019); Tran <i>et al.</i> , (2024); van Overmeir <i>et al.</i> , (2022, 2023); Wang <i>et al.</i> , (2022a, 2021a, 2022b); Xiong <i>et al.</i> , (2024); Xu <i>et al.</i> , (2022a); Xu <i>et al.</i> , (2024); Yang <i>et al.</i> , (2022); Ye <i>et al.</i> , (2023); Zafar <i>et al.</i> , (2023); Zhang <i>et al.</i> , (2019a, 2018, 2019b); Zhang e Aslani, (2021); Zhao <i>et al.</i> , (2021); Zhu <i>et al.</i> , (2023, 2024)
Escória de alto forno	Ambily <i>et al.</i> , (2024); Colyn <i>et al.</i> , (2024); Cui <i>et al.</i> , (2024); Hanratty <i>et al.</i> , (2024); Hojati <i>et al.</i> , (2022); Liu <i>et al.</i> , (2024); Liu <i>et al.</i> , (2022); Mohan <i>et al.</i> , (2021); Natanzi e McNally, (2023); Pham <i>et al.</i> , (2020); Qian <i>et al.</i> , (2022); Sukontasukkul <i>et al.</i> , (2024); Tarhan e Şahin, (2021); van der Putten <i>et al.</i> , (2021); van Overmeir <i>et al.</i> , (2022, 2023); Wang <i>et al.</i> , (2022a); Xiong <i>et al.</i> , (2024); Xu <i>et al.</i> , (2022b); Ye <i>et al.</i> , (2023); Zafar <i>et al.</i> , (2023)
Metacaulim	Chu <i>et al.</i> , (2021); Colyn <i>et al.</i> , (2024); Duan <i>et al.</i> , (2022); Hojati <i>et al.</i> , (2022); Slavcheva <i>et al.</i> , (2021); Tarhan e Şahin, (2021); Vergara e Colorado, (2020); Zafar <i>et al.</i> , (2023)
Cimento Sulfoaluminoso	Kilic <i>et al.</i> , (2023); Xu <i>et al.</i> , (2022b); Zhao <i>et al.</i> , (2021); Zhu <i>et al.</i> , (2019, 2023)
Cinza de casca de arroz	Muthukrishnan <i>et al.</i> , (2020)
Cinza de xisto	Butkute <i>et al.</i> , (2023)
Cinza de lixo municipal	Rehman <i>et al.</i> , (2020)
Cinza de esgoto	Ding <i>et al.</i> , (2024)
Nanosílica	Xu <i>et al.</i> , (2023a); Zhang <i>et al.</i> , (2019a)
Sílica nanoestruturada	Liu <i>et al.</i> , (2023b)
Argila calcinada de calcário	Ibrahim <i>et al.</i> , (2023)
Biochar	Falliano <i>et al.</i> , (2022)

Quadro 2 - Relação de materiais cimentícios suplementares levantados e respectivos autores

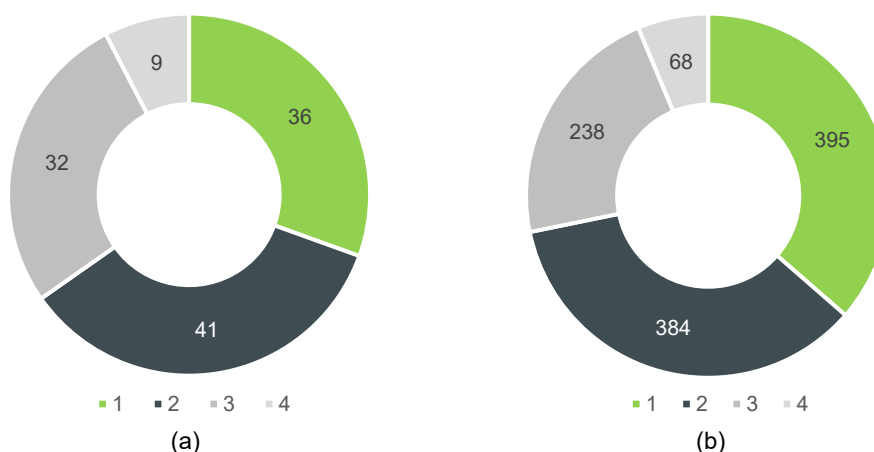
LIGANTE	AUTORES
Sedimento fluvial calcinado	Daher <i>et al.</i> , (2022)

(conclusão)

Fonte: Autoria própria, 2026

Observa-se que uma parcela significativa dos autores utilizou sílica ativa (55 estudos) e/ou cinzas volantes (45 estudos) em suas investigações, seguidos pela escória de alto forno, presente em 21 estudos, e pelo metacaulim, citado em 8 estudos. Os demais MCS foram mencionados apenas em trabalhos pontuais, com menor frequência. Essa distribuição reflete uma preferência por materiais amplamente reconhecidos e estudados, como a sílica ativa e as cinzas volantes, devido às suas propriedades comprovadas de melhoria das características reológicas e mecânicas das misturas cimentícias para 3DCP. Embora os demais MCS analisados tenham demonstrado viabilidade em suas aplicações, o número limitado de estudos para cada material indica a necessidade de pesquisas adicionais. Investigações futuras são essenciais para explorar o potencial desses materiais em 3DCP, ampliando o entendimento sobre seu desempenho e contribuindo para o desenvolvimento de misturas mais eficientes e diversificadas.

A Figura 18 apresenta a distribuição dos estudos segundo o número de ligantes utilizados, bem como a classificação das misturas quanto à sua composição.

Figura 18 - (a) Distribuição dos estudos por número de ligantes; e (b) classificação das misturas por composição

Fonte: Autoria própria, 2026

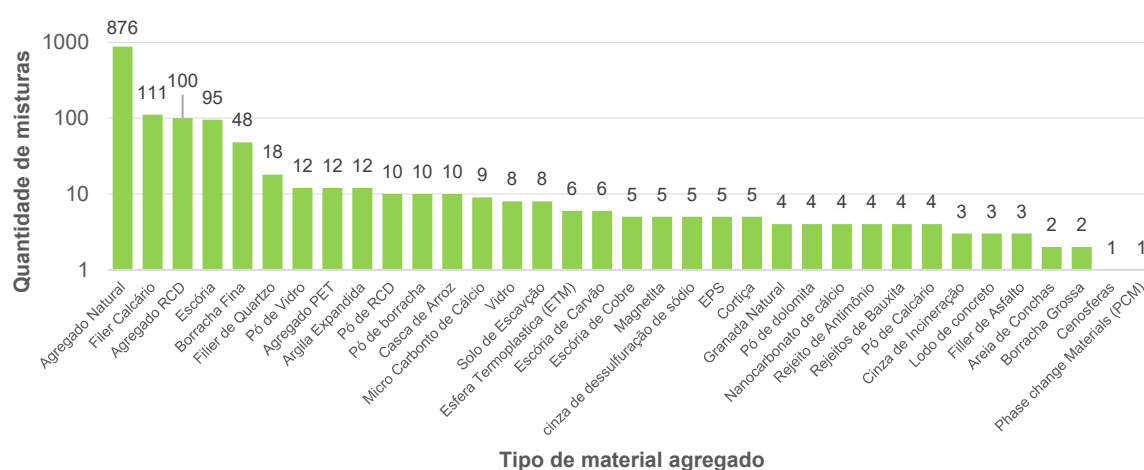
No que se refere aos ligantes, observa-se que 41 estudos avaliaram dois ligantes (cimento Portland e MCS), enquanto 32 trabalhos analisaram misturas contendo três, e 9 estudos exploraram misturas com quatro ligantes (Figura 18a). Do ponto de vista da composição das misturas, 36% correspondem a misturas simples, contendo apenas cimento Portland como

ligante, 35% são misturas binárias, 22% são misturas ternárias e 6% envolvem composições quaternárias (Figura 18b). Esses dados evidenciam uma predominância de estudos focados em combinações simples ou binárias, embora as misturas ternárias e quaternárias também demonstrem potencial de aplicação e mereçam maior atenção em investigações futuras, dado seu impacto na complexidade e no desempenho das misturas cimentícias.

7.2 ANÁLISE DOS AGREGADOS E FIBRAS

Identificou-se um total de 35 tipos de agregados avaliados nas investigações, os quais foram agrupados conforme sua origem e composição (Figura 19). Entre os agregados naturais e reciclados, destacam-se o agregado natural (principalmente areia de rio lavada), filer calcário, agregados provenientes de Resíduos de Construção Civil (RCC), escória e borracha.

Figura 19 - Relação dos principais agregados utilizados nas misturas



Fonte: Autoria própria, 2026

Materiais derivados de resíduos ou industriais incluem a cinza de dessulfuração de sódio, cinza de incineração, rejeitos de antimônio e de bauxita, além do lodo de concreto. Quanto aos materiais à base de borracha, foram identificados o pó de borracha, borracha de granulação fina e de granulação grossa. Entre os fileres e pós estão o filer de asfalto, filer calcário, filer de quartzo, pó de calcário, pó de RCC, nanocarbonato de cálcio, microcarbonato de cálcio e o pó de dolomita. Escórias e resíduos de processos industriais incluem a escória de ferro, escória de carvão e a escória de cobre. No grupo de materiais avançados ou específicos, destacam-se as cenosferas, as esferas termoplásticas (ETM), o EPS (poliestireno expandido) e os materiais de mudança de fase (PCM).

Além disso, materiais vítreos e derivados incluem o vidro e o pó de vidro, enquanto os materiais de origem vegetal identificados incluem a casca de arroz e a cortiça. Essa ampla

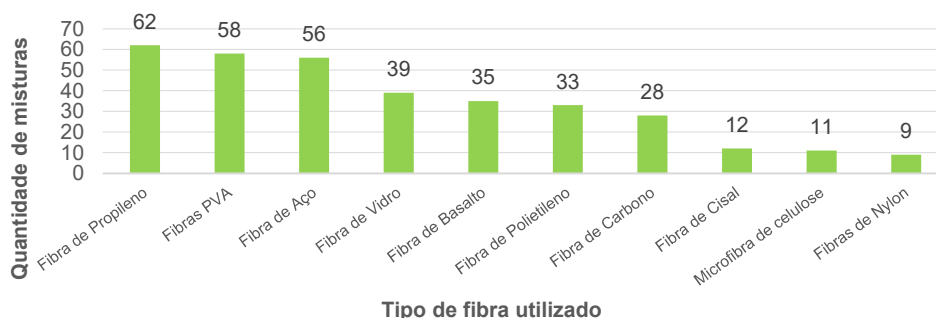
gama de agregados evidencia a diversidade de abordagens na composição de misturas cimentícias, com destaque para o crescente interesse por materiais sustentáveis e provenientes de resíduos industriais e reciclados, buscando alinhar eficiência técnica à sustentabilidade ambiental.

Mesmo assim, areia natural permanece como o agregado mais amplamente utilizado, sendo empregada em 876 misturas (80% do total). Esse dado reflete a dificuldade em substituir completamente a areia por outros tipos de agregados sem comprometer as características fundamentais de uma mistura adequada para 3DCP. Em segundo lugar, destaca-se o *fíler* calcário, utilizado em 111 misturas (10%), demonstrando eficácia no preenchimento dos vazios das misturas e contribuindo para melhorias tanto no desempenho mecânico quanto nas propriedades reológicas.

Entre os materiais reciclados, que têm ganhado atenção em estudos recentes, sobressaem-se a escória de ferro (95 amostras), os agregados de borracha moída ou em pó (60 amostras) e o pó de vidro (12 amostras). Um destaque especial é atribuído aos agregados provenientes de RCC, presentes em 100 misturas (9%). Ao todo, 19 autores investigaram os efeitos desses agregados nas propriedades de misturas destinadas à impressão 3D e evidenciaram seu potencial promissor para uso sustentável na construção civil.

No contexto da utilização de fibras como reforço nas misturas para 3DCP, verificou-se que 343 misturas incorporaram algum tipo de fibra. A Figura 20 apresenta a distribuição de misturas pelo tipo de fibra utilizado. Dentre as mais empregadas, destacaram-se as fibras de polipropileno, presentes em 62 misturas, seguidas pelas fibras de PVA (58 misturas), fibras de aço (56 misturas), fibras de vidro (39 misturas), fibras de basalto (35 misturas), fibras de polietileno (33 misturas), e fibras de carbono (28 misturas). Além disso, materiais menos comuns, como fibras de sisal (12 misturas), microfibras de celulose (11 misturas) e fibras de nylon (9 misturas), também foram explorados em menor escala.

Figura 20 – Tipos de fibras utilizadas nas misturas 3D



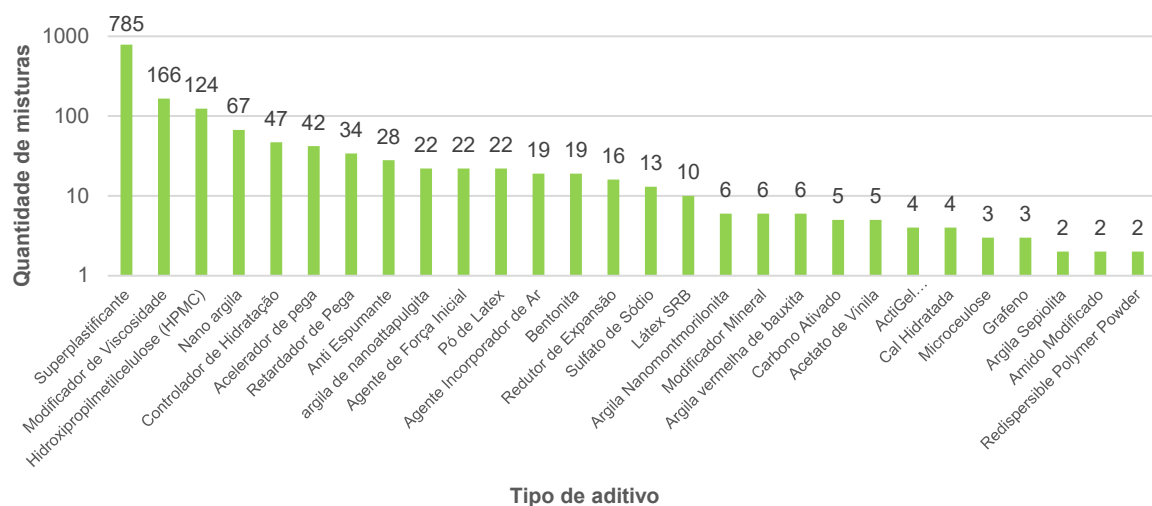
Fonte: Autoria própria, 2026

Os estudos indicaram que a inclusão de fibras, independentemente de sua tipologia, resultou em melhorias significativas nas características mecânicas das misturas, como aumento da resistência à tração e à flexão, além de maior capacidade de absorção de energia e ductilidade. Contudo, foi observada uma perda nas propriedades reológicas, como a fluidez e a capacidade de extrusão. Esses resultados reforçam a necessidade de um equilíbrio criterioso na dosagem de fibras para alcançar uma combinação eficiente entre desempenho mecânico e trabalhabilidade, fatores essenciais para a viabilidade das misturas em aplicações de impressão 3D.

7.3 ANÁLISE DOS ADITIVOS

Foram identificados 28 tipos de modificadores de mistura utilizados para otimizar as propriedades das argamassas (Figura 21), considerando a classificação adotada pelos próprios autores dos estudos analisados. Entre os aditivos mais recorrentes estão os superplastificantes, modificadores de viscosidade, controladores de hidratação, aceleradores e retardadores de pega, agentes incorporadores de ar, redutores de expansão, acelerador de resistência inicial, modificadores minerais e agentes antiespumantes.

Figura 21 - Relação dos principais aditivos utilizados nas misturas



Fonte: Autoria própria, 2026

Além destes, foram empregados materiais específicos como hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), bentonita, amido modificado, carbono ativado, grafeno, nanoargila, argila nanomontmorilonita, argila sepiolita, argila de nanoattapulgita, argila vermelha de bauxita, *redispersible polymer powder*, *ActiGel* (silicato de magnésio e alumínio), pó de látex, látex SRB, microcelulose, cal hidratada, acetato de vinila e sulfato de sódio.

Os superplastificantes (SP), aplicados em 785 misturas (72,4%), consolidaram-se como os principais aditivos empregados, se mostrando indispensáveis para garantir a fluidez necessária para a extrusão sem comprometer a estabilidade de misturas para 3DCP. Em seguida, aparecem diversos tipos modificadores de viscosidade, empregados em 166 misturas (15%), e a hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), com 124 utilizações (11%), ambos essenciais para controlar a consistência e evitar a segregação dos materiais durante o processo de impressão.

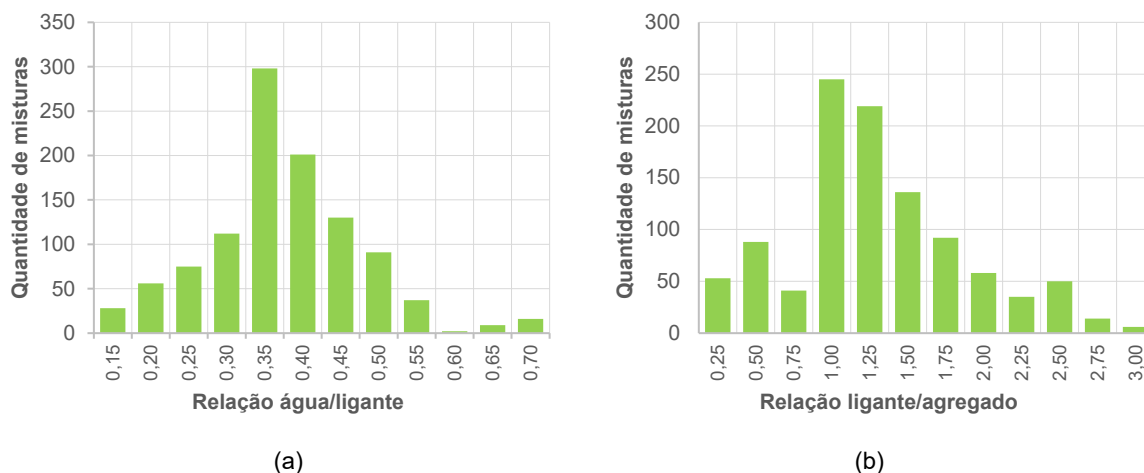
A nanoargila, com 67 aplicações (6%), destaca-se como uma escolha popular, dada sua capacidade de melhorar as propriedades reológicas e mecânicas. Outros aditivos amplamente utilizados incluem controladores de hidratação (47 misturas), aceleradores e retardadores de pega (42 e 34 misturas respectivamente), que desempenham papéis críticos no ajuste do tempo de endurecimento da mistura. Materiais como antiespumantes (28), argila de nanoattapulgita (22 aplicações), agentes de força inicial (22) e pó de látex (22) indicam o interesse crescente dos pesquisadores por propriedades específicas, como redução de bolhas, aumento de resistência inicial e estabilidade microestrutural. Agentes incorporadores de ar (19 misturas) também aparecem em destaque, geralmente associados à melhoria de resistência a ciclos de gelo e degelo. Entre os menos utilizados, mas ainda relevantes, destacam-se a bentonita (19 aplicações), redutores de expansão (16), diversas argilas especiais, como nanomontmorilonita (6) e vermelha de bauxita (6), além de materiais mais inovadores, como o grafeno (3) e o *redispersible polymer powder* (2), que evidenciam o interesse em explorar avanços tecnológicos e soluções sustentáveis.

Esses dados não apenas evidenciam a importância dos aditivos para o sucesso das misturas em 3DCP, mas também destacam a ampla gama de estratégias adotadas para superar os desafios relacionados às propriedades reológicas, mecânicas e de sustentabilidade. Os dados refletem o esforço contínuo dos pesquisadores em ajustar as formulações das argamassas, a fim de equilibrar as exigências de capacidade de impressão, resistência mecânica e durabilidade ao longo do tempo. Especificamente, o uso de modificadores de mistura, como superplastificantes e modificadores de viscosidade, revela a prioridade em controlar as propriedades reológicas essenciais para garantir a capacidade de extrusão e a estabilidade das camadas durante o processo de impressão. Além disso, a variedade de materiais aplicados aponta para o potencial de inovações futuras, focadas não apenas em melhorar o desempenho das misturas, mas também em explorar soluções sustentáveis para o avanço da impressão 3D no setor da construção civil.

7.4 ANÁLISE DAS MISTURAS

A Figura 22 apresenta a distribuição das misturas por relações água/ligante e ligante/agregado.

Figura 22 - Distribuição das relações água/ligante (a) e ligante/agregado (b) nas misturas levantadas



Fonte: Autoria própria, 2026

A análise das 1.085 misturas revelou que a maioria apresentou uma relação água/ligante entre 0,3 e 0,5, abrangendo cerca de 79% das formulações avaliadas, com um pico significativo em 0,35 (28%) (Figura 22a). Esse comportamento indica que essa faixa é amplamente utilizada e possivelmente otimizada para aplicações em 3DCP. A concentração em 0,35 sugere que essa proporção é particularmente vantajosa, provavelmente por facilitar o fluxo do material sem comprometer a coesão, o que é crítico para processos de extrusão em 3DCP.

No que diz respeito à relação entre ligante e agregado, os dados mostram que 58% das misturas situaram-se entre 1 e 1,5, com a proporção 1:1 sendo a mais prevalente, correspondendo a 24% das misturas (Figura 22b). Essa preferência está associada à busca por um equilíbrio ideal entre resistência, densidade e trabalhabilidade da mistura. A alta representatividade da relação 1:1 reforça sua importância em aplicações práticas, possivelmente por oferecer maior controle sobre a microestrutura do material e garantir boa homogeneidade.

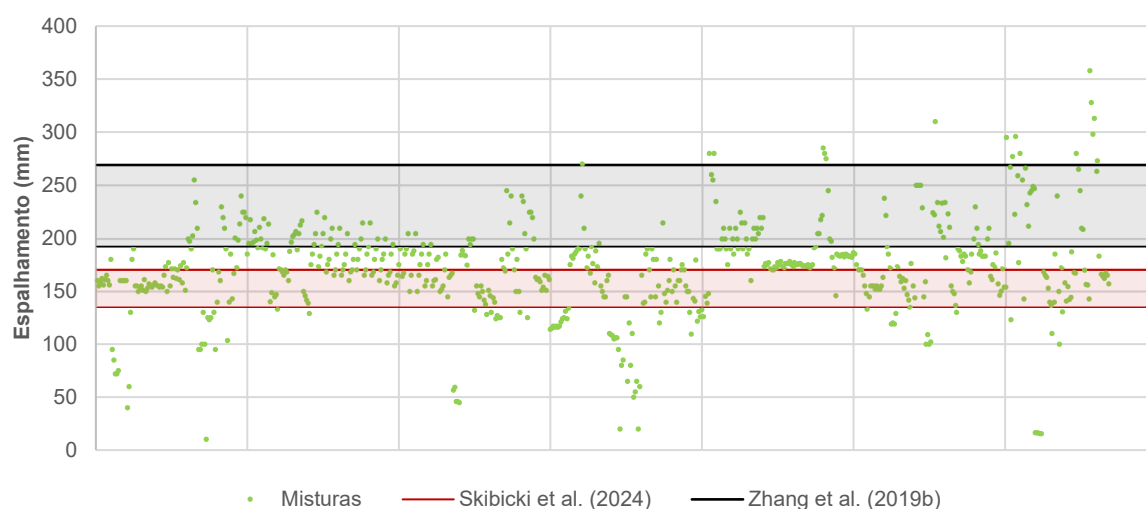
Em relação à utilização de fibras, os principais teores encontrados estão entre 1% e 2%. No entanto, muitos autores não definiram uma metodologia clara para quantificar o volume de fibras adicionado às misturas. Quanto ao uso de superplastificante, o aditivo mais recorrente nas composições analisadas, os teores apresentaram uma maior variação, situando-se entre 0,5% e 5%, com uma concentração predominante em torno de 2%. No entanto, grande parte

dos autores relatam terem seguidos as orientações dos fabricantes quanto as dosagens a serem utilizadas.

Embora nem todas as pesquisas tenham apresentado um conjunto similar de resultados de ensaios para as misturas testadas, foi possível coletar informações relevantes sobre fluidez, abatimento, tensão de escoamento, densidade aparente e tempo, resistência no estado fresco, resistências à compressão e à flexão em 7 e 28 dias. Contudo, é importante ressaltar que, em estudos com um grande número de misturas, aquelas que não atendiam a algum critério inicial dos autores eram frequentemente descartadas, o que resultou na falta de dados completos para algumas variáveis.

Foi possível levantar os valores de espalhamento de 668 amostras (Figura 23), observando-se um valor médio de 171 mm. Skibicki *et al.* (2024) sugerem que, para garantir adequada construtibilidade, o espalhamento ideal deve situar-se na faixa de 135 mm a 170 mm. Entre as amostras analisadas, 96 apresentaram valores abaixo desse intervalo, 237 situaram-se dentro da faixa recomendada e 335 apresentaram espalhamento superior ao limite indicado pelos autores.

Figura 23 - Distribuição do espalhamento das argamassas em relação à faixa de referência proposta por Skibicki *et al.* (2024) e Zhang *et al.* (2019b)



Fonte: Autoria própria, 2026

No entanto, Zhang *et al.* (2019b) propuseram uma faixa de fluidez ideal mais ampla, compreendida entre 192,5 mm e 269 mm. Considerando esse critério, 507 amostras situam-se abaixo do limite inferior, 144 enquadram-se dentro do intervalo proposto e 17 apresentam valores superiores ao limite máximo estabelecido pelos autores.

A comparação entre os dois referenciais evidencia uma divergência significativa quanto aos limites considerados ideais de fluidez. Observa-se que 174 amostras situam-se no intervalo entre 170 mm e 192,5 mm, configurando uma zona intermediária não contemplada por nenhuma das duas faixas como ideal. Esse resultado demonstra que parte expressiva das misturas analisadas apresenta desempenho limítrofe, sendo classificada como excessivamente fluida segundo um critério e insuficientemente fluida segundo o outro.

Considerando que a média geral observada foi de 171 mm, valor bastante próximo ao limite superior de Skibicki *et al.* (2024), e que um número substancial de amostras concentra-se próximo a esse patamar, o intervalo proposto por esses autores parece representar de forma mais consistente o comportamento predominante das misturas analisadas. Além disso, faixas mais restritivas tendem a estar associadas a maior controle da estabilidade e da capacidade de suporte das camadas, aspectos críticos para a construtibilidade.

Mesmo assim, em ambas as faixas, as misturas apresentaram adequada capacidade de construção, o que pode ser atribuído ao uso estratégico de aditivos e à seleção criteriosa de agregados, fundamentais para melhorar a capacidade de extrusão e a estabilidade. Portanto, embora o espalhamento constitua um indicador relevante da capacidade de construção e da capacidade de impressão, os valores de fluidez, isoladamente, não se mostraram determinantes para caracterizar essas propriedades nas amostras analisadas, devendo ser interpretados em conjunto com outros parâmetros reológicos e operacionais.

Paralelamente, o abatimento pode servir como um indicativo da capacidade de extrusão e capacidade de impressão das misturas, embora não deva ser considerado um critério absoluto. Embora menos comum em estudos voltados para argamassas para 3DCP, o ensaio foi realizado em 19 pesquisas, abrangendo 213 amostras, que apresentaram um abatimento médio de 25,7 mm.

Os dados indicam que misturas com altíssimo grau de espalhamento (superior a 250 mm) e com maior abatimento (acima de 50 mm), em termos de aditivos, foram compostas exclusivamente com superplastificantes em teores de aproximadamente 2%. Em contrapartida, misturas com abatimento reduzido (até 10 mm) e fluidez limitada geralmente apresentavam teores menores de superplastificante, entre 1% e 1,5%, e incluíam pelo menos um aditivo adicional, como modificadores de viscosidade ou Hidroxipropilmetilcelulose (HPMC). Além disso, muitas misturas continham algum percentual de fibras, confirmando a influência destas nas propriedades reológicas das misturas. Esses resultados ressaltam a importância de ajustes na composição das misturas para atender simultaneamente às exigências de capacidade de extrusão e capacidade de impressão.

Quanto à densidade no estado fresco, os valores variaram de 1500 kg/m³ a 2400 kg/m³, com uma média de 2033,81 kg/m³, exceto nos estudos cujo objetivo era obter misturas com densidades específicas, seja alta ou baixa. Esses resultados evidenciam que o tipo e a dosagem do agregado foram os principais fatores determinantes.

Em relação ao tempo em aberto das misturas, 14% das amostras apresentaram valores inferiores a 20 minutos. Embora parte desses resultados tenha sido associada ao uso de aceleradores de pega, os menores tempos em aberto não foram observados exclusivamente nessas misturas. Notou-se que as misturas com tempos reduzidos eram, em sua maioria, compostas apenas por cimento Portland como ligante, utilizando exclusivamente areia natural como agregado. Por outro lado, misturas com tempos em aberto elevados (acima de 300 minutos) representaram 16% das amostras analisadas. Apesar de algumas dessas misturas apresentarem composições binárias e, em poucos casos, substituições parciais de areia natural, a grande maioria também era composta por misturas simples com agregado de areia natural. Em ambos os casos predominou o uso de superplastificantes como aditivo, sem a adição de fibras. Assim, sugere-se que o tempo em aberto das misturas foi influenciado principalmente pelo design das formulações, especialmente pela quantidade e tipo de agregados. Isso é reforçado pela observação de que, em ambos os casos (tempos baixos e altos), a relação água/ligante apresentou valores semelhantes.

Em relação à resistência à compressão no estado fresco, com exceção de algumas misturas desenvolvidas para altíssima resistência, a média dos valores levantados foi de 4,6 kPa. No estado endurecido, observaram-se resistências médias de 36,9 MPa aos 7 dias e 47,5 MPa aos 28 dias.

Verificou-se, contudo, significativa variabilidade nos resultados, atribuída à ampla diversidade de agregados, ligantes e dosagens adotadas pelos diferentes autores, o que dificulta comparações diretas entre os estudos. De modo geral, os valores de resistência à compressão foram consistentemente superiores em corpos de prova moldados em comparação aos corpos de prova impressos. Essa diferença é frequentemente associada a deficiências de aderência entre as camadas depositadas durante o processo de impressão.

Ainda assim, o emprego de aditivos e modificadores reológicos possibilitou, em alguns casos, a obtenção de resistências próximas entre as duas técnicas, evidenciando o potencial desses componentes na mitigação da perda de desempenho mecânico associada à interface intercamadas.

Os maiores valores de resistência foram observados em misturas com areia natural como único agregado ou com baixo teor de substituição, especialmente quando associados a fíleres naturais como micro e nano carbonato de cálcio ou pó de calcário. Além disso, a maioria das misturas analisadas apresentava composições ternárias, predominando uma combinação de cimento Portland, cinza volante e sílica ativa. Algumas também incluíam escória de alto-forno ou metacaulim, reforçando a eficácia dos MCS e a importância de um projeto bem elaborado na formulação das misturas.

As menores resistências aos 28 dias (inferiores a 20 MPa) foram observadas em misturas contendo borracha moída ou materiais destinados a reduzir a densidade, como EPS e esferas termoplásticas. Adicionalmente, observou-se que a maioria das misturas menos resistentes era simples ou binária, compostas principalmente por cimento Portland e sílica ativa. Esses resultados destacam a superioridade das misturas ternárias ou quaternárias, que promovem maior sinergia entre diferentes MCS, maximizando o desempenho mecânico das argamassas.

Quanto a resistência à flexão, variaram de 1,37 MPa a 35,13 MPa, com uma média de 9 MPa. Enquanto a adição de fibras foi considerada irrelevante para a resistência à compressão, sua influência na resistência à flexão e à tração mostrou-se significativa. As fibras estavam presentes em 62% das amostras com valores de resistência à flexão superiores à média e em 84% das amostras que atingiram desempenhos acima de 15 MPa. Esses resultados corroboram as hipóteses dos autores sobre a eficácia das fibras em misturas destinadas a aplicações de alto desempenho. Além disso, foi observada a presença de fibras em praticamente todas as amostras que alcançaram os maiores valores de resistência à tração, reforçando sua importância no aprimoramento dessas propriedades mecânicas.

7.5 CONCLUSÕES SOBRE A RSL

A RSL realizada neste trabalho teve como objetivo consolidar o conhecimento sobre os principais traços de argamassas, adições e aditivos utilizados na impressão 3D de concreto, bem como identificar as variáveis que impactam diretamente o desempenho das estruturas impressas. Ao mapear as composições já testadas e as características mais promissoras, foi possível destacar tanto os avanços quanto as lacunas existentes na pesquisa sobre este tema.

A análise dos dados relativos ao conteúdo dos estudos selecionados revela uma ampla diversidade de abordagens e tendências no campo da impressão 3D em materiais cimentícios, com ênfase em propriedades reológicas, construtibilidade e sustentabilidade. No entanto, observou-se que muitos dos trabalhos analisados carecem de uma descrição clara e sistemática dos critérios adotados para a definição das proporções dos materiais utilizados

nas formulações das argamassas. Frequentemente, os estudos limitam-se a apresentar os traços empregados sem justificar as escolhas em termos de desempenho reológico, aderência aos requisitos de impressão 3D ou aspectos de sustentabilidade. Essa lacuna metodológica compromete a reprodutibilidade dos resultados e dificulta a comparação entre diferentes pesquisas, além de limitar a compreensão dos fatores que influenciam diretamente o comportamento da mistura durante o processo de extrusão e deposição em camadas.

O levantamento das palavras-chave mostrou que o termo "3D printing" é o mais recorrente, seguido por "3D concrete printing", "buildability" e "rheology", indicando que as pesquisas estão focadas principalmente nas características técnicas e no processo de impressão.

A análise dos ligantes revelou que a grande maioria dos estudos utilizou materiais suplementares, como sílica ativa e cinzas volantes, para melhorar as propriedades das misturas. Além disso, observou-se uma predominância de estudos com misturas simples ou binárias, embora misturas mais complexas também estejam sendo exploradas, sinalizando potencial para futuras investigações.

Em relação aos agregados, a areia natural continua sendo o material mais utilizado, embora o interesse por materiais reciclados e sustentáveis, como escória de ferro e agregados de borracha moída, esteja crescendo. As fibras de polipropileno e PVA são as mais empregadas, melhorando as características mecânicas das misturas, embora com perda na trabalhabilidade. Os aditivos desempenharam papel crucial na otimização das propriedades das misturas, com superplastificantes sendo os mais utilizados para garantir fluidez, seguidos por modificadores de viscosidade e hidroxipropilmetilcelulose (HPMC). O uso de aditivos como nanoargila, aceleradores e retardadores de pega reflete a busca por soluções para melhorar a reologia, o tempo de endurecimento e a resistência inicial das misturas.

Essas análises ilustram o esforço contínuo em melhorar o desempenho das misturas para impressão 3D, com uma combinação de inovações tecnológicas, sustentabilidade e a busca por materiais com melhor desempenho mecânico e reológico. Esse estudo oferece uma base sólida para direcionar as pesquisas futuras, visando à criação de argamassas e concretos com melhor desempenho e maior sustentabilidade. O caminho a ser seguido agora envolve não apenas a superação dos desafios técnicos, mas também a consideração das implicações ambientais e a adoção de práticas que assegurem um futuro mais sustentável para a construção civil.

CAPÍTULO 8

MATERIAIS E ESTRUTURA GERAL DA METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais empregados na pesquisa e a organização do programa experimental desenvolvido para a formulação e avaliação das argamassas destinadas à impressão 3D. Inicialmente, são descritas as características físicas, químicas e granulométricas dos insumos utilizados, bem como os critérios adotados para sua seleção.

Na sequência, é apresentada a estrutura geral da metodologia experimental, organizada em etapas sequenciais e interdependentes, concebidas para permitir o desenvolvimento progressivo e o aprimoramento das composições estudadas. O detalhamento específico de cada etapa é apresentado nos capítulos subsequentes, nos quais são descritos os procedimentos adotados e analisados os resultados obtidos.

8.1 MATERIAIS

Nesta etapa, foram relacionados e caracterizados todos os materiais constituintes da argamassa aplicada na impressão 3D, assegurando a conformidade técnica, a reprodutibilidade dos traços e a adequação ao desempenho requerido. As caracterizações foram realizadas de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), aplicáveis a cada tipo de material.

A composição base das misturas utilizadas compreendeu os seguintes materiais (Figura 24): cimento Portland CP II-F-40, areia de leito de rio lavada, sílica ativa, fíler de pó calcário, aditivo redutor de água à base de policarboxilato e água proveniente da rede da concessionária local (SANEGO).

Figura 24 - Materiais constituintes da argamassa



Fonte: Autoria própria, 2026

▪ **Cimento Portland CII-F-40**

O cimento Portland composto do tipo CII-F-40, da marca Tocantins, foi utilizado como material ligante nas formulações. Este cimento contém adição de fíler calcário, a qual contribui para a redução do consumo de clínquer, resultando em menores emissões de CO₂ associadas à sua produção, além de promover melhorias na trabalhabilidade e no empacotamento de partículas das misturas. Tais características são relevantes em estudos voltados à sustentabilidade e ao desempenho das argamassas. A massa específica do cimento, determinada conforme a norma ABNT NBR 16605:2017, foi de 3,13 g/cm³.

Determinou-se também a porcentagem de material fino passante pela peneira de 75 µm, obtendo-se um valor de 98,6%. Esse resultado indica que o cimento apresenta elevado grau de finura, estando em conformidade com os requisitos estabelecidos pelas normas técnicas vigentes.

▪ **Material pozolânico**

A sílica ativa utilizada nesta pesquisa foi da marca Ferbasa. Sua incorporação nas misturas visou avaliar os efeitos da adição de materiais suplementares no desempenho da composição desenvolvida para impressão 3D. Sua massa específica foi determinada conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ABNT NBR 16605:2017, resultando em um valor de 2,21 g/cm³.

▪ **Areia natural**

A areia utilizada neste estudo consistiu em um agregado natural proveniente de leito de rio, obtido de um fornecedor local. Considerando que a umidade da areia pode variar significativamente e influenciar diretamente o comportamento em argamassas para impressão 3D, adotou-se, em nível laboratorial, um procedimento de controle rigoroso desse parâmetro. O material foi submetido a um processo de secagem em estufa a 105°C ± 5°C, por um período de 24 horas, com o objetivo de eliminar a umidade residual e garantir maior precisão na dosagem dos materiais. Esse procedimento minimizou variações indesejadas na composição das misturas, contribuindo para maior consistência das formulações e reprodutibilidade dos ensaios.

A areia apresentou massa unitária de 1,32 g/cm³, conforme determinado pelo Método A (ensaio sem compactação), da ABNT NBR 16972:2021. A massa específica do material, conforme ensaio realizado com frasco de Chapman, foi de 2,60 g/cm³. A caracterização granulométrica foi conduzida de acordo com a norma ABNT NBR 17054:2022, sendo os

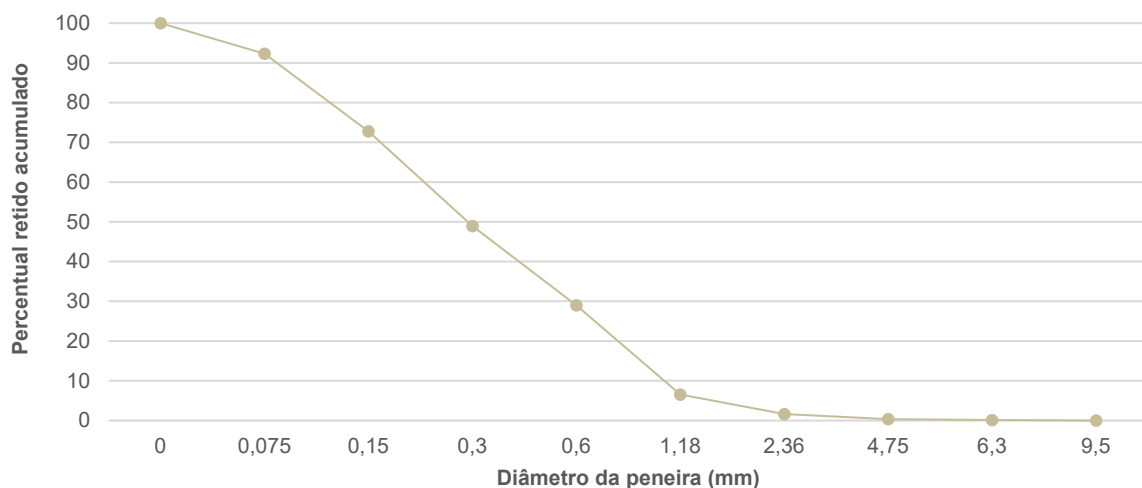
resultados apresentados na Tabela 1, que demonstra a distribuição percentual do material retido em cada peneira utilizada. A Figura 25 exibe a curva granulométrica correspondente.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica da areia: porcentagem de material retido em cada peneira

ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (%)		MÉDIA (%)	ACUMULADA (%)
	A	B		
9,5	-	-	-	-
6,3	0,06	0,18	0,12	0,12
4,75	0,14	0,30	0,22	0,34
2,36	1,24	1,30	1,27	1,61
1,18	5,04	4,80	4,92	6,53
0,6	22,56	22,34	22,45	28,98
0,3	19,86	20,06	19,96	48,94
0,15	23,64	24,00	23,82	72,77
0,075	20,32	18,74	19,53	92,30
FUNDO	7,14	8,26	7,70	100,00

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 25 - Curva de distribuição granulométrica da areia



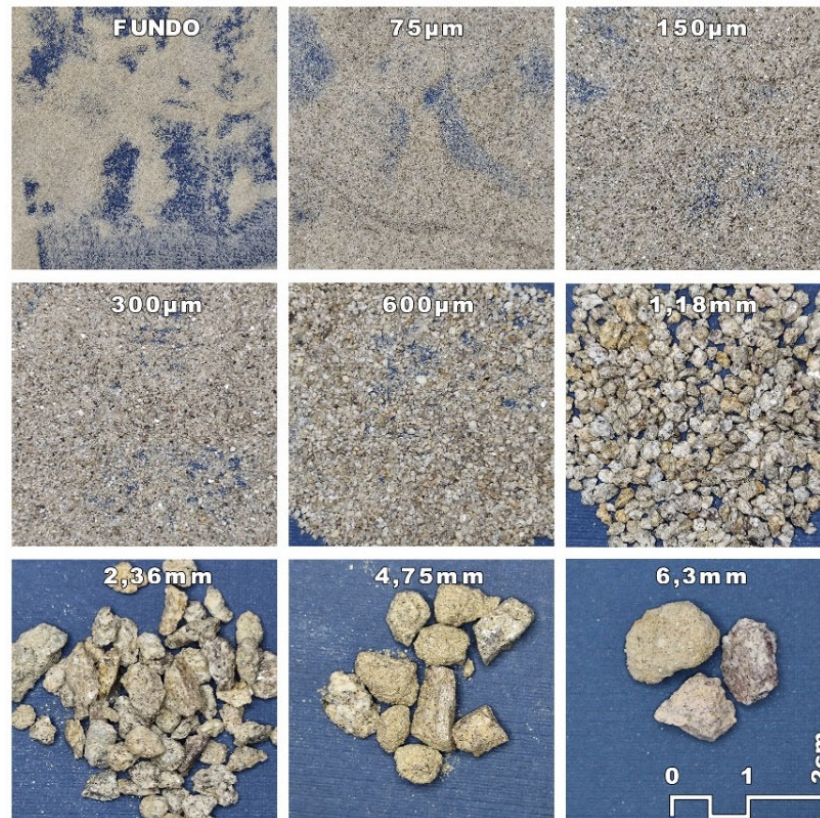
Fonte: Autoria própria, 2026

O material analisado apresentou dimensão máxima característica de 2,36 mm e módulo de finura de 1,592, conforme determinado pela análise granulométrica. A areia apresentou um percentual de finos passantes na peneira de 75 μ m de 7,7% no ensaio de peneiramento a seco e 8,51% no ensaio por lavagem, realizado conforme a ABNT NBR 16973:2021.

Esses resultados indicam uma distribuição granulométrica contínua, com teor controlado de partículas finas, o que contribui positivamente para a trabalhabilidade da argamassa, favorecendo a coesão e o desempenho mecânico. Além disso, a consistência entre os valores obtidos pelos diferentes métodos de determinação dos finos reforça a confiabilidade da caracterização granulométrica adotada.

A Figura 26 apresenta a distribuição do material retido em cada peneira durante o ensaio de granulometria, proporcionando uma visualização detalhada da composição granulométrica da areia utilizada. A Tabela 2 apresenta o resumo dos dados obtidos para caracterização da areia.

Figura 26 - Distribuição do material retido em cada peneira no ensaio de granulometria da areia utilizada



Fonte: Autoria própria, 2026

Tabela 2 - Dados de caracterização da areia

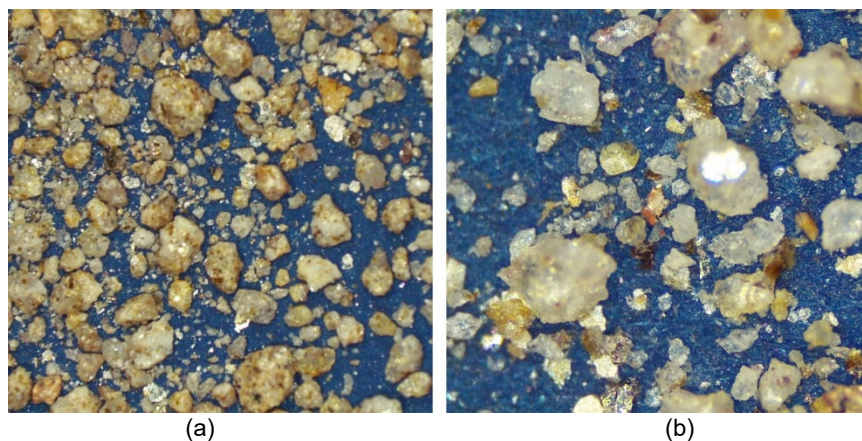
PROPRIEDADE	RESULTADOS
Massa unitária	1,32 g/cm ³
Massa específica	2,60 g/cm ³
Dimensão máxima característica	2,36 mm
Módulo de finura	1,59
Fração passante na peneira 75 µm (seco)	7,7%
Fração passante na peneira 75 µm (lavagem)	8,51%

Fonte: Autoria própria, 2026

Neste trabalho, as argamassas foram compostas utilizando-se exclusivamente a fração de areia passante na peneira com abertura de 2,36 mm, a fim de garantir maior uniformidade granulométrica nos traços estudados. Além disso, a exclusão das frações mais graúdas visa minimizar o risco de entupimento do bico de impressão, uma vez que partículas maiores podem comprometer a extrusão contínua e uniforme do material durante o processo de impressão 3D.

A Figura 27 apresenta imagens detalhadas dos grãos de areia obtidas por meio de lupa estereoscópica, com ampliações de 6 e 32 vezes, respectivamente. Observa-se que as partículas analisadas possuem geometria predominantemente arredondada, característica típica de areias lavadas de rios, resultado do transporte e da ação abrasiva contínua da água sobre os grãos ao longo do leito fluvial. A análise morfológica das partículas é fundamental para compreender propriedades físicas relevantes, como densidade aparente, porosidade e comportamento mecânico em misturas de argamassa, especialmente em aplicações de impressão 3D, nas quais a forma e a uniformidade dos grãos podem influenciar diretamente a trabalhabilidade e a capacidade de extrusão da argamassa.

Figura 27 - Imagens dos grãos de areia obtidas com lupa estereoscópica: (a) 6x; (b) 32x de ampliação



Fonte: Autoria própria, 2026

▪ Fíler calcário

O fíler calcário, considerado material inerte e sem atividade pozolânica, foi utilizado como adição mineral nas formulações de argamassa com o objetivo de modificar a distribuição granulométrica, promovendo o preenchimento de vazios entre as partículas e o aumento do teor de finos, o que contribui para a melhoria da coesão e o controle das propriedades das misturas. Foram avaliados dois tipos de fíler calcário: um de origem calcítica e outro dolomítica.

Os materiais apresentaram valores de massa unitária de 1,65 g/cm³ e 1,40 g/cm³, determinado pelo método A (ensaio sem compactação), da ABNT NBR 16972:2021, para os fíleres calcítico e dolomítico, respectivamente. A massa específica foi determinada segundo a ABNT NBR 16605:2017, apresentando valores de 2,75 g/cm³ para o fíler calcítico e 2,78 g/cm³ para o dolomítico.

A caracterização granulométrica dos fíleres foi conduzida conforme a ABNT NBR 17054:2022. A Tabela 3 apresenta a distribuição percentual do material retido em cada peneira para o fíler calcítico, que apresentou dimensão máxima característica de 1,18 mm e módulo de finura de

1,15. A Tabela 4 exibe os resultados para o fíler dolomítico, com dimensão máxima característica de 0,6 mm e módulo de finura de 0,33.

Tabela 3 - Distribuição granulométrica do calcário calcítico: porcentagem de material retido em cada peneira

ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (%)		MÉDIA (%)	ACUMULADA (%)
	A	B		
2,36	-	-	-	-
1,18	1,72	1,86	1,79	1,79
0,6	15,24	14,92	15,08	16,87
0,3	19,24	19,24	19,24	36,11
0,15	24,56	24,30	24,43	60,54
0,075	23,10	25,14	24,12	84,66
FUNDO	16,14	14,54	15,34	100,00

Fonte: Autoria própria, 2026

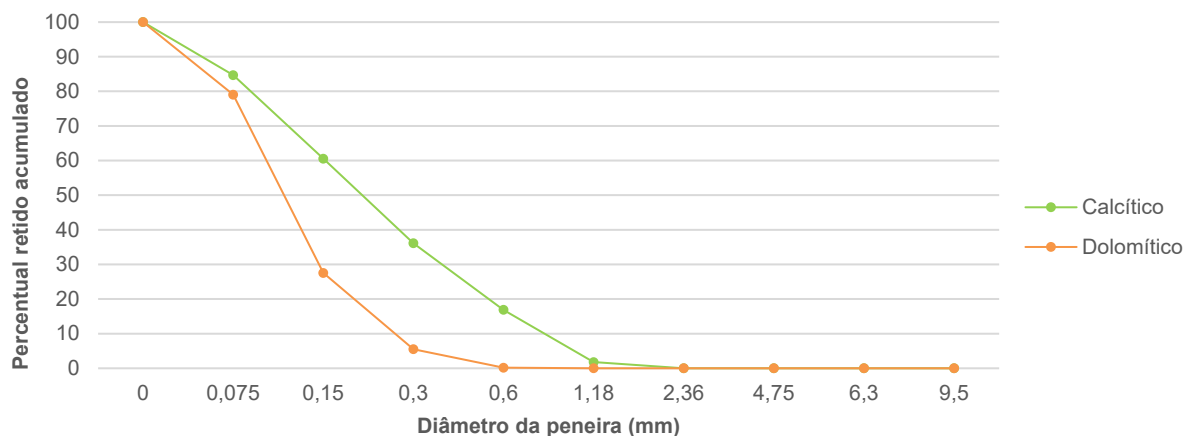
Tabela 4 - Distribuição granulométrica do calcário dolomítico: porcentagem de material retido em cada peneira

ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (%)		MÉDIA (%)	ACUMULADA (%)
	A	B		
2,36	-	-	-	-
1,18	-	-	-	-
0,6	0,18	0,18	0,18	0,18
0,3	5,10	5,54	5,32	5,50
0,15	23,10	20,98	22,04	27,54
0,075	50,80	52,18	51,49	79,03
FUNDO	20,82	21,12	20,97	100,00

Fonte: Autoria própria, 2026

A Figura 28 apresenta as curvas granulométricas dos fíleres calcítico e dolomítico, evidenciando que o fíler dolomítico possui uma distribuição granulométrica mais fina em relação ao calcítico.

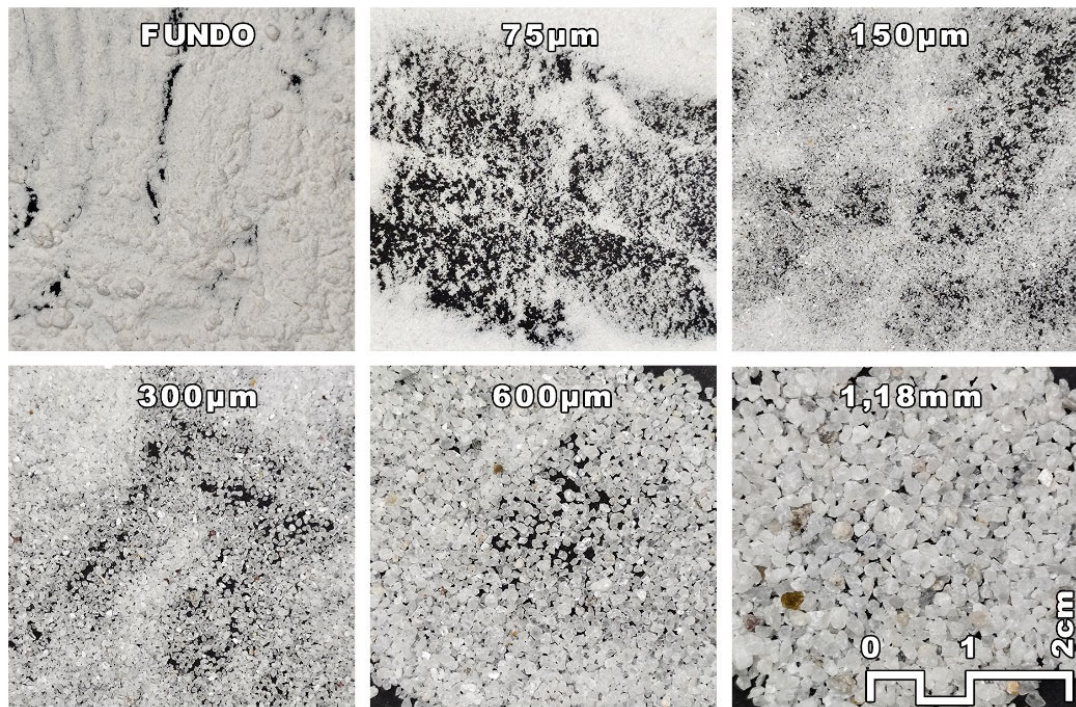
Figura 28 - Curva de distribuição granulométrica dos calcários



Fonte: Autoria própria, 2026

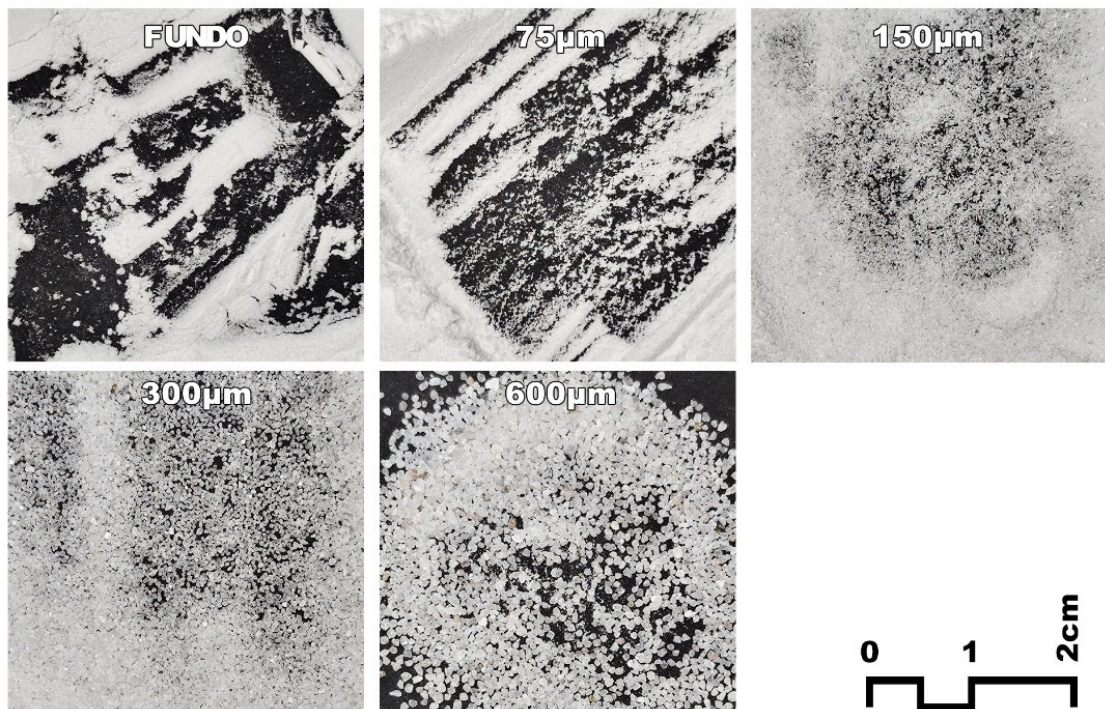
A Figura 29 e Figura 30 apresentam o material retido em cada peneira durante o ensaio granulométrico, evidenciando as diferenças de granulometria entre os dois fíleres.

Figura 29 - Distribuição do material retido em cada peneira no ensaio de granulometria do calcário calcítico



Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 30 - Distribuição do material retido em cada peneira no ensaio de granulometria do calcário dolomítico



Fonte: Autoria própria, 2026

A Tabela 5 apresenta o resumo dos resultados obtidos para os dois tipos de calcário, incluindo os valores determinados no ensaio de teor de material fino por lavagem, que quantifica a fração passante na peneira de 75 μm , conforme a NBR 16973:2021.

Tabela 5 - Dados de caracterização dos fileres calcários

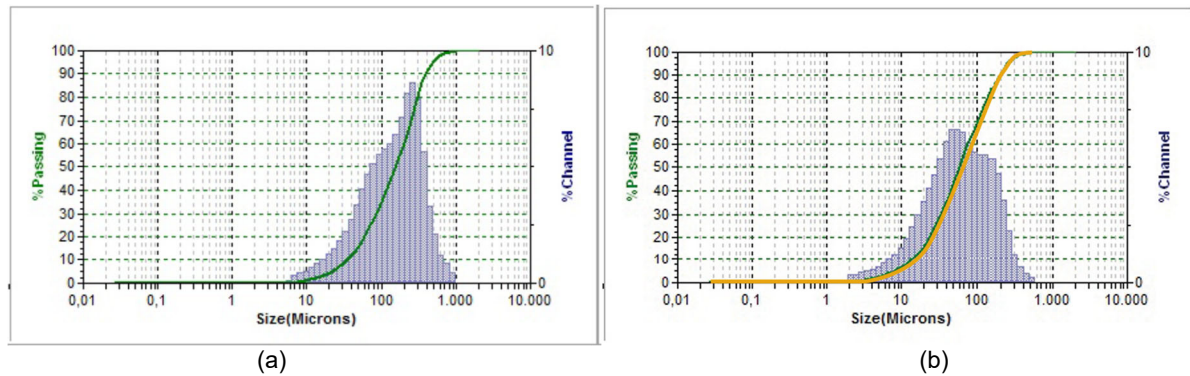
PROPRIEDADE	CALCÍTICO	DOLOMÍTICO
Massa unitária	1,65 g/cm ³	1,40 g/cm ³
Massa específica	2,75 g/cm ³	2,78 g/cm ³
Dimensão máxima característica	1,18 mm	0,60 mm
Módulo de finura	1,15	0,33
Fração passante na peneira 75 μm (seco)	15,34%	20,97%
Fração passante na peneira 75 μm (lavagem)	16,01%	39,85%

Fonte: Autoria própria, 2026

Para o filer calcítico, observou-se boa concordância entre os resultados obtidos pelo peneiramento a seco (15,34%) e pelo método de lavagem (16,01%), indicando consistência na caracterização da fração fina do material. Em contraste, o filer dolomítico apresentou variação significativa, passando de 20,97% no peneiramento a seco para 39,85% no ensaio por lavagem. Essa diferença pode ser atribuída à presença de partículas ultrafinas que, no ensaio a seco, dificultam sua passagem pela malha da peneira devido à formação de aglomerados e possível obstrução dos poros da malha. No ensaio por lavagem, a dispersão dessas partículas em meio aquoso favorece sua desagregação e passagem pela peneira, resultando em uma estimativa mais representativa do teor de finos do material.

Essa diferença na quantidade de finos pode impactar diretamente as propriedades e a estabilidade da argamassa, favorecendo melhor empacotamento das partículas e redução da segregação, porém podendo também afetar negativamente a trabalhabilidade e a resistência mecânica, caso não seja devidamente controlada.

Diante disso, realizou-se a análise granulométrica por difração a laser, com o objetivo de obter dados mais precisos e detalhados, possibilitando o ajuste adequado da formulação da argamassa e a consequente otimização do desempenho final do material. Inicialmente, as amostras foram passadas na peneira de abertura 0,42 mm, e cerca de 0,2 g de cada material foi submetido ao ensaio em um analisador de partículas MICROTRAC S-3500, operando por via úmida, com faixa de leitura de 0,0000215 a 2,0 mm. Para garantir a confiabilidade dos resultados, foram realizados três ensaios para cada amostra, sendo os valores médios apresentados na Figura 31. A Tabela 6 apresenta as porcentagens passantes correspondentes aos diâmetros característicos (D10–D95), em que cada valor representa o diâmetro máximo pelo qual passa determinada fração percentual do material.

Figura 31 - Distribuição granulométrica obtida por difração a laser: (a) calcário calcítico; (b) calcário dolomítico

Fonte: Autoria própria, 2026

Tabela 6 - Diâmetros característicos obtidos por difração a laser para os materiais estudados

%PASSANTE	D CALCÍTICO (μm)	D DOLOMÍTICO (μm)
D10	34,98	13,46
D20	59,86	23,45
D30	85,83	33,96
D40	117,1	45,38
D50	156,4	58,87
D60	201,9	76,88
D70	250,1	103,6
D80	305,8	141,5
D85	390,1	196,9
D95	486,3	246,8

Fonte: Autoria própria, 2026

Observa-se que, em todos os percentuais passantes, o calcário dolomítico apresenta diâmetros significativamente menores que o calcário calcítico. Por exemplo, no D50, o calcário calcítico apresenta valor de 156,4 μm, enquanto o dolomítico apresenta apenas 58,87 μm, ou seja, o diâmetro médio das partículas do dolomítico é cerca de 2,5 vezes menor. Essa diferença é consistente em toda a distribuição, confirmando que o dolomítico é um material mais fino e com maior fração de partículas em diâmetros reduzidos, o que está em conformidade com os resultados obtidos no peneiramento a seco.

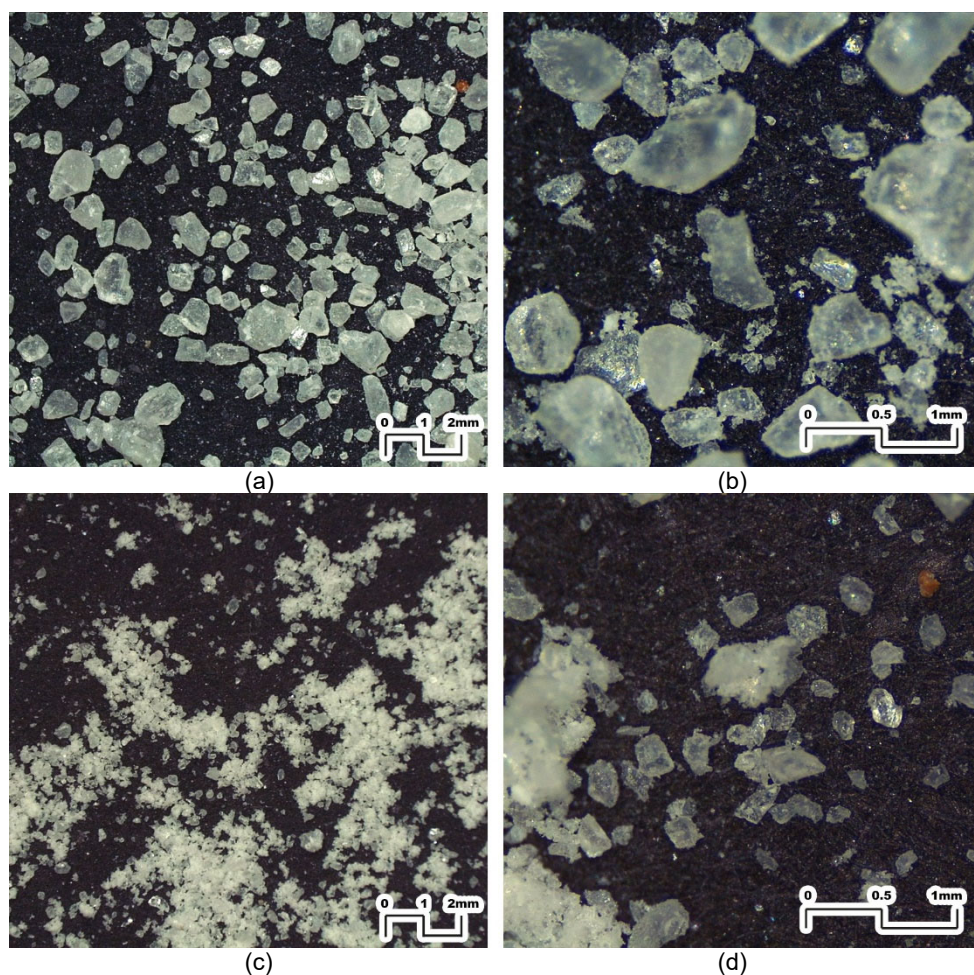
O ensaio por difração a laser também auxiliou na compreensão da discrepância observada entre os métodos de peneiramento a seco e por lavagem. Para o calcário dolomítico, o peneiramento a seco indicou aproximadamente 20% passante na peneira de 0,075 mm, enquanto o peneiramento por lavagem apresentou cerca de 40% passante. Já os dados de difração a laser apontam um valor ainda mais elevado, próximo de 60% passante em 75 μm, sugerindo que a real fração de partículas finas do dolomítico é substancialmente superior à indicada pelo peneiramento.

Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que partículas ultrafinas do dolomítico tendem a formar aglomerados no peneiramento a seco, dificultando sua passagem, enquanto no

peneiramento por lavagem há maior dispersão, mas ainda assim sem alcançar a completa individualização das partículas. No caso da difração a laser, o processo de dispersão em via úmida promove a quebra mais eficiente desses aglomerados, resultando em um valor mais próximo do comportamento real das partículas individuais. Dessa forma, os resultados de difração a laser não apenas confirmam a maior finura do calcário dolomítico em comparação ao calcítico, como também demonstram que a técnica é mais sensível na detecção da fração ultrafina, fornecendo valores superiores aos obtidos por peneiramento convencional.

A Figura 32 apresenta imagens obtidas por lupa estereoscópica dos grãos de calcário, destacando tanto o calcário calcítico (Figura 32a e Figura 32b) quanto o calcário dolomítico (Figura 32c e Figura 32d), com ampliações de 6x e 32x, respectivamente.

Figura 32 - Imagens de lupa estereoscópica dos grãos de calcário: (a, b) calcário calcítico com ampliações de 6x e 32x; (c, d) calcário dolomítico com as mesmas ampliações



Fonte: Autoria própria, 2026

Observam-se, de maneira consistente com os resultados do ensaio de granulometria, diferenças significativas no tamanho e na proporção das partículas entre os dois tipos de calcário. Os grãos do calcário calcítico exibem morfologia predominantemente angular e

alongada, enquanto os grãos do calcário dolomítico apresentam contornos mais arredondados e regulares.

Essa diferença morfológica pode impactar propriedades físicas importantes, como a trabalhabilidade, a densidade aparente e a compactação da mistura, influenciando diretamente o desempenho da argamassa em aplicações construtivas e, especialmente, em processos de impressão 3D, nos quais a geometria dos grãos interfere na extrudabilidade e na homogeneidade do material. A análise detalhada da forma e do tamanho dos grãos reforça a necessidade de selecionar cuidadosamente o tipo de fíler inerte a ser incorporado, considerando não apenas suas propriedades químicas, mas também características físicas que podem afetar a performance do traço.

- **Aditivo químico**

Utilizou-se, nas formulações das argamassas, um aditivo superplastificante à base de éter de policarboxilato, com o objetivo de aumentar a fluidez da mistura sem a necessidade de elevação da relação água/cimento. Essa estratégia é essencial para garantir a trabalhabilidade adequada ao processo de extrusão, mantendo, ao mesmo tempo, as propriedades mecânicas da argamassa no estado endurecido. A massa específica do aditivo foi determinada em laboratório, obtendo-se o valor de 1,06 g/cm³.

- **Água de mistura**

A água utilizada nas misturas foi potável, atendendo aos requisitos da ABNT NBR 15900:2009. Considerou-se que a qualidade da água é adequada para não comprometer a hidratação do cimento nem a durabilidade da argamassa.

8.2 ESTRUTURA GERAL DA METODOLOGIA

No campo das argamassas convencionais de uso geral, diversos grupos de pesquisa têm desenvolvido, há bastante tempo, métodos empíricos e semiempíricos para a definição de traços de argamassas (Carasek, 2010). Contudo, apesar dos avanços significativos na área da impressão 3D na construção civil, ainda não existem metodologias amplamente consolidadas ou normas específicas para dosagem dessas argamassas e microconcretos.

Diante dessa lacuna metodológica, a presente pesquisa adotou fundamentos experimentais previamente estabelecidos para argamassas convencionais, adaptando-os às exigências específicas do processo de extrusão em impressão 3D. Como referência inicial para o desenvolvimento das composições, adotaram-se os princípios experimentais propostos por

Selmo (1989), originalmente desenvolvidos para argamassas de revestimento. O método foi utilizado neste trabalho principalmente como ferramenta orientadora para definição das composições iniciais e para análise da influência do teor de finos e da plasticidade no comportamento das misturas. Considerando que essa metodologia não foi concebida para aplicações em impressão 3D, sua utilização ocorreu de forma adaptada e complementar, servindo como referência experimental preliminar no processo de desenvolvimento das argamassas extrudáveis.

A pesquisa foi estruturada em quatro etapas experimentais sequenciais e interdependentes, conduzidos de forma iterativa, permitindo o refinamento progressivo das composições avaliadas. Inicialmente, foram desenvolvidas formulações básicas das misturas e analisado o comportamento das argamassas no estado fresco, com verificação da aplicabilidade do método de Selmo (1989) ao contexto da impressão 3D. Em seguida, as composições selecionadas foram submetidas à caracterização mecânica e à análise da estabilidade dimensional ao longo do tempo. Na terceira etapa, investigou-se o efeito do aumento do teor de filler calcário sobre as propriedades das misturas, especialmente quanto à plasticidade, coesão e estabilidade. Por fim, realizou-se a otimização da composição considerada mais promissora, com foco na redução da relação água/ligante e no ajuste dos teores de superplastificante e sílica ativa.

A organização metodológica adotada permitiu que cada etapa experimental fosse desenvolvido com base nos resultados obtidos na etapa anterior, caracterizando um processo contínuo de ajuste, validação e otimização das misturas destinadas à impressão 3D.

8.2.1 Procedimento de preparo das misturas

O preparo das misturas foi realizado de forma padronizada em todas as etapas experimentais, visando garantir a reprodutibilidade e a uniformidade das argamassas produzidas. Inicialmente, os materiais secos foram pesados conforme as proporções estabelecidas para cada composição e homogeneizados em estado seco, assegurando distribuição uniforme dos finos e evitando a formação de aglomerados antes da adição de água.

Na sequência, dois terços da água de amassamento foram adicionados à mistura seca, realizando-se mistura mecânica em baixa rotação por 1 minuto, seguida de mistura em alta rotação por mais 3 minutos. Após esse período, efetuou-se a raspagem manual das paredes internas do misturador, a fim de garantir completa homogeneização dos materiais. Posteriormente, o terço restante da água, contendo o aditivo superplastificante previamente

diluído, foi incorporado à mistura, prosseguindo-se a agitação em alta rotação por mais 6 minutos.

Posteriormente, durante as etapas de definição e ajuste dos traços, os teores de fíler calcário e de água foram ajustados progressivamente de forma empírica, tomando como referência os princípios propostos por Selmo (1989). Os incrementos foram realizados, de modo geral, em etapas de 10% em relação à massa de cimento, sendo empregados incrementos intermediários de 5% quando necessários ajustes mais refinados. Esses procedimentos tiveram como objetivo atingir as condições desejadas de plasticidade, coesão, capacidade de extrusão e estabilidade geométrica das misturas.

Nas etapas experimentais subsequentes, adotou-se tempo adicional de mistura de 5 minutos, visando promover completa ativação do aditivo superplastificante e assegurar maior uniformidade e estabilidade das argamassas produzidas.

8.2.2 Avaliação da capacidade de extrusão e estabilidade geométrica

A avaliação da capacidade de extrusão das misturas foi realizada por meio de ensaios utilizando pistola aplicadora Makita modelo DCG180RMEB (Figura 33), equipada com bico adaptado de seção retangular, simulando o processo de deposição empregado em impressão 3D.

Figura 33 - Equipamento utilizado nos testes de extrusão: (a) pistola aplicadora Makita DCG180RMEB; (b) bico adaptado com seção retangular (10 × 30 mm)

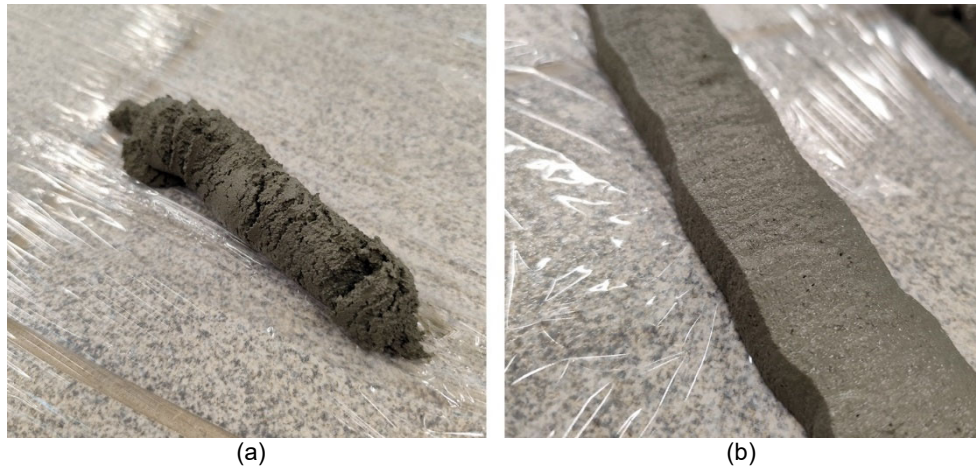


Fonte: Araújo, 2024

O critério de aceitação das misturas baseou-se na formação de filamentos contínuos, coesos, sem ocorrência significativa de exsudação ou segregação, e capazes de manter sua geometria após a deposição (Figura 34). Para análise da estabilidade ao empilhamento, foram extrudadas pelo menos quatro camadas consecutivas de aproximadamente 20 cm de

comprimento, observando-se possíveis deformações na primeira camada e perda de estabilidade geométrica do conjunto (Figura 35).

Figura 34 - Avaliação visual da capacidade de extrusão da argamassa: (a) Filamento com falhas de coesão, considerado não aceitável; (b) Filamento contínuo e estável, aceito como satisfatório para impressão



Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 35 - Empilhamento de camadas de argamassa para verificação de estabilidade.



Fonte: Autoria própria, 2026

As misturas que não apresentaram comportamento satisfatório foram reajustadas quanto aos teores de água, fíler calcário ou aditivo superplastificante, repetindo-se o procedimento até a obtenção das condições desejadas de extrudabilidade e estabilidade.

8.2.3 Caracterização das misturas no estado fresco

A caracterização das argamassas no estado fresco foi realizada por meio dos ensaios de índice de consistência, conforme a ABNT NBR 13276:2016, e de determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, segundo a ABNT NBR 13278:2005.

O ensaio de índice de consistência foi utilizado para avaliar a fluidez e a deformabilidade das misturas, permitindo analisar o efeito das proporções entre os materiais constituintes sobre a trabalhabilidade das argamassas. Complementarmente, os ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado possibilitaram avaliar alterações na estrutura física das misturas, especialmente em relação à coesão, estabilidade e incorporação de vazios.

Em conjunto, esses ensaios forneceram subsídios para a análise do comportamento no estado fresco e da estabilidade das argamassas durante o processo de extrusão, contribuindo para a avaliação da adequação das composições ao contexto da impressão 3D.

8.2.4 Caracterização das misturas no estado endurecido

A caracterização das argamassas no estado endurecido foi conduzida por meio de ensaios mecânicos e de estabilidade dimensional, permitindo acompanhar a evolução das propriedades das misturas ao longo do tempo.

Os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão foram realizados conforme a ABNT NBR 13279:2005, utilizando corpos de prova prismáticos. O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado por meio de ensaio ultrassônico, conforme a ABNT NBR 8802:2019.

A estabilidade dimensional das misturas foi avaliada por meio de ensaios de variação linear ao longo do tempo, conforme a ABNT NBR 15261:2005, complementados pela determinação da variação de massa nas diferentes idades analisadas.

De forma complementar, na primeira etapa experimental, também foram moldados corpos de prova cilíndricos destinados à análise das relações propostas por Selmo (1989) e à construção dos gráficos utilizados na interpretação do comportamento das misturas.

CAPÍTULO 9

ETAPA EXPERIMENTAL 1: FORMULAÇÃO BÁSICA E AJUSTES INICIAIS

A Etapa Experimental 1 teve como objetivo desenvolver formulações básicas de referência e verificar a aplicabilidade da metodologia proposta por Selmo (1989) ao contexto da impressão 3D.

Inicialmente, foram adotadas cinco proporções fixas entre cimento e areia, definidas em massa como 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6. Para cada proporção, produziram-se duas séries de misturas: uma utilizando pó calcário calcítico e outra, pó calcário dolomítico, totalizando dez traços experimentais.

O teor de sílica ativa foi fixado em 5% em relação à massa de cimento. Embora diversos estudos (Campos *et al.*, 2020; Dong *et al.*, 2020; Nadim *et al.*, 2024) indiquem que substituições parciais de cimento por sílica ativa de até 10% podem melhorar significativamente as propriedades mecânicas e reológicas de argamassas e concretos, pesquisas recentes (Wang *et al.*, 2022b; Tran *et al.*, 2024) demonstram que teores em torno de 5% já são suficientes para conferir ganhos relevantes, mesmo quando empregados como adição mineral. Essa escolha buscou equilibrar desempenho técnico e viabilidade econômica.

O teor de aditivo superplastificante foi fixado em 1,5% da massa de cimento, valor dentro da faixa recomendada na literatura (RSL: 2%), garantindo margem para ajustes caso necessário. Essa dosagem visa proporcionar maior fluidez às misturas sem comprometer sua estabilidade, evitando efeitos indesejados, como exsudação, segregação, atraso excessivo no tempo de pega ou perda de coesão durante a extrusão. A relação água/cimento inicial adotada foi igual a 0,35.

A Tabela 7 apresenta um resumo das proporções e composições das misturas inicialmente testadas.

Tabela 7 - Composição inicial das misturas estudadas

MISTURA	CPII-F-40	SÍLICA ATIVA	AGREGADO NATURAL	SUPERPLASTIFICANTE
M2	1,0	0,05	2,0	0,015
M3	1,0	0,05	3,0	0,015
M4	1,0	0,05	4,0	0,015
M5	1,0	0,05	5,0	0,015
M6	1,0	0,05	6,0	0,015

Fonte: Autoria própria, 2026

Após o preparo das misturas, o fíler calcário e a água foram adicionados progressivamente em incrementos sucessivos, até que fossem atingidas as condições desejadas de plasticidade, coesão e capacidade de extrusão. Posteriormente, realizou-se ajuste racional das composições, considerando os teores efetivamente necessários para obtenção do comportamento observado experimentalmente.

Além da caracterização no estado fresco, foram moldados corpos de prova cilíndricos para determinação da resistência à compressão aos 14 dias (ABNT NBR 5738:2015) e elaboração dos gráficos propostos por Selmo (1989), utilizados na análise do comportamento das misturas.

9.1 RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 1

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos na primeira etapa da etapa experimental, dedicada à definição e avaliação inicial das argamassas para aplicação em impressão 3D. São abordados os critérios de dosagem adotados, o comportamento das misturas no estado fresco e durante a extrusão, bem como o desempenho mecânico no estado endurecido. Por fim, são analisadas correlações empíricas entre composição, demanda de água e resistência à compressão, com o objetivo de estabelecer relações quantitativas que auxiliem na otimização dos traços.

9.1.1 Definição dos traços e caracterização inicial das misturas

A Tabela 8 apresenta os dados consolidados das misturas avaliadas na primeira etapa experimental. Inicialmente, são detalhadas as proporções das misturas preliminares, estabelecidas de forma empírica a partir de ensaios exploratórios, considerando os teores de água e de fíler calcário necessários para viabilizar a moldagem e a extrusão. Em seguida, são apresentadas as composições finais, obtidas a partir do ajuste racional das misturas, realizado com o objetivo de compensar possíveis perdas de água por evaporação e minimizar os efeitos decorrentes do tempo prolongado de manipulação, especialmente relacionados à redução da eficiência do aditivo superplastificante durante o processo de ajuste. A tabela também inclui os valores correspondentes para a produção de 1 m³ de argamassa. Todas as dosagens são expressas em relação à massa de cimento.

Tabela 8 - Composições das argamassas testadas na Etapa Experimental 1

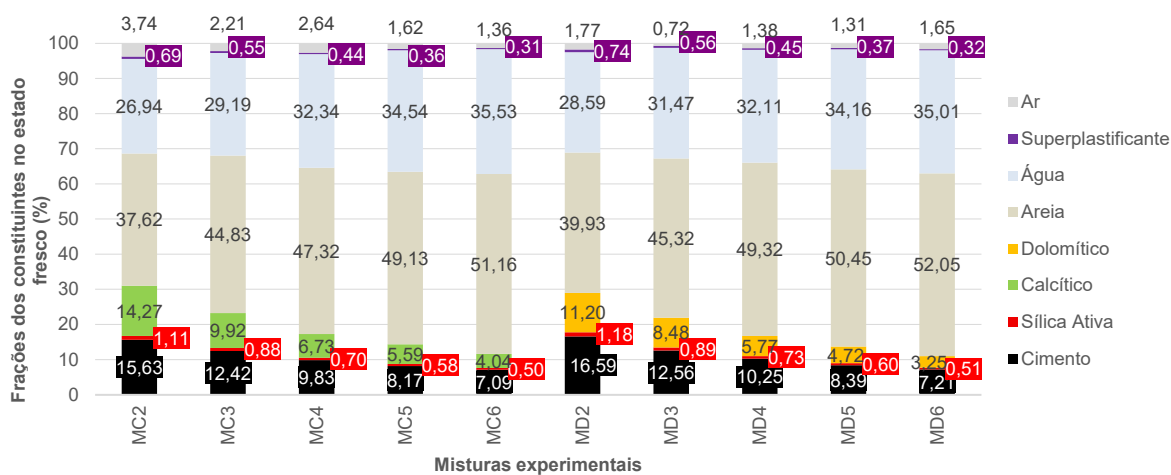
MISTURA		CPII-F-40	S.A.	C.C.	C.D.	AGREGADO	A/C	SP
MC2	Inicial	1,0	0,05	0,80	-	2,0	0,70	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	0,80	-	2,0	0,55	0,015
	Massa (kg)	508,81	25,44	407,05	-	1017,62	279,85	7,63
MC3	Inicial	1,0	0,05	0,70	-	3,0	0,90	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	0,70	-	3,0	0,75	0,015
	Massa (kg)	397,93	19,90	278,55	-	1193,80	298,45	5,97
MC4	Inicial	1,0	0,05	0,60	-	4,0	1,10	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	0,60	-	4,0	1,05	0,015
	Massa (kg)	316,40	15,82	189,84	-	1265,59	332,22	4,75
MC5	Inicial	1,0	0,05	0,60	-	5,0	1,45	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	0,60	-	5,0	1,35	0,015
	Massa (kg)	260,10	13,01	156,06	-	1300,52	351,14	3,90
MC6	Inicial	1,0	0,05	0,50	-	6,0	1,80	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	0,50	-	6,0	1,60	0,015
	Massa (kg)	225,11	11,26	112,56	-	1350,68	360,18	3,38
MD2	Inicial	1,0	0,05	-	0,60	2,0	0,60	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	-	0,60	2,0	0,55	0,015
	Massa (kg)	529,23	26,46	-	317,54	1058,45	291,07	7,94
MD3	Inicial	1,0	0,05	-	0,60	3,0	0,80	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	-	0,60	3,0	0,80	0,015
	Massa (kg)	396,26	19,81	-	237,76	1188,79	317,01	5,94
MD4	Inicial	1,0	0,05	-	0,50	4,0	1,05	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	-	0,50	4,0	1,00	0,015
	Massa (kg)	325,55	16,28	-	162,78	1302,22	325,55	4,88
MD5	Inicial	1,0	0,05	-	0,50	5,0	1,35	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	-	0,50	5,0	1,30	0,015
	Massa (kg)	266,26	13,31	-	133,13	1331,31	346,14	3,99
MD6	Inicial	1,0	0,05	-	0,40	6,0	1,65	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	-	0,40	6,0	1,55	0,015
	Massa (kg)	229,68	11,48	-	91,87	1378,10	356,01	3,45

Legenda: S.A.= sílica ativa; C.C.= calcário calcítico; C.D.= calcário dolomítico; A/C= relação água/cimento; SP= superplastificante.

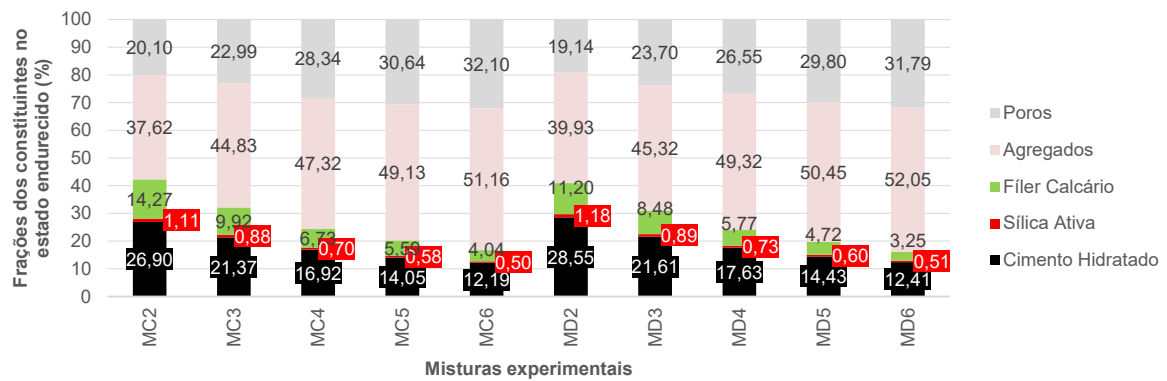
Fonte: Autoria própria, 2026

A partir da definição dos traços, foi possível determinar a proporção dos constituintes das argamassas no estado fresco (Figura 36) e no estado endurecido (Figura 37) conforme método simplificado apresentado por Quarcioni *et al.* (2009).

Figura 36 - Composição das argamassas da Etapa Experimental 1 no estado fresco



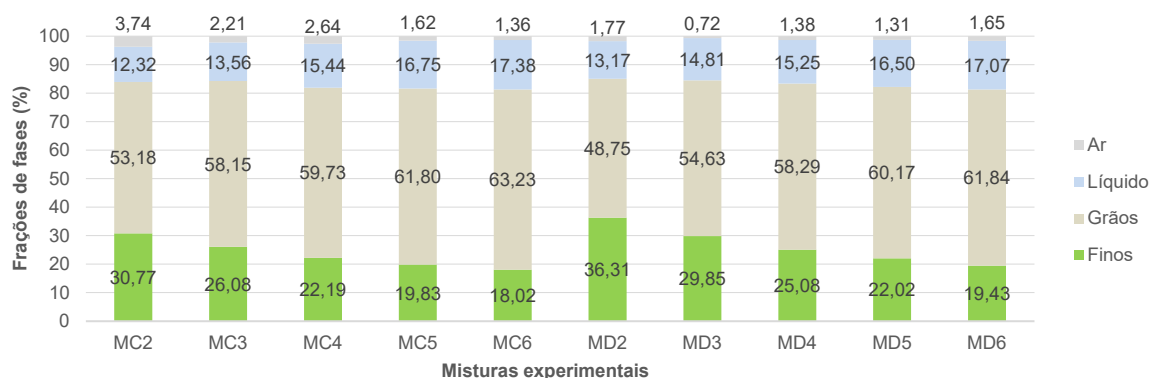
Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 37 - Composição das argamassas da Etapa Experimental 1 no estado endurecido

Fonte: Autoria própria, 2026

Observa-se que o aumento parâmetro E, definido por Selmo (1989) como a soma da fração de areia e calcário, nas misturas está diretamente associado ao incremento da porosidade no estado endurecido. Nas misturas MC, a redução progressiva do teor de ligantes reativos resultam em elevação significativa da fração de poros, passando de aproximadamente 20,10% (MC2) para 32,10% (MC6). Tendência semelhante é verificada nas misturas MD, nas quais a porosidade aumenta de 19,14% (MD2) para 31,79% (MD6). Também é possível notar que para níveis equivalentes do parâmetro E, as misturas com calcário dolomítico, em geral, tendem a apresentar porosidade ligeiramente inferior as misturas com calcário calcítico, indicando melhor eficiência no empacotamento da mistura.

Adicionalmente, foi determinada a composição das argamassas em termos de fases volumétricas (Figura 38), contemplando as frações de materiais finos passantes na peneira 75 µm, grãos (material retido na peneira 75 µm), líquidos e ar. A adição de partículas finas promove o preenchimento dos vazios entre os grãos maiores, deslocando parte da água, que passa a atuar predominantemente como agente lubrificante do movimento relativo das partículas, influenciando a trabalhabilidade e a capacidade de extrusão das misturas.

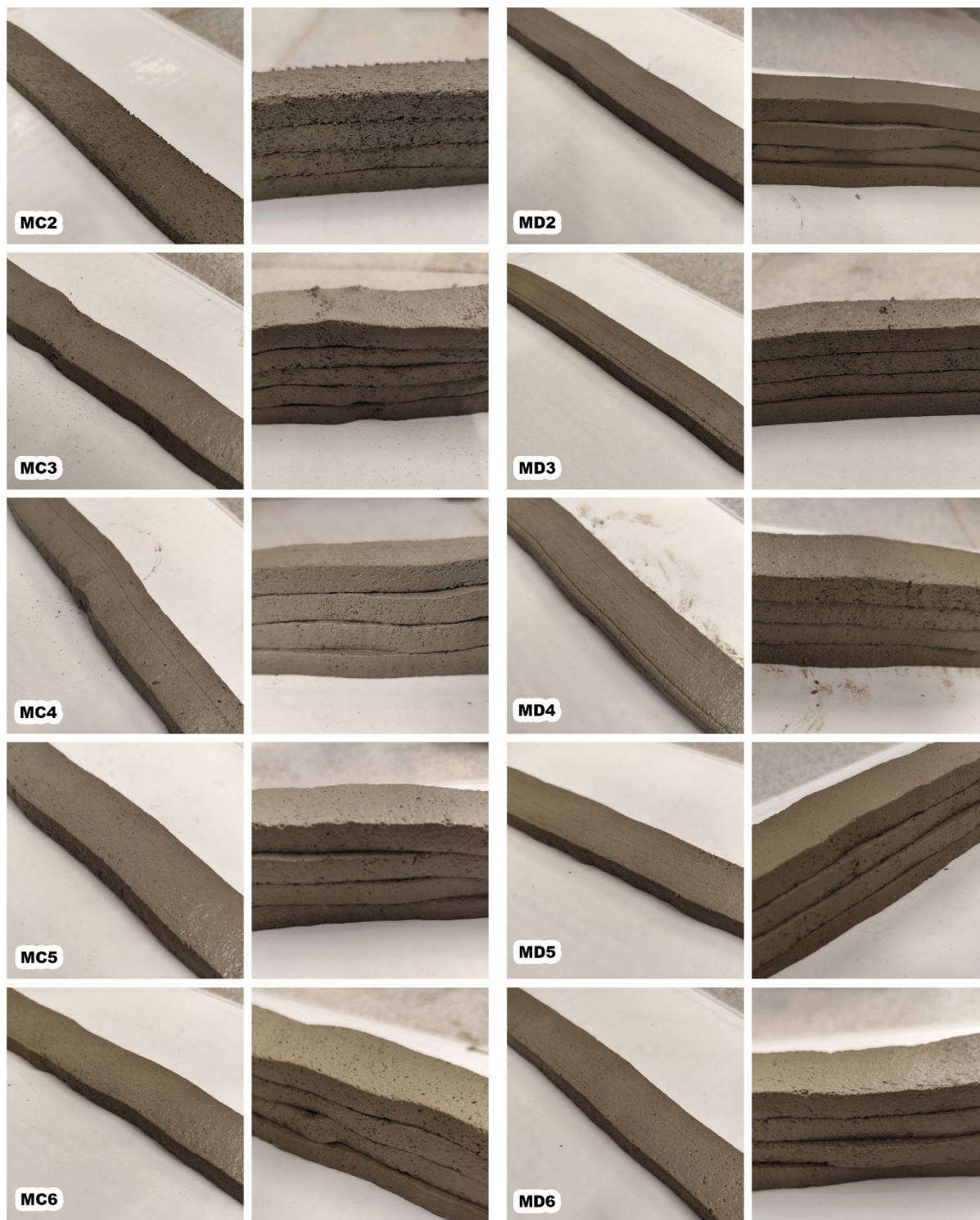
Figura 38 - Composição percentual por fase das misturas da Etapa Experimental 1

Fonte: Autoria própria, 2026

9.1.2 Comportamento no estado fresco e capacidade de extrusão

A Figura 39 apresenta os filamentos extrudados das misturas finais desenvolvidas.

Figura 39 - Filamentos extrudados das misturas finais da Etapa Experimental 1



Fonte: Autoria própria, 2026

Observa-se, de forma qualitativa, que as misturas MD, formuladas com calcário dolomítico, apresentam textura mais homogênea e superfície mais lisa em comparação às misturas MC, produzidas com calcário calcítico. Esse comportamento pode ser atribuído à morfologia e à granulometria dos grãos, uma vez que o calcário dolomítico apresenta partículas mais arredondadas e regulares, com maior proporção de ultrafinos, enquanto o calcário calcítico possui grãos mais angulares e alongados.

A forma mais arredondada e o tamanho mais uniforme das partículas dolomíticas favorecem o deslizamento interno e a acomodação da mistura durante a extrusão, resultando em filamentos mais contínuos e com maior plasticidade. Além disso, apesar de as misturas MC e MD apresentarem relações água/cimento semelhantes para a mesma proporção de areia, as formulações MD demandaram menor quantidade de filer calcário para atingir a consistência desejada, mantendo, simultaneamente, melhor trabalhabilidade observada visualmente.

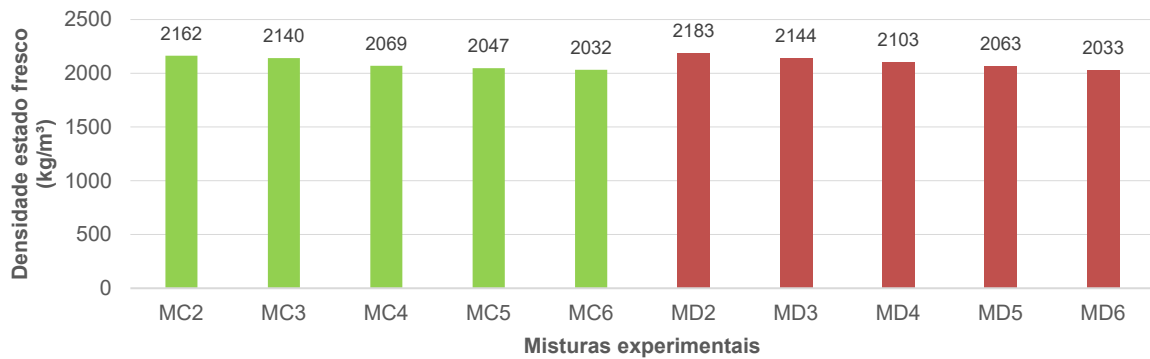
Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do estado fresco, incluindo índice de consistência (ABNT NBR 13276:2016), densidade de massa e teor de ar incorporado (ABNT NBR 13278:2005), estão apresentados na Tabela 9, fornecendo informações fundamentais sobre as propriedades no estado fresco das argamassas estudadas.

Tabela 9 - Resultados dos no estado fresco das misturas da Etapa Experimental 1

MISTURA	DENSIDADE (kg/m ³)	TEOR DE AR (%)	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (mm)	
			Média	Desvio Padrão
MC2	2162	3,74	209	0,6
MC3	2140	2,21	206	2,6
MC4	2069	2,64	230	2,5
MC5	2047	1,62	237	1,5
MC6	2032	1,36	234	3,2
MD2	2183	1,77	223	6,8
MD3	2144	0,72	194	1,7
MD4	2103	1,38	203	3,2
MD5	2063	1,31	212	2,6
MD6	2033	1,65	229	3,6

Fonte: Autoria própria, 2026

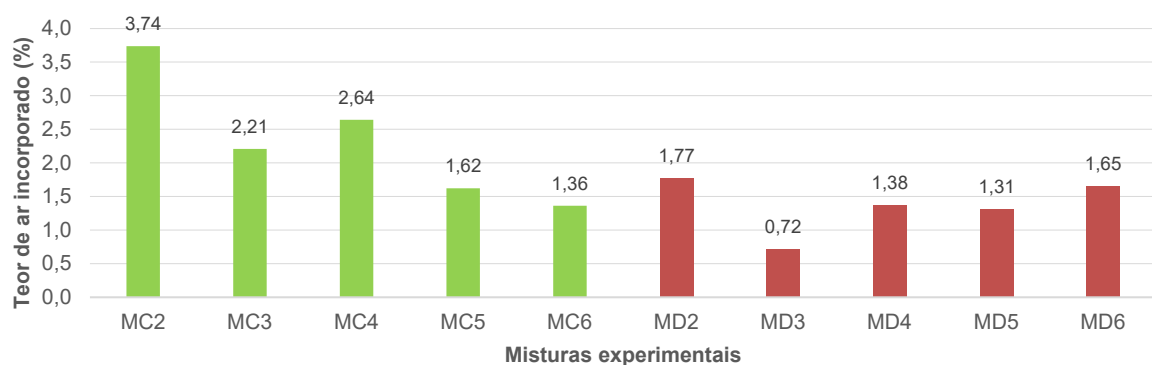
Observando-se os dados de densidade no estado fresco (Figura 40), nota-se que o aumento do parâmetro E (areia + calcário), resultou em reduções de densidade de até 6% nas misturas MC e cerca de 7% nas misturas MD. Apesar dessa variação, todas as argamassas permaneceram na classe DF4 (densidade superior a 2000 kg/m³), conforme definido pela ABNT NBR 13281:2023.

Figura 40 - Densidade no estado fresco das misturas da Etapa Experimental 1

Fonte: Autoria própria, 2026

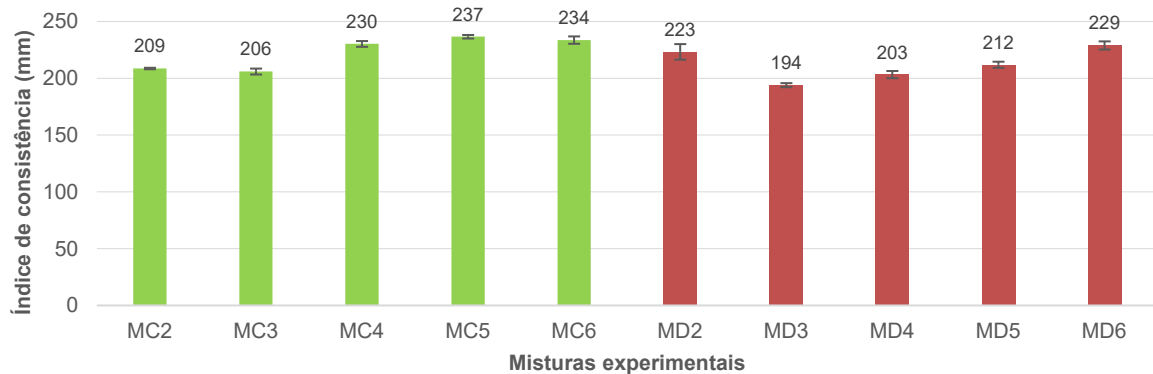
Quanto ao teor de ar incorporado, estudos como os de Sousa *et al.* (2019) e Martins *et al.* (2023) indicam que um aumento desse teor de ar proporciona maior trabalhabilidade no estado fresco, permitindo a redução do consumo de água para obtenção da mesma consistência. Por outro lado, no estado endurecido, argamassas com maiores teores de ar incorporado apresentam redução nas resistências à compressão e à aderência por tração.

Os teores de ar incorporado obtidos neste estudo foram baixos (Figura 41), indicando que a boa trabalhabilidade observada está associada principalmente à ação do filer calcário, que contribui para o aumento da coesão e da retenção de água da mistura, e não à incorporação significativa de ar.

Figura 41 – Teor de ar incorporado nas das misturas da Etapa Experimental 1

Fonte: Autoria própria, 2026

Os valores de índice de consistência obtidos para as misturas experimentais variaram entre 194 mm e 237 mm (Figura 42). Observa-se que as misturas MC apresentaram índices ligeiramente mais elevados em média em comparação com as misturas MD. Essa diferença sugere que o tipo de calcário influencia a fluidez da argamassa, possivelmente em função da forma, granulometria e quantidade dos finos adicionado.

Figura 42 - Índice de consistência das misturas da Etapa Experimental 1

Fonte: Autoria própria, 2026

Além disso, não há uma tendência monotônica clara em função da relação cimento/areia, indicando que a plastificação da mistura depende de uma combinação entre a proporção cimento/areia e a adição de fíler, e não apenas de um fator isolado. Todas as misturas permaneceram dentro da faixa de consistência considerada adequada para extrusão, confirmando que a adição de pó calcário, independentemente de sua origem, permite obter argamassas com trabalhabilidade compatível com impressão 3D.

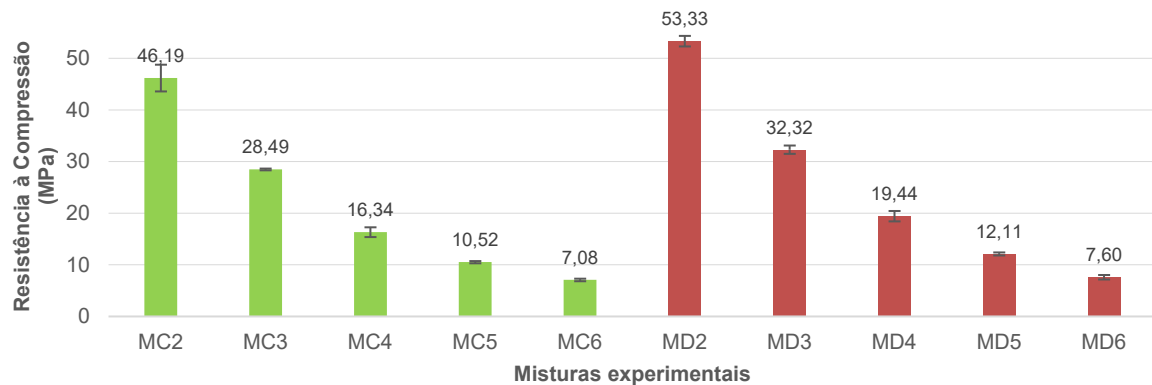
9.1.3 Desempenho no estado endurecido: resistência à compressão

A Tabela 10 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 14 dias, ilustrados na Figura 43. Observa-se uma redução progressiva da resistência com o aumento da proporção de agregados, comportamento associado à diminuição do volume de pasta disponível para a ligação entre as partículas sólidas. Além disso, esse incremento de agregados demandou maior adição de água para viabilizar a moldagem, o que, conforme amplamente documentado na literatura, contribui para a redução da resistência mecânica final das misturas.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 14 dias da Etapa Experimental 1

MISTURA	COMPRESSÃO 14D (MPa)	
	Média	Desvio Padrão
MC2	46,19	2,59
MC3	28,49	0,17
MC4	16,34	0,95
MC5	10,52	0,23
MC6	7,08	0,25
MD2	53,33	1,02
MD3	32,32	0,80
MD4	19,44	1,01
MD5	12,11	0,30
MD6	7,60	0,44

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 43 - Resistência à compressão aos 14 dias da Etapa Experimental 1

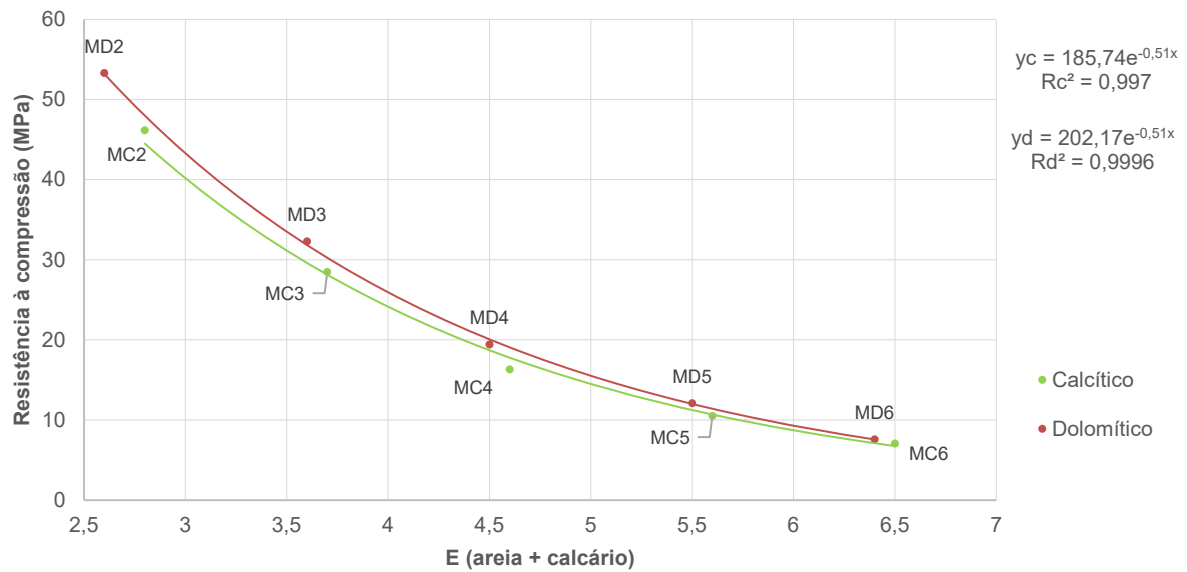
Fonte: Autoria própria, 2026

Embora os ensaios tenham sido realizados aos 14 dias, os resultados obtidos permitem avaliar a potencial aplicabilidade das misturas em impressão 3D. De acordo com a norma ICC-ES AC509:2023, a resistência mínima à compressão exigida para argamassas utilizadas em paredes impressas em 3D é de 17,2 MPa aos 28 dias. Nesse contexto, as misturas MC2, MC3, MD2, MD3 e MD4 apresentaram desempenho compatível com os requisitos normativos, indicando potencial aplicação estrutural.

Para a mistura MC4, cujo valor aos 14 dias se aproximou do limite de referência, é plausível supor que, com a evolução da resistência ao longo do tempo, o valor mínimo exigido aos 28 dias seja atingido. Ressalta-se que, no Brasil, ainda não existem normas específicas para argamassas destinadas à impressão 3D, de modo que os resultados devem ser interpretados considerando as exigências de projeto, a função estrutural e as condições de execução.

9.1.4 Análises de correlação e relações empíricas de dosagem

Com base nos resultados obtidos, foram traçadas as curvas que relacionam o parâmetro E (areia + calcário) à resistência à compressão, conforme a abordagem proposta por Selmo (1989). A Figura 44 apresenta as curvas características das misturas MC e MD, a partir das quais foram obtidas as equações e os respectivos coeficientes de determinação ($R^2 = 0,997$ para MC e $R^2 = 0,9996$ para MD), evidenciando uma forte correlação entre os parâmetros estudados.

Figura 44 - Curvas de resistência à compressão em função do parâmetro E

Fonte: Autoria própria, 2026

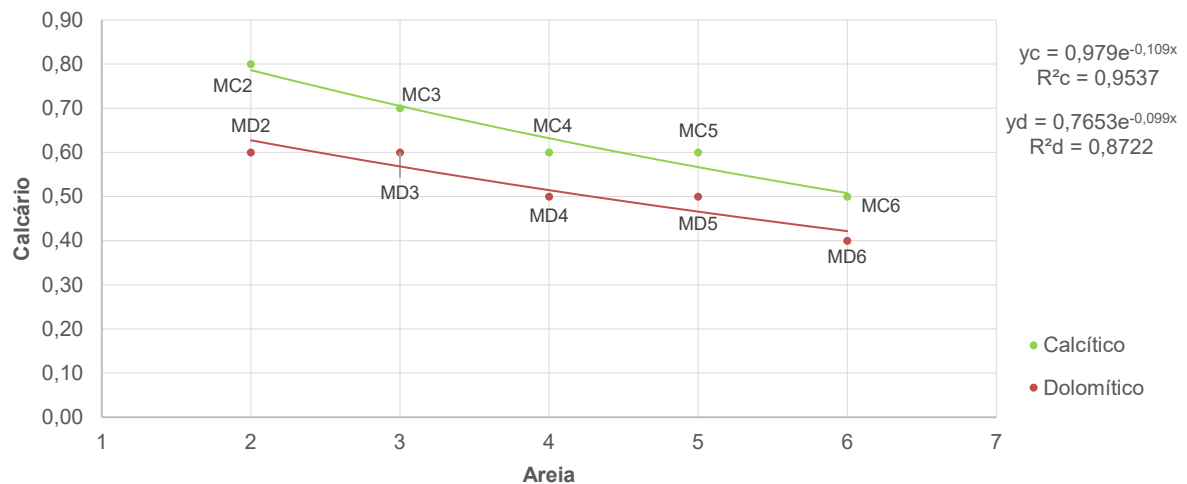
Considerando que a metodologia proposta por Selmo (1989) se fundamenta na experiência e julgamento do operador para definir a plasticidade da mistura e a quantidade de água e material fino a ser adicionado, a obtenção de R^2 tão próximo de 1 reflete que as proporções de agregados e fíler utilizadas neste estudo foram adequadamente dosadas. Isso sugere que, mesmo tratando-se de uma metodologia semiempírica, a combinação de observações empíricas e ajustes experimentais possibilitou formulações de argamassa com propriedades mecânicas previsíveis e controláveis.

Além disso, tais resultados indicam que o efeito do aumento da fração de agregados e fíler sobre a resistência segue um comportamento exponencial consistente, permitindo prever o desempenho estrutural das misturas com alta confiabilidade. Dessa forma, as formulações estabelecidas neste trabalho podem servir de referência para futuras aplicações em impressão 3D de argamassas, fornecendo uma base quantitativa sólida para ajustes finos de traço sem comprometer a resistência final.

Observa-se ainda, pelas equações, que ambas as curvas apresentam o mesmo fator de decaimento ($-0,51$), indicando que a influência do parâmetro E sobre a resistência diminui no mesmo ritmo para MC e MD. O que diferencia as curvas é o coeficiente inicial da função exponencial. Nota-se que as misturas MD apresentam resistência superior às MC para um mesmo valor do fator E (areia + calcário). Esse comportamento é atribuído à combinação de menor relação água/cimento e à morfologia mais favorável do calcário dolomítico.

A relação entre a quantidade de calcário e a de areia é apresentada na Figura 45. Observa-se que o ajuste é mais preciso para o calcário calcítico ($R^2 = 0,9537$) do que para o dolomítico ($R^2 = 0,8722$), indicando maior variabilidade no comportamento deste último e a necessidade de ajustes mais finos em sua dosagem.

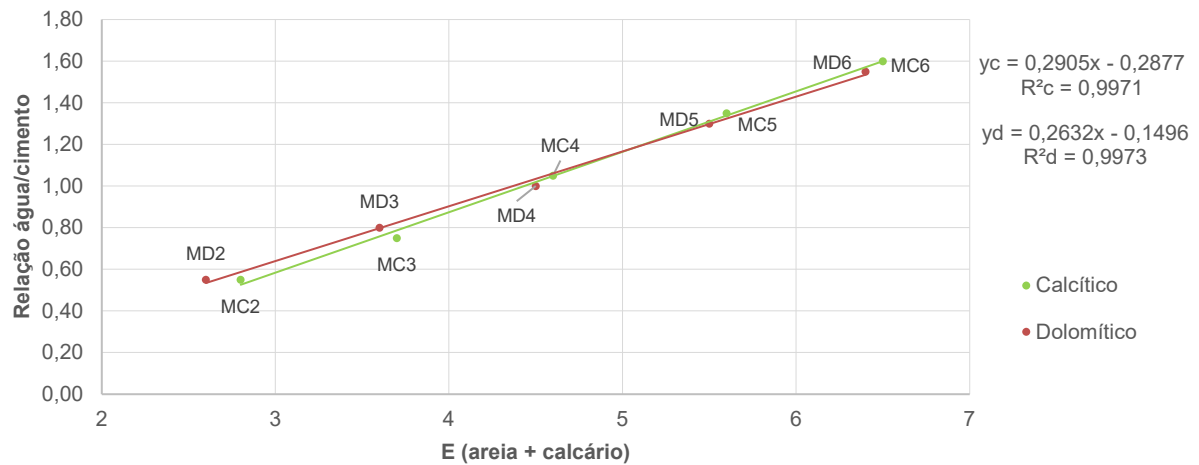
Figura 45 - Relação entre a quantidade de calcário e areia



Fonte: Autoria própria, 2026

Além disso, os valores de R^2 obtidos reforçam que a metodologia aplicada permite prever com razoável confiabilidade o comportamento das misturas, mas também evidencia que a natureza do tipo de calcário utilizado influencia a precisão do ajuste, sendo um parâmetro crítico a ser considerado em formulações futuras. Dessa forma, a análise sugere que uma abordagem combinada de observação empírica e ajustes experimentais adicionais seria recomendada para otimizar a relação entre calcário e areia, especialmente no caso do calcário dolomítico.

Por fim, a Figura 46 apresenta a relação entre a quantidade de água/cimento e o fator E, ajustada por modelos lineares. Essa linearização permite avaliar de forma quantitativa a influência das proporções de areia e pó calcário sobre a demanda de água, fornecendo um parâmetro prático para o ajuste de traços em formulações futuras.

Figura 46 - Aproximação linear da relação água/cimento em função do parâmetro E

Fonte: Autoria própria, 2026

A aproximação linear evidencia que, apesar de pequenas variações entre os pontos experimentais, a relação entre E (agregado + calcário) e a relação água/cimento é suficientemente regular para justificar o uso de uma reta como modelo simplificado. Os ajustes lineares resultaram em $R^2 = 0,9971$ para misturas com calcário calcítico e $R^2 = 0,9973$ para misturas com calcário dolomítico, indicando excelente correlação entre os parâmetros.

A análise permite comparar de forma objetiva os efeitos do tipo de calcário na dosagem de água. Observa-se que, para valores menores de E, o calcário dolomítico tende a exigir ligeiramente mais água do que o calcário calcítico para a mesma quantidade total de agregados. No entanto, essa tendência se inverte para valores maiores de E (próximo a 5), devido às diferenças nos coeficientes angulares e constantes das retas de ajuste.

9.2 SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 1

A primeira etapa experimental forneceu uma base quantitativa consistente para o desenvolvimento inicial de argamassas destinadas à impressão 3D, permitindo correlacionar a composição das misturas com o comportamento no estado fresco, a demanda de água e o desempenho mecânico no estado endurecido.

Os resultados demonstraram que os princípios propostos por Selmo (1989), mesmo originalmente desenvolvidos para argamassas convencionais, podem ser utilizados como ferramenta orientadora no processo de formulação de misturas extrudáveis. A metodologia adaptada permitiu estabelecer relações entre os teores de agregados, fíler calcário e água,

possibilitando maior previsibilidade no comportamento das misturas e auxiliando na definição racional de composições com adequada capacidade de extrusão e coesão.

Observou-se que, associada à experiência prática do operador durante os ajustes empíricos, a metodologia contribuiu para a obtenção de composições progressivamente mais consistentes, reduzindo a aleatoriedade do processo de dosagem e permitindo melhor compreensão da influência dos materiais sobre as propriedades das argamassas. As equações obtidas mostraram-se capazes de estimar, de forma satisfatória, tanto a resistência mecânica quanto a demanda de água das misturas em função do fator E, demonstrando potencial como ferramenta auxiliar para formulação e ajuste de traços.

Entretanto, verificou-se que a adaptação direta de conceitos originalmente voltados a argamassas convencionais resultou, em diversos casos, em misturas com relações água/ligante relativamente elevadas para aplicações em impressão 3D. Embora esses teores favorecessem a plasticidade e a capacidade de extrusão, seu emprego poderia comprometer propriedades associadas à durabilidade, especialmente em razão do aumento da porosidade capilar e da maior suscetibilidade à permeabilidade.

Nesse contexto, os resultados obtidos nesta etapa evidenciaram a necessidade de refinamento das composições desenvolvidas, motivando as etapas experimentais subsequentes, voltadas à avaliação da evolução das propriedades mecânicas, da estabilidade dimensional e à otimização das misturas por meio da redução da relação água/ligante e do ajuste dos teores de fíler calcário, superplastificante e sílica ativa.

CAPÍTULO 10

ETAPA EXPERIMENTAL 2: VALIDAÇÃO FUNCIONAL

A Etapa Experimental 2 teve como finalidade aprofundar a análise do comportamento das misturas selecionadas, com foco na evolução das propriedades físicas e mecânicas ao longo do tempo, permitindo não apenas verificar a adequação das formulações ajustadas à impressão 3D, mas também fornecer parâmetros confiáveis para a seleção das combinações mais promissoras.

Para avaliação da estabilidade dimensional e da variação de massa, foram moldados corpos de prova prismáticos (ABNT NBR 15261:2005), submetidos a medições periódicas nas idades de 0, 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias. Durante os ensaios, os corpos de prova foram mantidos sob condições controladas de temperatura (27 ± 1 °C) e umidade relativa do ar ($55 \pm 10\%$).

As propriedades mecânicas foram avaliadas por meio de ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão em corpos de prova prismáticos (ABNT NBR 13279:2005), realizados nas idades de 1, 7, 15 e 28 dias.

Adicionalmente, determinou-se o módulo de elasticidade dinâmico das misturas por meio de ensaios ultrassônicos (ABNT NBR 8802:2019), utilizando-se um aparelho com frequência de 54 kHz, permitindo acompanhar o desenvolvimento da rigidez das argamassas ao longo do período de cura.

10.1 RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 2

Nesta seção são apresentados os resultados da Etapa Experimental 2, voltada à avaliação do comportamento mecânico e dimensional das argamassas ao longo do tempo. A discussão enfatiza tanto o desempenho absoluto das misturas quanto a evolução temporal das propriedades, fornecendo subsídios para a avaliação da adequação das formulações à aplicação em sistemas de impressão 3D.

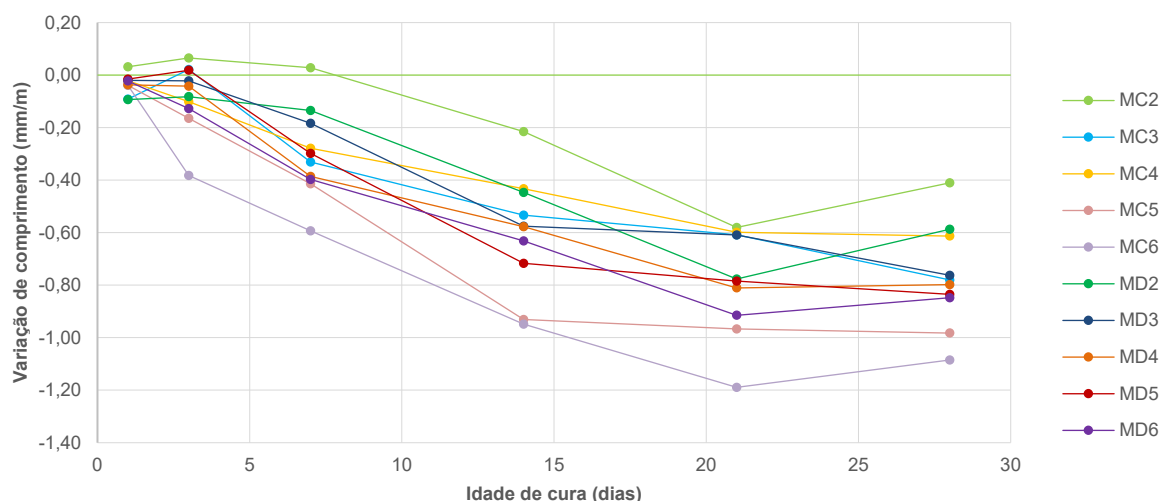
10.1.1 Variação dimensional e variação de massa

Os resultados de variação percentual de comprimento estão apresentados na Tabela 11 e na Figura 47.

Tabela 11 - Variação do comprimento (mm/m) dos corpos de prova da Etapa Experimental 2

MISTURAS	1D		3D		7D		14D		21D		28D	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
MC2	0,032	0,140	0,065	0,054	0,028	0,177	-0,215	0,102	-0,580	0,187	-0,411	0,181
MC3	-0,091	0,032	0,022	0,174	-0,331	0,125	-0,533	0,263	-0,608	0,157	-0,780	0,156
MC4	-0,021	0,033	-0,101	0,055	-0,278	0,060	-0,433	0,114	-0,599	0,199	-0,613	0,133
MC5	-0,039	0,012	-0,165	0,103	-0,414	0,137	-0,931	0,079	-0,967	0,041	-0,982	0,033
MC6	-0,039	0,079	-0,382	0,106	-0,593	0,105	-0,949	0,168	-1,189	0,161	-1,085	0,229
MD2	-0,094	0,071	-0,082	0,135	-0,135	0,087	-0,447	0,068	-0,777	0,037	-0,587	0,053
MD3	-0,020	0,109	-0,022	0,112	-0,184	0,060	-0,575	0,260	-0,609	0,108	-0,763	0,038
MD4	-0,037	0,042	-0,042	0,109	-0,386	0,144	-0,577	0,136	-0,811	0,169	-0,798	0,146
MD5	-0,015	0,061	0,019	0,053	-0,298	0,206	-0,717	0,245	-0,785	0,108	-0,835	0,108
MD6	-0,022	0,075	-0,127	0,045	-0,398	0,172	-0,632	0,066	-0,915	0,155	-0,848	0,087

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 47 - Evolução da variação percentual do comprimento das amostras da Etapa Experimental 2

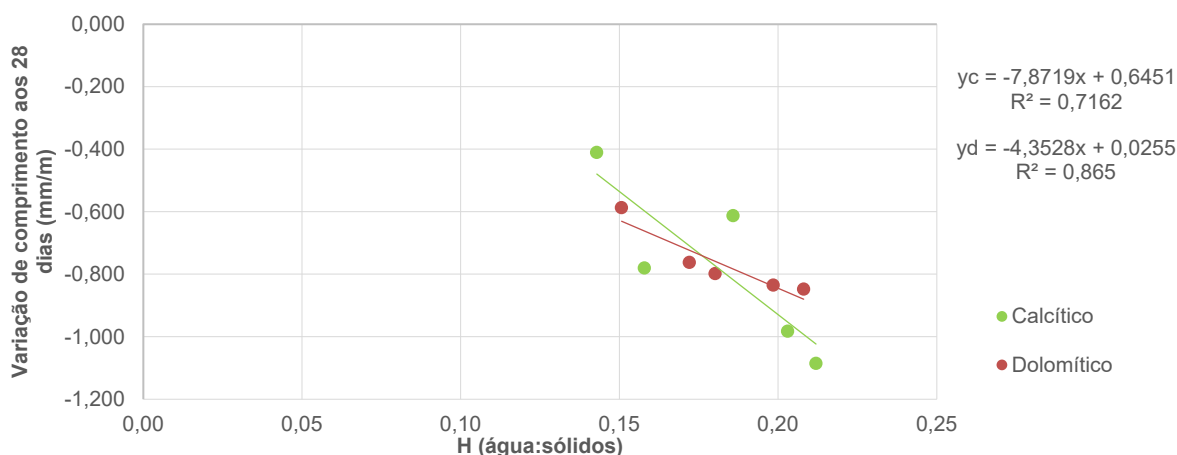
Fonte: Autoria própria, 2026

Nos primeiros dias de cura (0 a 3 dias), as misturas apresentaram variações dimensionais pouco expressivas, indicando que a hidratação inicial não resultou em retração significativa. Esse comportamento pode ser associado à presença de água livre no sistema e ao possível efeito nucleante do pó calcário, que contribui para a formação inicial dos produtos de hidratação. A partir de 7 dias, observa-se o início de uma retração progressiva, que se intensifica até os 28 dias.

De forma geral, as misturas com fíler calcítico demonstraram maior sensibilidade à variação de composição, com aumento mais acentuado da retração à medida que o teor de fíler aumenta. Esse comportamento está relacionado à redução do teor de cimento e da água quimicamente ligada. Em contraste, as misturas com fíler dolomítico apresentaram retrações ligeiramente inferiores em composições intermediárias, indicando maior retenção de água e menor taxa de desidratação inicial.

A Figura 48 apresenta a relação entre a retração aos 28 dias e o fator H (água:sólidos). Os resultados evidenciam que o aumento da relação água:sólidos intensifica a retração para ambos os sistemas. Esse efeito é mais pronunciado nas misturas calcíticas, enquanto as dolomíticas apresentam resposta mais gradual, indicando menor sensibilidade à variação do teor de água. Em baixos valores de H, as misturas calcíticas apresentam menor retração; contudo, com o aumento desse parâmetro, passam a apresentar maiores deformações, evidenciando menor estabilidade dimensional em teores mais elevados de água.

Figura 48 - Variação linear das misturas da Etapa Experimental 2 aos 28 dias em função do fator H



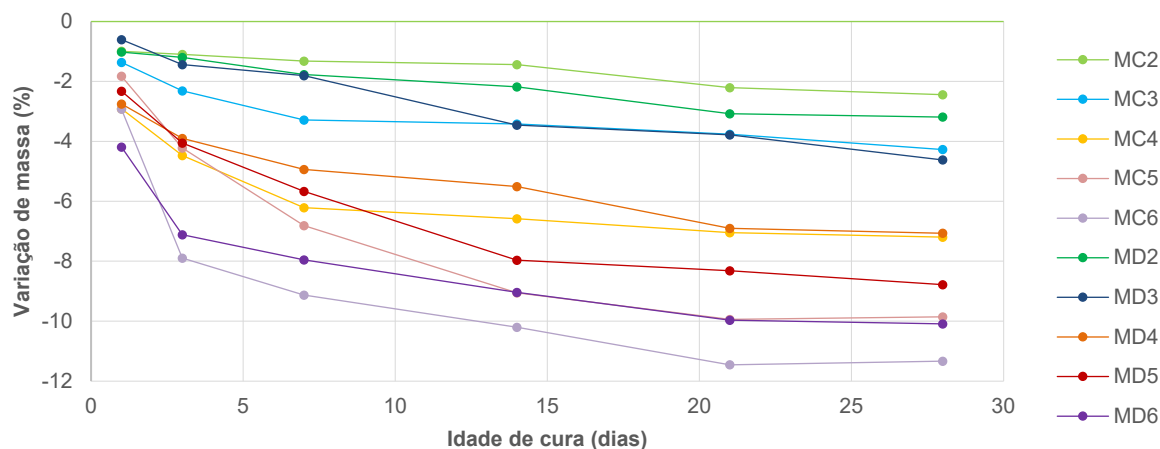
Fonte: Autoria própria, 2026

A variação percentual de massa, apresentada na Tabela 12 e na Figura 49, indica perda contínua ao longo do tempo para todas as misturas. As formulações MC apresentaram perdas mais intensas com o aumento do parâmetro E, enquanto as MD mostraram comportamento mais estável em composições intermediárias.

Tabela 12 - Variação percentual de massa dos corpos de prova da Etapa Experimental 2

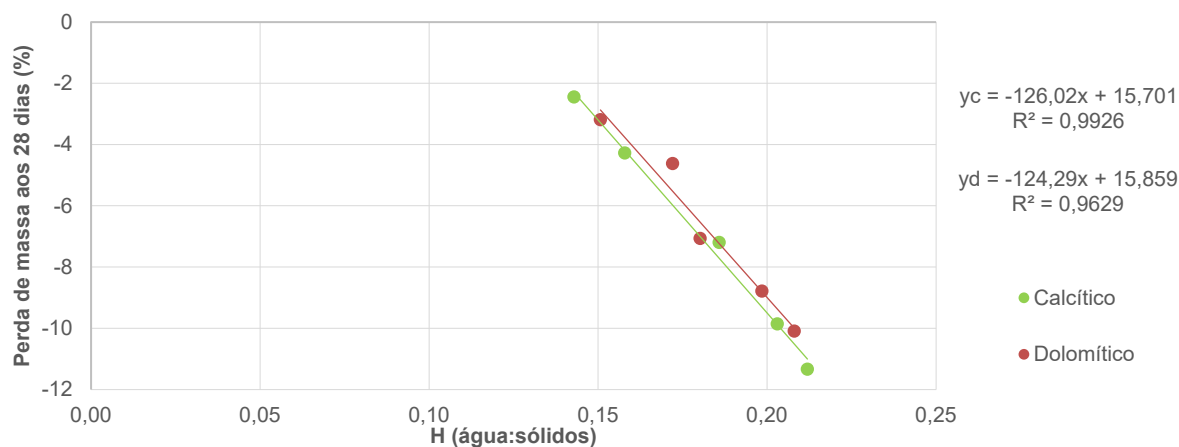
MISTURAS	1D		3D		7D		14D		21D		28D	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
MC2	-0,99	0,26	-1,10	0,51	-1,32	0,41	-1,44	0,44	-2,21	0,29	-2,44	0,37
MC3	-1,36	0,26	-2,31	0,31	-3,28	0,22	-3,42	0,20	-3,76	0,37	-4,27	0,47
MC4	-2,91	0,82	-4,47	0,88	-6,21	0,51	-6,58	0,27	-7,05	0,55	-7,19	0,42
MC5	-1,82	0,98	-4,22	1,88	-6,81	1,19	-9,05	0,61	-9,94	0,30	-9,86	0,29
MC6	-2,93	1,39	-7,90	0,57	-9,13	0,37	-10,20	0,81	-11,45	0,19	-11,33	0,17
MD2	-1,02	0,35	-1,20	0,54	-1,77	0,36	-2,18	0,34	-3,08	0,24	-3,19	0,34
MD3	-0,60	0,11	-1,44	0,56	-1,81	0,45	-3,46	1,26	-3,78	0,82	-4,62	0,35
MD4	-2,75	0,97	-3,90	1,35	-4,94	1,65	-5,51	1,51	-6,90	0,66	-7,06	0,54
MD5	-2,33	1,70	-4,05	1,21	-5,67	1,74	-7,97	1,03	-8,32	0,71	-8,78	0,56
MD6	-4,19	1,78	-7,12	0,25	-7,96	1,08	-9,04	0,56	-9,97	0,89	-10,09	0,66

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 49 - Evolução da variação percentual de massa das amostras da Etapa Experimental 2

Fonte: Autoria própria, 2026

A análise em função do fator H (Figura 50) confirma que maiores teores de água resultam em maior perda de massa, devido ao aumento da fração evaporável.

Figura 50 – Perda de massa das misturas da Etapa Experimental 2 aos 28 dias em função do fator H

Fonte: Autoria própria, 2026

Observa-se, portanto, uma relação direta entre perda de massa e retração, especialmente em misturas com maiores valores de E e H, indicando que a variação dimensional está fortemente associada à saída de água da matriz. De modo geral, o fíler calcítico tende a intensificar esses efeitos, enquanto o dolomítico contribui para maior estabilidade, possivelmente devido ao melhor empacotamento de partículas e maior retenção de água. Esses resultados são particularmente relevantes para aplicações em impressão 3D, nas quais a estabilidade dimensional é um fator crítico.

10.1.2 Resistência à tração na flexão

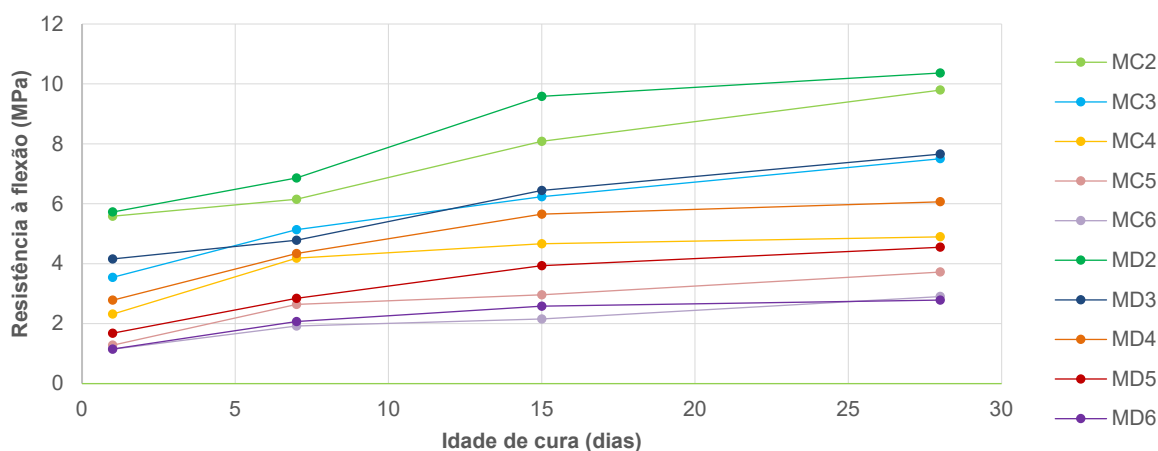
Os resultados de resistência à tração na flexão estão apresentados na Tabela 13 e na Figura 51. De modo geral, todas as misturas apresentaram incremento progressivo da resistência ao longo do tempo.

Tabela 13 - Resistência à tração na flexão das misturas da Etapa Experimental 2

MISTURA	1D (MPa)		7D (MPa)		15D (MPa)		28D (MPa)	
	MÉDIA	D.P.	MÉDIA	D.P.	MÉDIA	D.P.	MÉDIA	D.P.
MC2	5,59	0,67	6,15	0,86	8,09	0,28	9,80	1,63
MC3	3,55	0,05	5,13	0,20	6,24	1,11	7,51	1,19
MC4	2,32	0,05	4,18	0,25	4,67	0,27	4,90	1,27
MC5	1,28	0,07	2,64	0,35	2,96	0,12	3,72	0,12
MC6	1,15	0,06	1,92	0,08	2,15	0,15	2,91	0,24
MD2	5,73	0,15	6,86	0,20	9,59	1,34	10,37	0,25
MD3	4,16	0,15	4,78	0,40	6,44	0,72	7,66	1,37
MD4	2,78	0,05	4,34	0,32	5,66	0,43	6,07	0,73
MD5	1,68	0,05	2,84	0,19	3,94	0,13	4,55	0,18
MD6	1,15	0,08	2,07	0,34	2,58	0,20	2,79	0,15

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 51 - Evolução da resistência à tração na flexão das misturas da Etapa Experimental 2



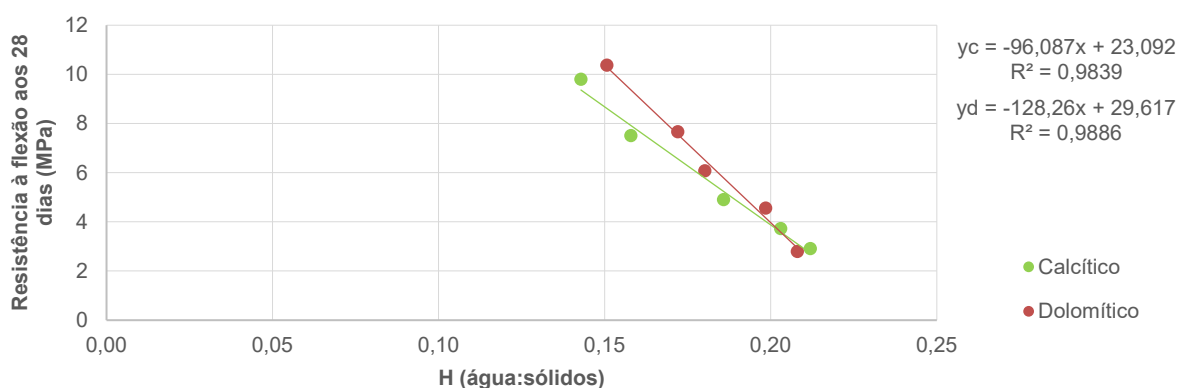
Fonte: Autoria própria, 2026

A mistura MC2 apresentou os maiores valores dentro do grupo MC, com ganho de aproximadamente 75,3% entre 1 e 28 dias. À medida que o parâmetro E (areia + calcário) aumenta, a resistência diminui significativamente. Além disso, o ganho percentual de resistência ao longo do tempo também varia conforme a proporção de E. Por exemplo, MC6 apresenta um incremento de aproximadamente 153% durante os 28 dias, superior ao de MC2 (75,3%). No entanto, mesmo com o aumento proporcional mais elevado, os valores iniciais e finais de resistência permanecem consideravelmente menores.

As misturas MD apresentaram comportamento semelhante, porém com resistências superiores às correspondentes MC, com diferenças mais expressivas nas idades iniciais (20 a 30%) e redução dessas diferenças aos 28 dias (5 a 15%). Esse desempenho pode ser associado ao melhor empacotamento e à maior homogeneidade da matriz proporcionados pelo filer dolomítico.

A análise da resistência aos 28 dias em função do fator H (Figura 52) evidencia redução da resistência com o aumento da relação água:sólidos. Esse efeito é mais acentuado nas misturas calcínicas, enquanto as dolomíticas apresentam redução mais gradual. Para valores semelhantes de H, as misturas com filer dolomítico mantêm desempenho superior, indicando menor sensibilidade ao teor de água.

Figura 52 - Resistência à flexão da Etapa Experimental 2 aos 28 dias em função do fator H



Fonte: Autoria própria, 2026

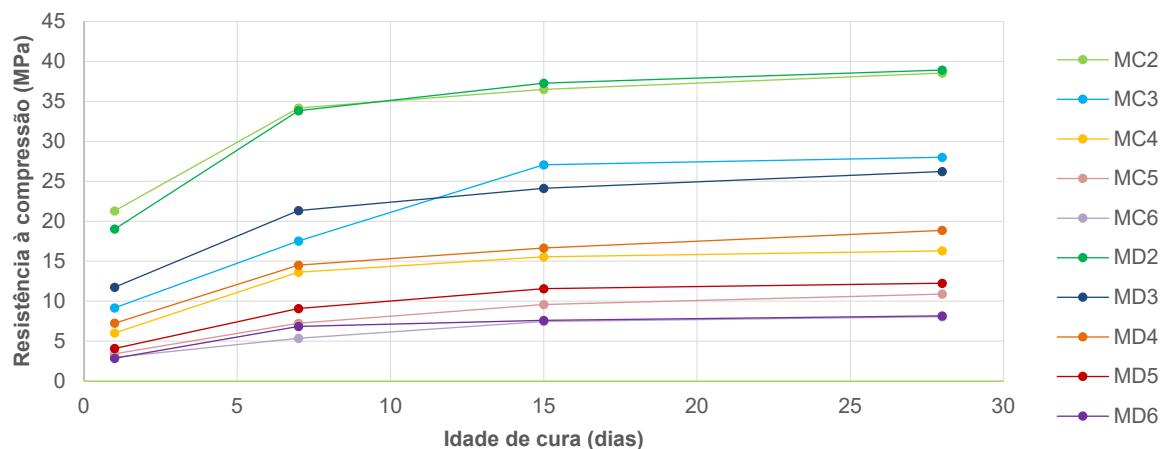
10.1.3 Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão estão apresentados na Tabela 14 e na Figura 53, evidenciando crescimento contínuo ao longo do tempo.

Tabela 14 - Resistência à compressão das misturas da Etapa Experimental 2

MISTURA	1D (MPa)		7D (MPa)		15D (MPa)		28D (MPa)	
	MÉDIA	D.P.	MÉDIA	D.P.	MÉDIA	D.P.	MÉDIA	D.P.
MC2	21,30	2,13	34,18	1,40	36,50	1,91	38,55	6,62
MC3	9,17	0,64	17,53	1,21	27,07	0,75	28,02	2,50
MC4	6,02	0,47	13,62	0,57	15,55	0,90	16,30	0,80
MC5	3,42	0,20	7,23	0,51	9,58	0,46	10,90	0,55
MC6	2,98	0,12	5,35	0,29	7,45	0,52	8,07	0,65
MD2	19,03	0,54	33,83	1,65	37,28	2,23	38,93	1,76
MD3	11,75	0,71	21,33	2,42	24,12	0,41	26,23	2,83
MD4	7,25	0,46	14,50	0,83	16,65	0,67	18,87	2,13
MD5	4,08	0,20	9,08	0,45	11,57	0,52	12,25	0,95
MD6	2,85	0,08	6,83	0,29	7,60	0,68	8,17	0,83

Fonte: Autoria própria, 2026

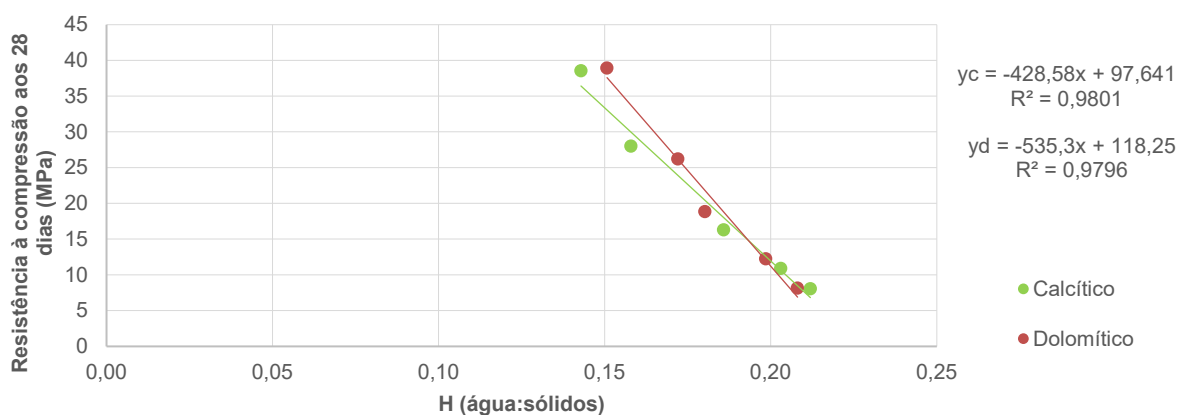
Figura 53 - Evolução da resistência à compressão das misturas da Etapa Experimental 2

Fonte: Autoria própria, 2026

A mistura MC2 apresentou os maiores valores, enquanto o aumento do parâmetro E resultou em redução expressiva da resistência final. Embora misturas com maior teor de fíler apresentem maiores ganhos relativos, seus valores absolutos permanecem inferiores.

As misturas MD apresentaram comportamento semelhante, porém com desempenho ligeiramente superior nas idades mais avançadas, confirmando a tendência observada na flexão.

A relação com o fator H (Figura 54) mostra redução sistemática da resistência com o aumento da água. As misturas calcílicas apresentam maior sensibilidade a essa variação, enquanto as dolomíticas mantêm desempenho relativamente superior, especialmente em composições intermediárias.

Figura 54 - Resistência à compressão da Etapa Experimental 2 aos 28 dias em função do fator H

Fonte: Autoria própria, 2026

10.1.4 Evolução do módulo de elasticidade

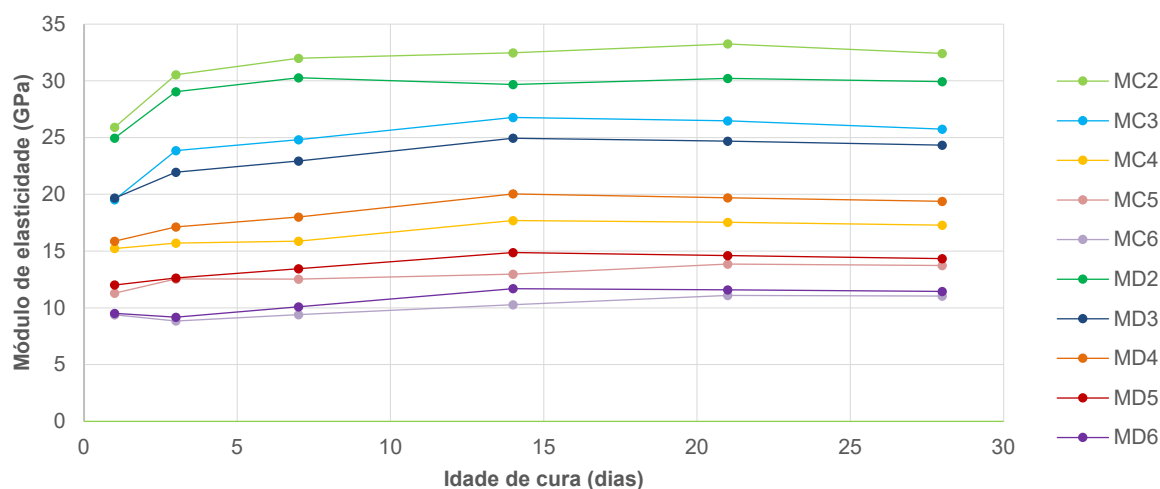
Os resultados do módulo de elasticidade estão apresentados na Tabela 15 e na Figura 55, com comportamento típico de ganho acelerado nas primeiras idades.

Tabela 15 - Módulo de Elasticidade das misturas da Etapa Experimental 2

MISTURAS	1D (GPa)		3D (GPa)		7D (GPa)		14D (GPa)		21D (GPa)		28D (GPa)	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
MC2	25,9	0,3	30,5	0,4	32,0	0,5	32,5	0,0	33,3	0,1	32,4	0,3
MC3	19,5	0,0	23,9	0,3	24,8	0,5	26,8	0,7	26,5	0,6	25,7	0,8
MC4	15,2	0,3	15,7	0,2	15,9	0,2	17,7	0,3	17,5	0,5	17,3	0,1
MC5	11,3	0,7	12,5	0,4	12,5	0,1	13,0	0,4	13,9	0,4	13,7	0,7
MC6	9,4	0,1	8,8	0,4	9,4	0,2	10,3	0,2	11,1	0,3	11,0	0,4
MD2	25,0	0,8	29,0	0,7	30,3	0,7	29,7	0,8	30,2	0,9	29,9	0,9
MD3	19,7	0,2	21,9	0,0	22,9	0,6	25,0	0,6	24,7	0,8	24,3	0,9
MD4	15,9	0,2	17,1	0,3	18,0	0,4	20,0	0,5	19,7	0,5	19,4	0,6
MD5	12,0	0,2	12,6	0,5	13,5	0,3	14,9	0,9	14,6	1,1	14,3	0,9
MD6	9,5	0,2	9,2	0,3	10,1	0,3	11,7	0,3	11,6	0,2	11,4	0,6

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 55 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas da Etapa Experimental 2



Fonte: Autoria própria, 2026

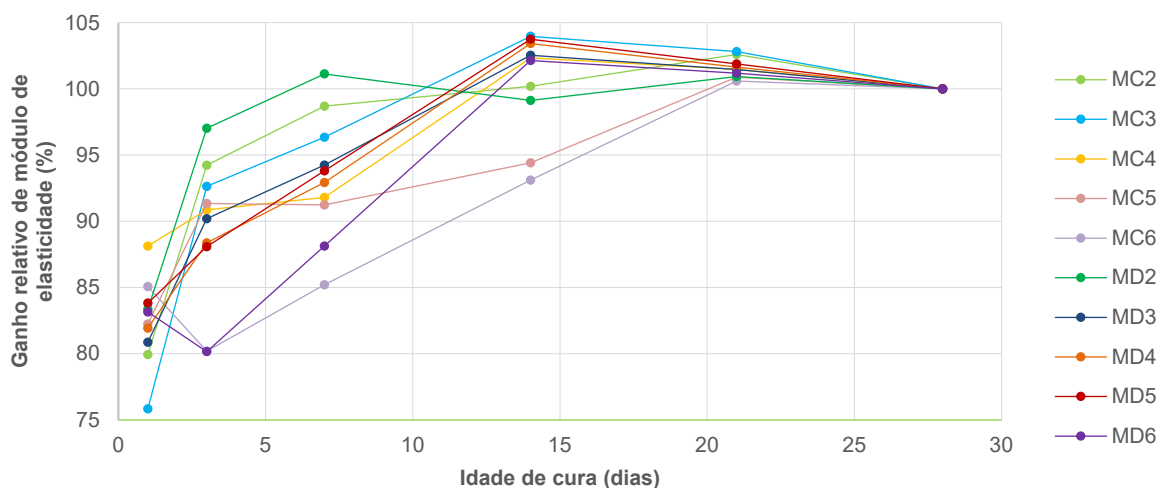
Entre as misturas com fíler calcítico, a formulação MC2 apresentou o maior valor de módulo de elasticidade aos 28 dias (32,4 GPa). O aumento do parâmetro E (areia + calcário) resultou em redução progressiva da rigidez, alcançando 11,0 GPa na mistura MC6, o que representa uma queda de aproximadamente 66,0%. Esse comportamento indica que o efeito de diluição do cimento e o aumento da porosidade influenciam negativamente a rigidez final da matriz.

As misturas com fíler dolomítico seguiram tendência semelhante. A MD2 apresentou módulo de elasticidade de 29,9 GPa aos 28 dias, enquanto a MD6 atingiu 11,4 GPa, correspondendo a uma redução de cerca de 61,8%. Observou-se, entretanto, um comportamento distinto entre

os dois tipos de filler: em baixos teores (misturas 2 e 3), as misturas com filler calcítico apresentaram módulos ligeiramente superiores, enquanto, em teores mais elevados, as misturas dolomíticas passaram a apresentar maior rigidez, em consonância com os resultados de resistência mecânica.

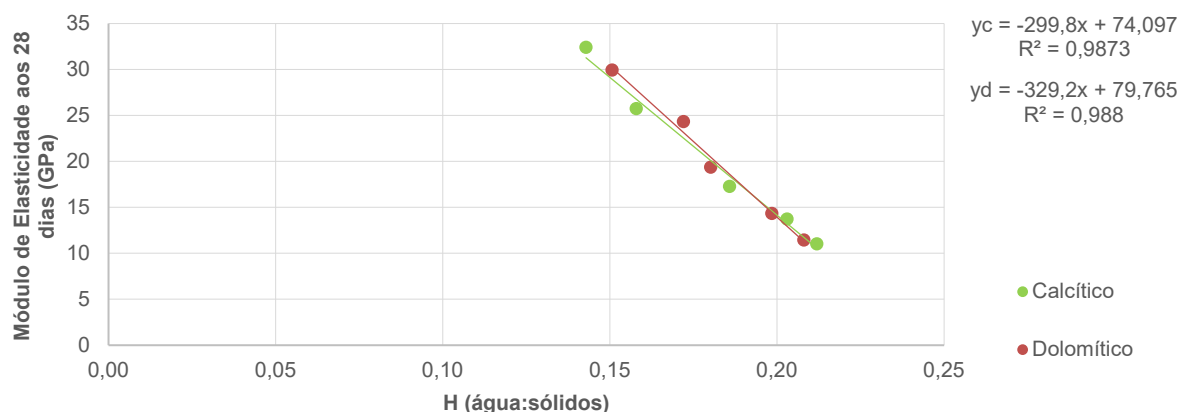
A análise dos ganhos relativos (Figura 56) mostra que, em ambas as famílias, a maioria das misturas atingiu 90% valor do módulo de elasticidade aos 28 dias já entre 7 e 14 dias, indicando que a maior parte da rigidez foi adquirida antes da idade de referência normativa. Além disso, observou-se uma elevada correlação entre os valores iniciais e finais, calculada pelo coeficiente de correlação de Pearson ($r \approx 0,99$), o que evidencia que a performance precoce é um bom indicador do comportamento final das misturas.

Figura 56 - Ganho relativo do módulo de elasticidade das misturas da Etapa Experimental 2



Fonte: Autoria própria, 2026

Em relação ao fator H (Figura 57), observa-se redução progressiva do módulo com o aumento da água, comportamento consistente com os resultados mecânicos. Apesar de as misturas dolomíticas apresentarem leve vantagem em valores intermediários, a diferença entre os tipos de filler é pouco significativa, indicando que o módulo de elasticidade é predominantemente governado pela relação água:sólidos.

Figura 57 - Módulo de elasticidade da Etapa Experimental 2 aos 28 dias em função do fator H

Fonte: Autoria própria, 2026

10.2 SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 2

De forma geral, os resultados da Etapa Experimental 2 evidenciam que o comportamento mecânico e dimensional das argamassas está diretamente relacionado ao equilíbrio entre o parâmetro E (areia + calcário), a relação água:sólidos e o tipo de fíler utilizado. Esses fatores atuam de maneira conjunta, influenciando a microestrutura da matriz e, conseqüentemente, seu desempenho ao longo do tempo.

No que se refere à estabilidade dimensional, observou-se que o aumento do parâmetro E e da relação água:sólidos intensifica tanto a retração quanto a perda de massa, especialmente em idades mais avançadas. Esse comportamento pode estar associado à maior porosidade e à maior quantidade de água evaporável no sistema. Nesse contexto, as misturas com fíler dolomítico apresentaram, de modo consistente, menor sensibilidade a essas variações, indicando maior capacidade de retenção de água e melhor estabilidade volumétrica, enquanto as misturas calcíticas se mostraram mais suscetíveis à retração em teores mais elevados.

Em relação ao desempenho mecânico, tanto na tração na flexão quanto na compressão, verificou-se que o aumento do parâmetro E resulta em redução dos valores absolutos de resistência, em função da diminuição do teor de cimento disponível para a formação dos produtos de hidratação. Ainda assim, as misturas com maior conteúdo de fíler apresentaram ganhos relativos mais expressivos ao longo do tempo, embora insuficientes para compensar os menores níveis iniciais de resistência. De maneira geral, as misturas com fíler dolomítico apresentaram desempenho superior às calcíticas, sobretudo nas idades intermediárias e finais, o que pode ser atribuído a um empacotamento mais eficiente das partículas e a uma matriz mais homogênea.

A influência da relação água:sólidos se mostrou determinante em todas as propriedades avaliadas. O aumento de H resultou, de forma consistente, em maior retração, maior perda de massa e redução das resistências mecânicas e do módulo de elasticidade, evidenciando o papel central da porosidade no controle do desempenho das misturas. Esse efeito foi mais pronunciado nas formulações com fíler calcítico, enquanto as dolomíticas apresentaram resposta mais estável, especialmente em valores intermediários desse parâmetro.

No caso do módulo de elasticidade, os resultados acompanharam a tendência observada nas resistências mecânicas, com redução da rigidez à medida que aumentam o parâmetro E e a relação água:sólidos. No entanto, diferentemente das resistências, a influência do tipo de fíler foi menos expressiva, sugerindo que a rigidez do material está mais diretamente relacionada à estrutura global de poros do que às características específicas do calcário utilizado.

Dessa forma, os resultados indicam que a dosagem de argamassas para impressão 3D deve ser conduzida de maneira integrada, buscando um equilíbrio entre trabalhabilidade, desempenho mecânico e estabilidade dimensional. Embora o aumento do teor de fíler possa favorecer alguns aspectos da mistura, seu uso em excesso compromete a resistência e intensifica a retração. Nesse cenário, o fíler dolomítico se destaca como uma alternativa mais eficiente, por proporcionar melhor desempenho global, desde que associado a um controle adequado da relação água:sólidos.

CAPÍTULO 11

ETAPA EXPERIMENTAL 3: PLASTIFICAÇÃO POR ALTO TEOR DE FÍLER

Segundo Miranda e Selmo (1999), o aumento da fração de finos, compreendendo cimento, adições minerais e partículas inertes com diâmetro inferior a 75 μm , exerce influência significativa na plasticidade e na coesão das argamassas, independentemente da natureza química desses materiais. Considerando que o filer calcário empregado neste estudo apresenta elevada finura, sua incorporação tende a intensificar o empacotamento das partículas, melhorar a coesão interna da matriz e potencialmente reduzir a demanda de água para atingir determinada consistência.

Assim, a Etapa Experimental 3 foi desenvolvido com o objetivo de investigar a influência do aumento do teor de filer calcário sobre a plasticidade, a coesão e o desempenho mecânico das misturas destinadas à impressão 3D.

As misturas previamente testadas nas Etapas Experimentais 1 e 2 foram utilizadas como composições de referência para incorporação progressiva de filer calcário. Os incrementos foram realizados de forma empírica, em etapas sucessivas de 5% em relação à massa de cimento, acompanhados de ajustes proporcionais no teor de água sempre que necessário.

As formulações produzidas foram avaliadas quanto à capacidade de extrusão, estabilidade geométrica e empilhamento de camadas, repetindo-se os ajustes até obtenção de comportamento satisfatório.

As misturas validadas foram submetidas aos ensaios de caracterização no estado fresco e no estado endurecido, permitindo avaliar os efeitos do aumento da fração de finos sobre a estabilidade dimensional, as propriedades mecânicas e o desenvolvimento do módulo de elasticidade.

Diferentemente da Etapa Experimental 1, nesta etapa não foram moldados corpos de prova cilíndricos destinados à construção dos gráficos de Selmo (1989), uma vez que o foco principal concentrou-se na análise do efeito do elevado teor de filer sobre o comportamento global das misturas.

11.1 RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 3

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da incorporação progressiva de maiores teores de fíler calcário às misturas previamente ajustadas. A análise abrange as alterações nas proporções dos constituintes e seus reflexos no comportamento das misturas, na distribuição volumétrica da matriz e no desempenho mecânico e dimensional ao longo do tempo. Busca-se, assim, estabelecer uma interpretação integrada dos impactos decorrentes do aumento da fração de finos, considerando tanto o estado fresco quanto a evolução das propriedades no estado endurecido.

11.1.1 Definição dos traços, ajustes de dosagem e estrutura volumétrica

A Tabela 16 apresenta os dados consolidados das misturas avaliadas da Etapa Experimental 3, incluindo os traços inicialmente propostos, as composições ajustadas após o refinamento e os consumos em massa correspondentes à produção de 1 m³ de argamassa. Esses dados permitem uma análise comparativa direta entre as formulações preliminares e aquelas efetivamente adotadas após os ajustes realizados com base no desempenho das misturas. Os filamentos extrudados são apresentados na Figura 58.

Tabela 16 - Composições das argamassas testadas na Etapa Experimental 3

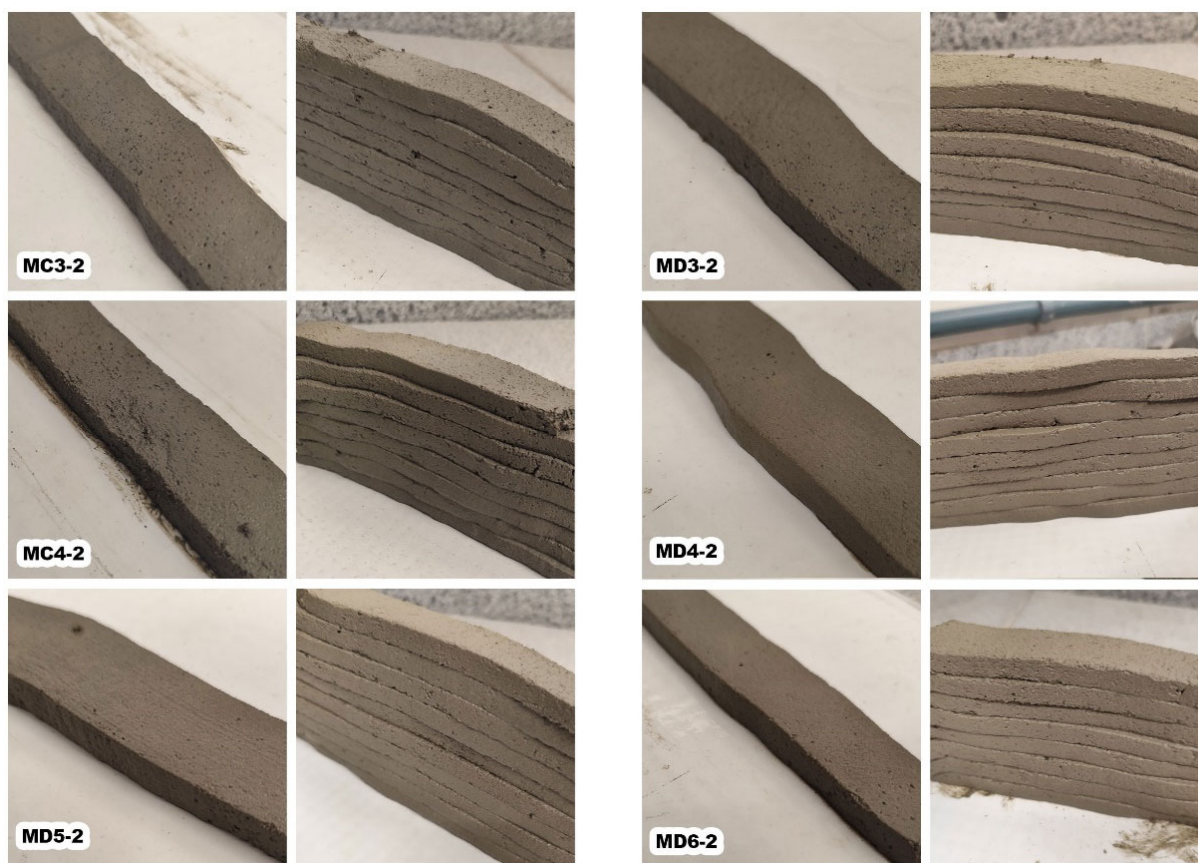
MISTURA	CPII-F-40	S.A.	C.C.	C.D.	AGREGADO	A/C	SP	
MC3-2	Inicial	1,0	0,05	1,00	-	3,0	0,85	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	1,00	-	3,0	0,80	0,015
	Massa (kg)	374,22	18,71	374,22	0,00	1122,66	299,38	5,61
MC4-2	Inicial	1	0,05	1,25	-	4,0	1,20	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	1,50	-	4,0	1,15	0,015
	Massa (kg)	278,68	13,93	418,02	0,00	1114,72	320,48	4,18
MD3-2	Inicial	1,0	0,05	-	0,75	3,0	0,80	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	-	0,75	3,0	0,80	0,015
	Massa (kg)	387,98	19,40	0,00	290,98	1163,94	310,38	5,82
MD4-2	Inicial	1	0,05	-	1,10	4,0	1,15	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	-	1,10	4,0	1,15	0,015
	Massa (kg)	290,93	14,55	0,00	320,03	1163,74	334,57	4,36
MD5-2	Inicial	1,0	0,05	-	1,3	5,0	1,45	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	-	1,30	5,0	1,45	0,015
	Massa (kg)	238,49	11,92	0,00	310,04	1192,44	345,81	3,58
MD6-2	Inicial	1	0,05	-	1,60	6	1,85	0,015
	Ajustado	1,0	0,05	-	1,60	6,0	1,80	0,015
	Massa (kg)	198,62	9,93	0,00	317,79	1191,69	357,51	2,98

Fonte: Autoria própria, 2026

Durante esta etapa experimental, verificou-se que as misturas MC5 e MC6 não apresentaram viabilidade para o aumento adicional do teor de fíler calcário, uma vez que não atingiram plasticidade adequada para a extrusão quando submetidas a teores superiores aos previamente testados. Tal comportamento evidenciou uma limitação dessas composições

quanto à incorporação adicional de material inerte, levando à exclusão dessas misturas das etapas subsequentes de avaliação.

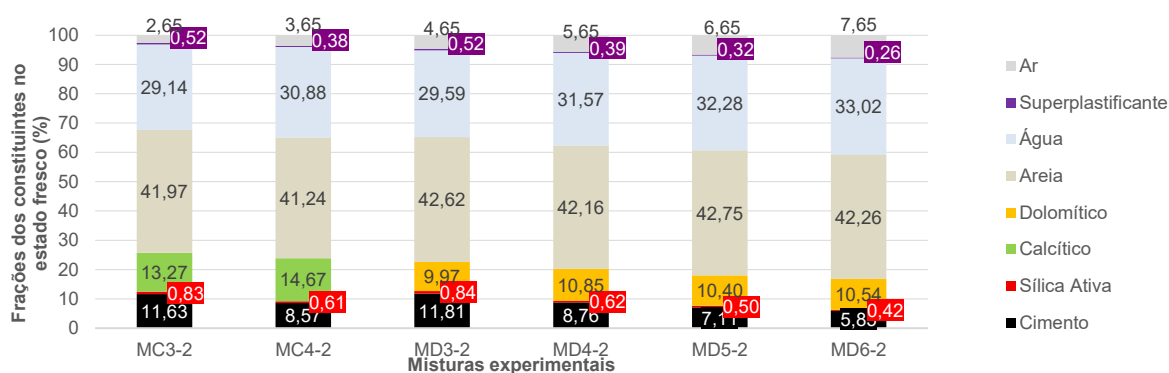
Figura 58 - Filamentos extrudados na Etapa Experimental 3



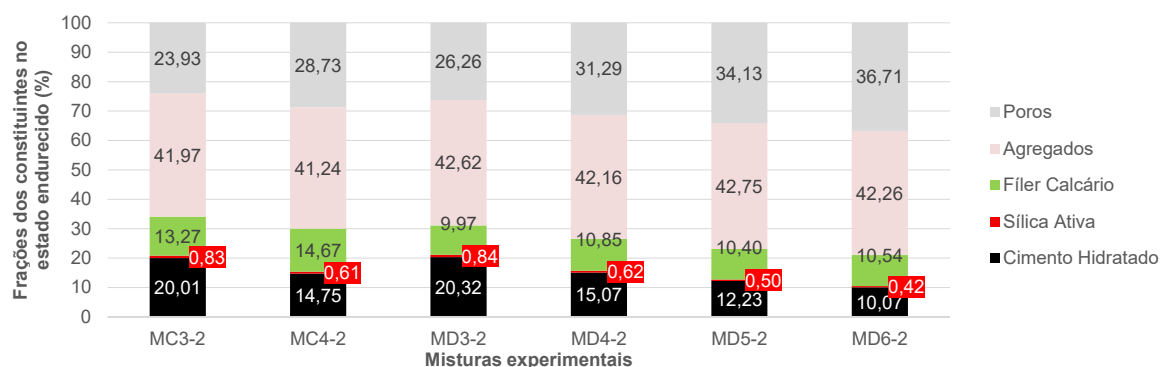
Fonte: Autoria própria, 2026

A partir dos traços ajustados, definiu-se a proporção final dos constituintes das argamassas nos estados fresco (Figura 59) e endurecido (Figura 60), conforme o método apresentado por Quarcioni *et al.* (2009), possibilitando uma visualização clara das alterações promovidas na composição global das misturas.

Figura 59 - Composição das argamassas na Etapa Experimental 3 no estado fresco



Fonte: Autoria própria, 2026

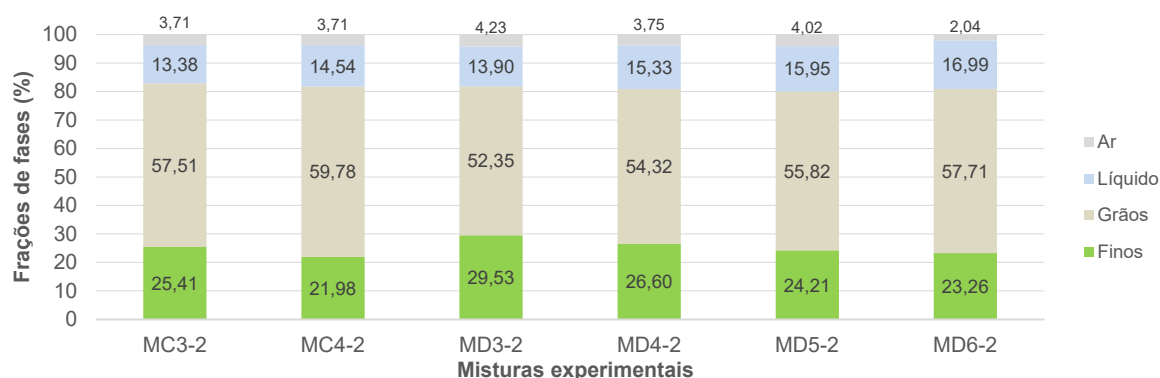
Figura 60 - Composição das argamassas na Etapa Experimental 3 no estado endurecido

Fonte: Autoria própria, 2026

Diferentemente do observado na etapa experimental 1, o aumento do teor de fíler, nesta etapa, levou as misturas com calcário dolomítico a apresentarem maior fração de poros no estado endurecido em comparação às misturas com calcário calcítico, para valores próximos ao parâmetro E (M3 e M4). Esse comportamento sugere que, em teores mais elevados de fíler, o calcário dolomítico pode comprometer o empacotamento das partículas, contribuindo para o aumento da porosidade.

De modo geral, o aumento da fração de fíler calcário resultou em maior porosidade em todas as misturas analisadas. Esse efeito está associado à diluição da matriz cimentícia e à consequente redução da quantidade de produtos de hidratação, o que favorece a formação de vazios e, portanto, o incremento da porosidade.

A composição das argamassas em termos de fases constituintes é apresentada na Figura 61, enquanto a Tabela 17 mostra a variação percentual das frações volumétricas de finos, grãos, líquidos e ar incorporado em relação às misturas das etapas experimentais anteriores.

Figura 61 - Composição percentual por fase das argamassas da Etapa Experimental 3

Fonte: Autoria própria, 2026

Tabela 17 - Variação percentual das frações volumétricas das fases constituintes das argamassas da Etapa Experimental 3 em relação as Etapas Experimentais 1 e 2

MISTURA		FINOS	GRÃOS	LÍQUIDO	TEOR DE AR
MC3	MC3-2	-2,57	-1,11	-1,36	67,79
MC4	MC4-2	-0,95	0,07	-5,83	40,49
MD3	MD3-2	-1,08	-4,17	-6,11	486,98
MD4	MD4-2	6,04	-6,81	0,53	172,71
MD5	MD5-2	9,97	-7,24	-3,33	206,23
MD6	MD6-2	19,70	-6,68	-0,49	23,30

Fonte: Autoria própria, 2026

Observa-se que, para as misturas MC3-2, MC4-2 e MD3-2, houve redução do teor volumétrico de finos. Esse resultado indica que, embora o fíler tenha sido adicionado em maiores quantidades em massa, seu impacto volumétrico foi mitigado por alterações nas demais fases, sobretudo pela incorporação significativa de ar. Já as misturas MD4-2, MD5-2 e MD6-2, embora tenham apresentado aumento do teor volumétrico de finos, tais aumentos não ocorreram de forma uniforme, evidenciando que a elevação do teor de fíler em massa não se traduz necessariamente em aumento proporcional da fração volumétrica de finos em sistemas altamente sensíveis à incorporação de ar.

De modo geral, verificou-se uma redução sistemática da fração volumétrica de grãos em todas as misturas, associada à necessidade de acomodação volumétrica decorrente tanto do aumento do fíler quanto da incorporação de ar. A fração líquida apresentou comportamento variável, com reduções significativas em algumas misturas e estabilidade relativa em outras, indicando compensações volumétricas entre as fases.

O aspecto mais marcante desta etapa foi o expressivo aumento do teor de ar incorporado em todas as misturas, com destaque para a MD3-2, que apresentou incremento de 486,98%. Esse comportamento promoveu uma alteração significativa da estrutura volumétrica das argamassas, com implicações diretas nas propriedades e no desempenho mecânico e dimensional do material.

11.1.2 Comportamento no estado fresco

A Tabela 18 apresenta os resultados das propriedades no estado fresco das misturas finais avaliadas nesta etapa, incluindo índice de consistência, densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado.

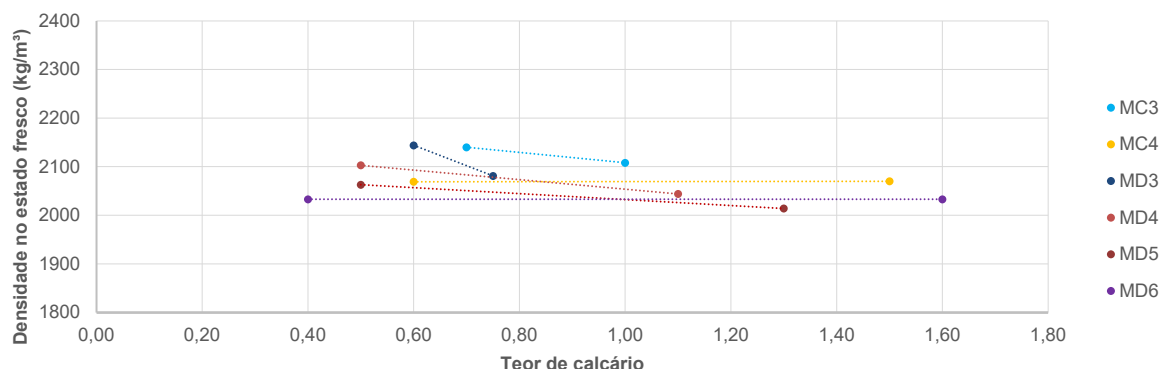
Tabela 18 - Resultados dos no estado fresco das misturas da Etapa Experimental 3

MISTURA	DENSIDADE (kg/m ³)	TEOR DE AR (%)	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (mm)	
			Média	Desvio Padrão
MC3-2	2108	3,71	214	3,5
MC4-2	2070	3,71	240	2,0
MD3-2	2081	4,23	257	5,8
MD4-2	2044	3,75	286	5,3
MD5-2	2014	4,02	273	2,6
MD6-2	2033	2,04	282	1,5

Fonte: Autoria própria, 2026

▪ Densidade no Estado Fresco

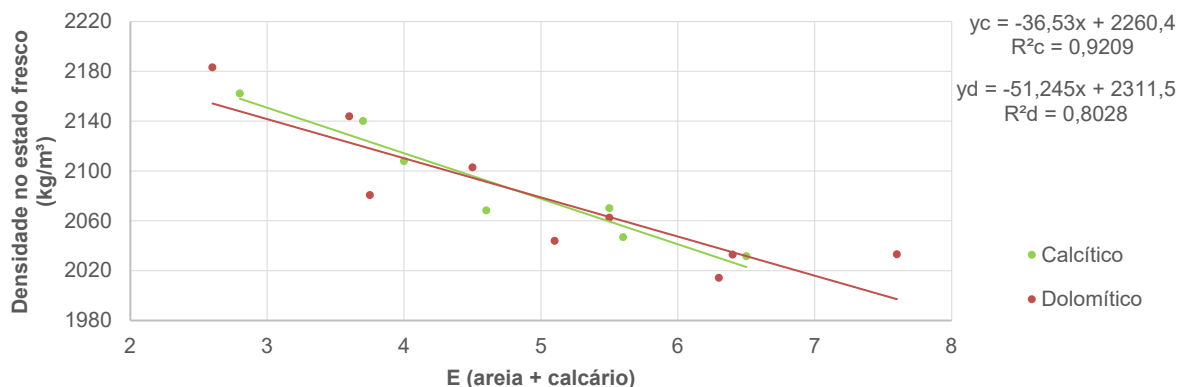
No que se refere à densidade de massa no estado fresco (Figura 62), observa-se que, apesar do aumento do teor de fíler calcário, as densidades permaneceram praticamente constantes, com reduções moderadas. As maiores reduções foram observadas nas misturas MD3-2, MD4-2 e MD5-2, com decréscimos inferiores a 3%, enquanto as demais misturas apresentaram reduções inferiores a 1,5%.

Figura 62 - Comparação da densidade no estado fresco das misturas das Etapas Experimentais 2 e 3

Fonte: Autoria própria, 2026

Do ponto de vista do aumento do teor de calcário, comparação entre misturas com o mesmo teor de areia indica tendência predominante de redução da densidade com o aumento do conteúdo de fíler. De modo geral, têm-se que para o grupo MC, observa-se que o aumento do teor de calcário tende a reduzir ou manter estável a densidade, sugerindo que a elevação do volume de finos pode estar associada a ligeira diminuição da massa específica global da mistura. Para o grupo MD, observa-se tendência mais clara de diminuição da densidade com o aumento do calcário, sugerindo que o acréscimo de material fino promove alterações no empacotamento e na estrutura interna da matriz, resultando em menor densidade aparente.

A Figura 63 apresenta a relação entre a densidade no estado fresco e o fator E para todas as misturas testadas.

Figura 63 - Relação entre a densidade e o fator E

Fonte: Autoria própria, 2026

Os resultados indicam uma relação inversa consistente entre a densidade das misturas e o fator E (areia + calcário), tanto para o grupo MC quanto para o grupo MD. À medida que o parâmetro E aumenta, observa-se, de modo geral, uma redução na densidade aparente das composições.

No grupo MC, a densidade decresce progressivamente de 2162 kg/m³ (E = 2,8) para 2032 kg/m³ (E = 6,5), evidenciando que o aumento do conteúdo de calcário calcítico e areia promove uma diminuição da massa específica do compósito. Essa tendência é relativamente linear, com pequenas variações pontuais (como entre MC4 e MC4-2), mas mantendo o comportamento global de queda da densidade com o aumento do fator E.

Comportamento semelhante é verificado no grupo MD. A densidade passa de 2183 kg/m³ (E = 2,6) para valores em torno de 2033 kg/m³ (E = 6,4–7,6). Embora haja pequenas oscilações intermediárias, especialmente entre MD4 e MD5, o padrão geral também indica redução da densidade com o incremento do teor de calcário dolomítico e areia.

Comparativamente, o grupo MD apresenta densidades ligeiramente superiores às do grupo MC nos menores valores de E, sugerindo possível influência da natureza mineralógica do calcário dolomítico na estrutura inicial da matriz. Entretanto, em teores mais elevados de E, as densidades dos dois grupos convergem para valores próximos (≈ 2030 kg/m³), indicando que, em maiores proporções de finos minerais, o efeito do tipo de calcário tende a ser menos pronunciado do que o efeito do próprio aumento do fator E.

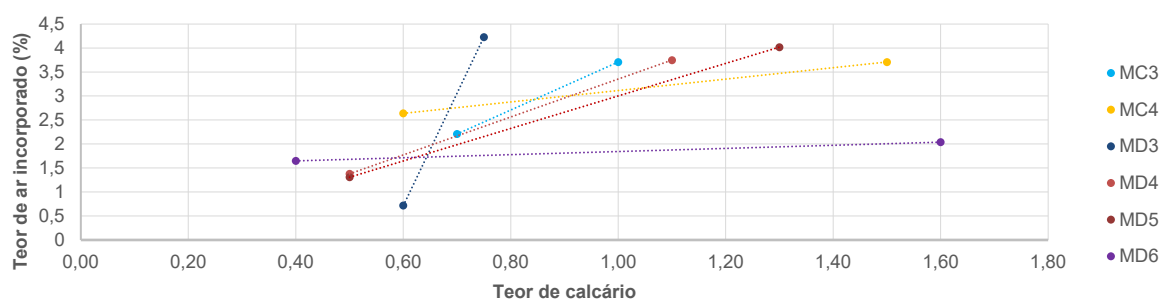
De forma geral, os dados evidenciam que o aumento do fator E está associado à redução da densidade das misturas, comportamento que pode estar relacionado a alterações no empacotamento das partículas e na distribuição granulométrica do sistema, influenciando a compacidade final da matriz cimentícia.

▪ Teor de Ar Incorporado

A Figura 64 apresenta a comparação entre os teores de ar incorporado das misturas com menores e maiores conteúdos de fíler calcário.

Quanto a influência do teor de calcário nas misturas, a comparação entre as misturas MC e suas correspondentes MC-2, evidencia tendência clara de aumento do teor de ar incorporado com o acréscimo de fíler. Esse comportamento indica que o aumento do teor de calcário favoreceu a incorporação ou retenção de ar na matriz, possivelmente em função do aumento da superfície específica e da modificação da reologia da mistura, que pode dificultar a saída das bolhas durante o adensamento.

Figura 64 - Comparação dos teores de ar incorporado das misturas das Etapas Experimentais 2 e 3



Fonte: Autoria própria, 2026

No grupo MD, a tendência é ainda mais pronunciada e consistente. Em todas as comparações verifica-se aumento do teor de ar com o maior teor de calcário, com incrementos expressivos, como no caso de MD3 (0,72% para 4,23%) e MD5 (1,31% para 4,02%). Esses resultados sugerem que o acréscimo de calcário dolomítico exerce influência marcante na retenção de ar, possivelmente devido à maior quantidade de finos disponíveis para estabilizar bolhas ou alterar a viscosidade da pasta.

Diferentemente do comportamento observado para a densidade, onde a tendência foi de redução, o teor de ar apresenta aumento sistemático com o incremento do teor de calcário em ambos os grupos analisados. No entanto, apesar dos aumentos percentuais observados, os valores absolutos de ar incorporado permanecem relativamente baixos, indicando que, embora o fíler favoreça a retenção de microbolhas de ar e influencie positivamente o comportamento das misturas, esse efeito ainda é limitado no contexto das formulações avaliadas. Paralelamente, a análise da relação entre o teor de ar incorporado e o parâmetro E (areia+ calcário) indica ausência de correlação linear significativa para ambos os grupos de mistura.

No grupo MC, os valores de teor de ar variam de 1,36% a 3,74% ao longo da faixa de E entre 2,8 e 6,5, porém sem tendência monotônica clara de aumento ou redução. Observa-se comportamento oscilatório: misturas com valores próximos de E apresentam teores de ar bastante distintos (por exemplo, MC3 e MC3-2), e misturas com maior E não apresentam sistematicamente maior ou menor incorporação de ar. Embora haja leve tendência de redução do teor de ar nas maiores faixas de E (como em MC5 e MC6), essa variação não se mantém de forma consistente ao longo de toda a série, resultando em baixo coeficiente de determinação.

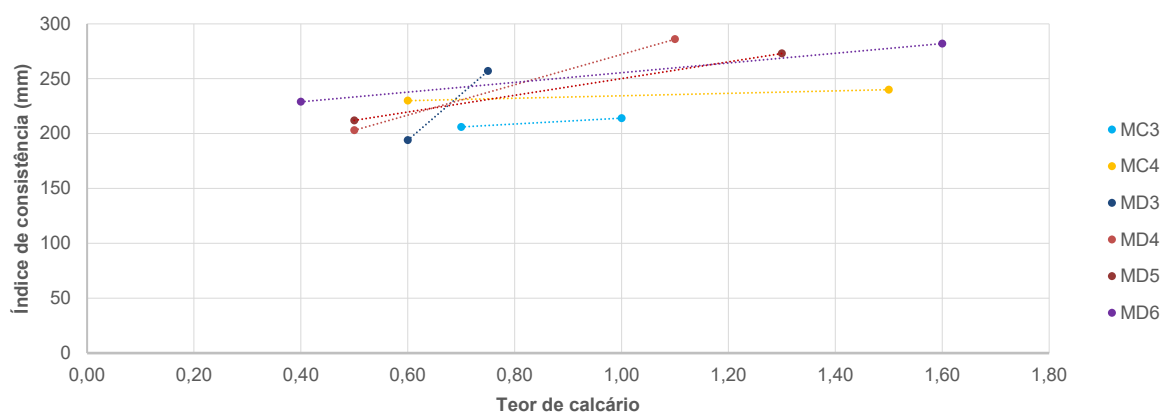
Comportamento semelhante é observado no grupo MD. Valores elevados de ar incorporado aparecem tanto em níveis intermediários quanto mais altos de E (MD3-2, MD4-2 e MD5-2), enquanto teores baixos também se distribuem ao longo de diferentes faixas do parâmetro. Essa dispersão reforça o caráter aleatório da relação e explica o baixo R^2 obtido.

De modo geral, os resultados indicam que o parâmetro E, isoladamente, não é um bom preditor do teor de ar incorporado para nenhuma das duas naturezas de calcário avaliadas. Assim, pode-se concluir que, diferentemente do comportamento observado para a densidade, o teor de ar não apresenta dependência linear significativa em relação ao parâmetro E nas condições experimentais analisadas.

▪ Índice de Consistência

A Figura 65 mostra o comparativo do índice de consistência entre as misturas com menor e maior teor de fíler calcário.

Figura 65 - Comparação do índice de consistência das misturas das Etapas Experimentais 2 e 3



Fonte: Autoria própria, 2026

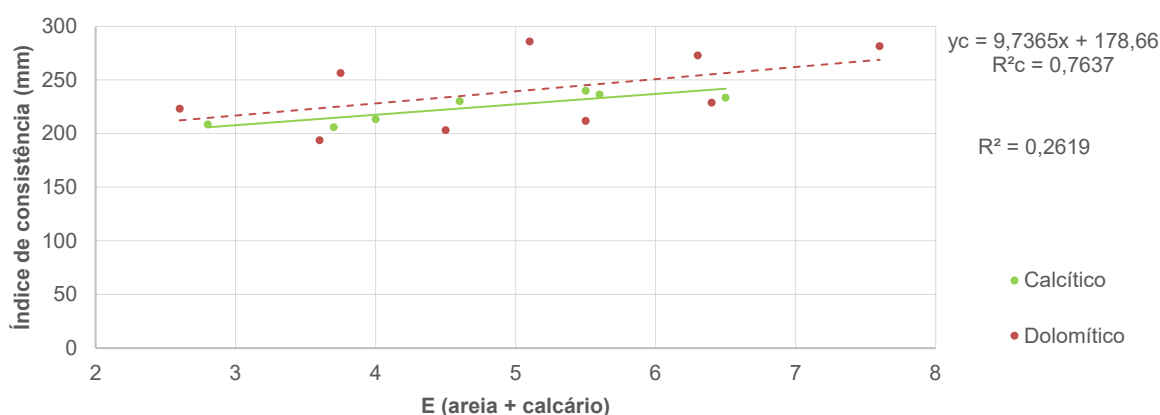
Ao comparar as misturas, observa-se tendência consistente de aumento do índice de consistência com o acréscimo de filer, tanto para MC quanto para MD. No grupo MC, MC3-2 e MC4-2 apresentaram maiores espalhamentos que suas misturas correspondentes, indicando ganho de fluidez com o aumento do calcário. No grupo MD, essa tendência é ainda mais evidente: todas as misturas apresentaram espalhamentos significativamente superior aos respectivos traços base. Esses resultados indicam que, independentemente da natureza do calcário, o aumento do teor de material favoreceu a trabalhabilidade das misturas.

Cabe destacar as misturas MD4-2 e MD3-2, que apresentaram os maiores ganhos de espalhamento, correspondentes a 40,7% e 32,3%, respectivamente. Esse aumento significativo de fluidez indica uma melhora substancial na trabalhabilidade das argamassas, aspecto fundamental para a viabilidade do processo de impressão 3D.

Essas mesmas misturas apresentaram incrementos expressivos no teor de ar incorporado, com aumentos de 172,7% para a MD4-2 e 487% para a MD3-2 em relação às misturas originais. Esses resultados corroboram os achados de Sousa *et al.* (2019) e Martins *et al.* (2023), que destacam a influência positiva do teor de ar incorporado na redução da tensão de escoamento, no aumento da fluidez e na melhoria da trabalhabilidade de argamassas cimentícias, especialmente em sistemas com elevado teor de finos.

A análise da relação entre o índice de consistência e o parâmetro E (areia + calcário), considerando o conjunto das misturas avaliadas e conforme apresentado na Figura 66, evidencia comportamentos distintos entre os grupos MC e MD, indicando que a natureza mineralógica do filer influencia de maneira diferenciada a resposta das argamassas.

Figura 66 - Correlação entre índice de consistência e o parâmetro E



Fonte: Autoria própria, 2026

Para o grupo MC, observa-se uma tendência crescente do índice de consistência à medida que o parâmetro E aumenta. Esse comportamento é corroborado pelo valor satisfatório de R^2 obtido na regressão linear, indicando ajuste adequado dos dados ao modelo proposto. Assim, para as misturas com calcário calcítico, o parâmetro E mostrou-se um bom preditor do comportamento avaliado por meio do espalhamento, evidenciando relação consistente entre o incremento da fração de finos e o aumento da plasticidade.

Em contrapartida, o grupo MD apresentou comportamento mais disperso, refletido no baixo valor de R^2 da regressão. Embora algumas misturas com maiores valores de E tenham apresentado elevados índices de consistência, como MD4-2, MD5-2 e MD6-2, outras formulações com valores intermediários do parâmetro exibiram espalhamentos inferiores, como observado para a mistura MD3. Nota-se variação significativa mesmo entre composições com valores próximos de E, indicando ausência de tendência linear bem definida. Esse resultado sugere que, no caso do calcário dolomítico, fatores adicionais, como características físico-químicas do material, forma e textura das partículas ou interações com a água de amassamento, podem exercer influência mais relevante sobre a trabalhabilidade do que o aumento isolado do parâmetro E.

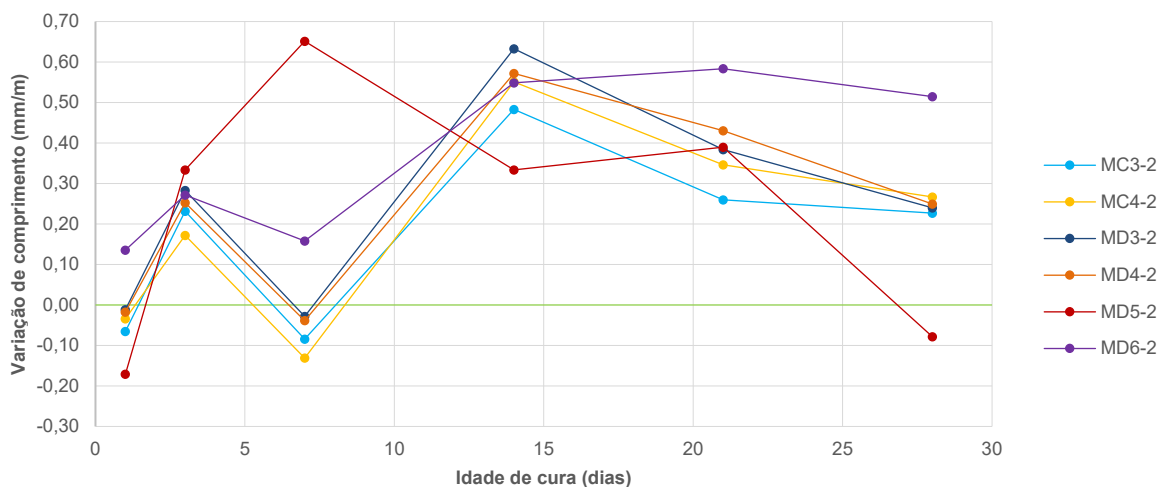
11.1.3 Desempenho no estado endurecido: estabilidade dimensional

No que se refere à variação linear, os resultados apresentados na Tabela 19 e Figura 67 indicam que a incorporação adicional de fíler calcário promoveu redução da magnitude das deformações, especialmente em idades intermediárias e avançadas.

Tabela 19 - Variação do comprimento (mm/m) dos corpos de prova da Etapa Experimental 3

MISTURAS	1D		3D		7D		14D		21D		28D	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
MC3-2	-0,065	0,023	0,232	0,026	-0,084	0,053	0,483	0,025	0,260	0,048	0,227	0,050
MC4-2	-0,034	0,011	0,172	0,096	-0,131	0,126	0,551	0,079	0,346	0,023	0,267	0,046
MD3-2	-0,012	0,011	0,283	0,036	-0,028	0,021	0,633	0,007	0,384	0,051	0,240	0,035
MD4-2	-0,018	0,009	0,253	0,049	-0,039	0,083	0,572	0,097	0,430	0,021	0,249	0,019
MD5-2	-0,171	0,023	0,333	0,026	0,651	0,019	0,333	0,067	0,389	0,106	-0,078	0,120
MD6-2	0,136	0,036	0,271	0,072	0,158	0,064	0,549	0,060	0,584	0,110	0,515	0,076

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 67 - Evolução da variação linear das misturas na Etapa Experimental 3

Fonte: Autoria própria, 2026

Nota-se que, de modo geral, as misturas analisadas apresentaram tendência à expansão, principalmente nas idades mais avançadas. Resultados semelhantes foram encontrados na pesquisa de Khatib *et al.* (2021), onde o aumento do teor de fíler calcário provocou expansão devido aos produtos hidratados (monocarboaluminato e hemi ou monocarbonato) formados em altos teores de fíler, conseguirem absorver mais água e inchar mais do que as pastas com baixo teor.

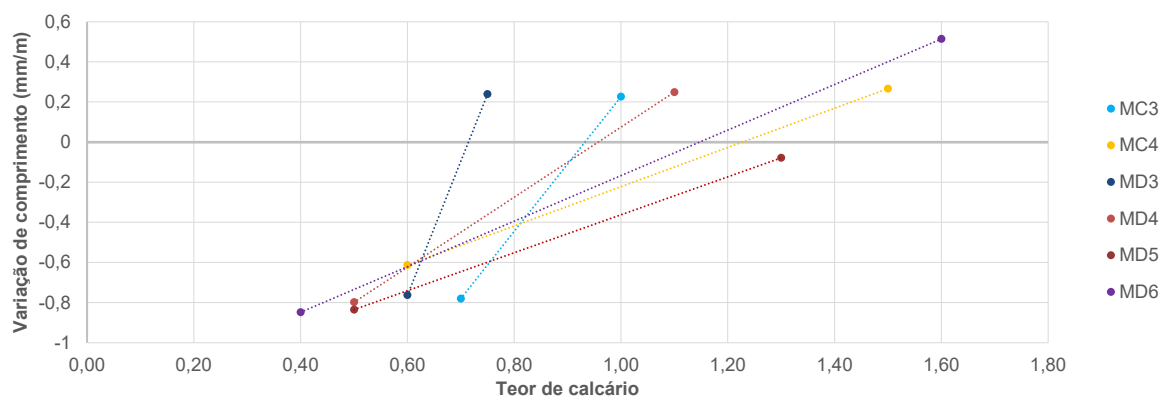
Além disso, os autores defendem que podem ocorrer mudanças na composição de fases dentro da rede de hidratos: à medida que o teor de CH no sistema diminuiu devido à adição do fíler, o aluminato de cálcio pode ser gradualmente substituído por carboaluminato, que tem uma densidade menor que o aluminato de cálcio, fornecendo uma contribuição extra para o processo de expansão (Khatib *et al.*, 2021).

No entanto, não se descarta a possibilidade de que pequenas variações nas condições ambientais de armazenamento e cura dos corpos de prova ao longo do período experimental possam ter influenciado parcialmente os resultados observados, especialmente nas idades mais avançadas, uma vez que fenômenos de movimentação higroscópica tendem a apresentar elevada sensibilidade às condições de exposição do material.

Quando comparadas aos resultados da etapa experimental anterior, as misturas da Etapa Experimental 3 apresentaram, em módulo, menores magnitudes de variação linear e, conforme evidenciado pela comparação gráfica apresentada na Figura 68, tendência à menor variação relativa em idades mais avançadas. Esse comportamento confirma que o aumento do teor de fíler calcário contribui de forma efetiva para a mitigação da variação linear,

especialmente em idades intermediárias e tardias, atuando como um mecanismo de restrição física às deformações volumétricas da matriz cimentícia.

Figura 68 - Análise comparativa da variação linear aos 28 dias entre as Etapas Experimentais 2 e 3



Fonte: Autoria própria, 2026

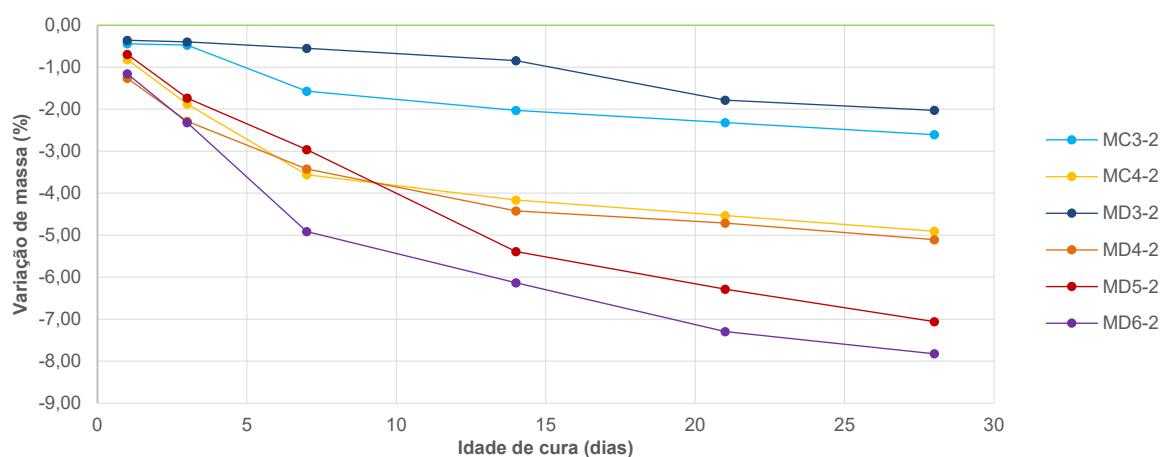
A análise da variação de massa (Tabela 20 e Figura 69) mostra que todas as misturas apresentaram perdas progressivas ao longo do tempo, porém com magnitudes inferiores às observadas na etapa experimental anterior.

Tabela 20 - Variação percentual de massa dos corpos de prova da Etapa Experimental 3

MISTURAS	1D		3D		7D		14D		21D		28D	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
MC3-2	-0,44	0,20	-0,47	0,15	-1,57	0,15	-2,03	0,19	-2,32	0,27	-2,61	0,35
MC4-2	-0,82	0,09	-1,88	0,55	-3,56	0,39	-4,16	0,33	-4,53	0,19	-4,91	0,10
MD3-2	-0,36	0,16	-0,40	0,11	-0,55	0,11	-0,84	0,10	-1,78	0,35	-2,03	0,36
MD4-2	-1,26	0,80	-2,29	1,28	-3,42	1,32	-4,42	1,11	-4,71	0,77	-5,11	0,61
MD5-2	-0,70	0,25	-1,74	0,43	-2,96	0,91	-5,39	0,94	-6,28	0,78	-7,06	0,85
MD6-2	-1,16	0,27	-2,32	0,55	-4,91	0,67	-6,13	0,62	-7,29	0,59	-7,82	0,55

Fonte: Autoria própria, 2026

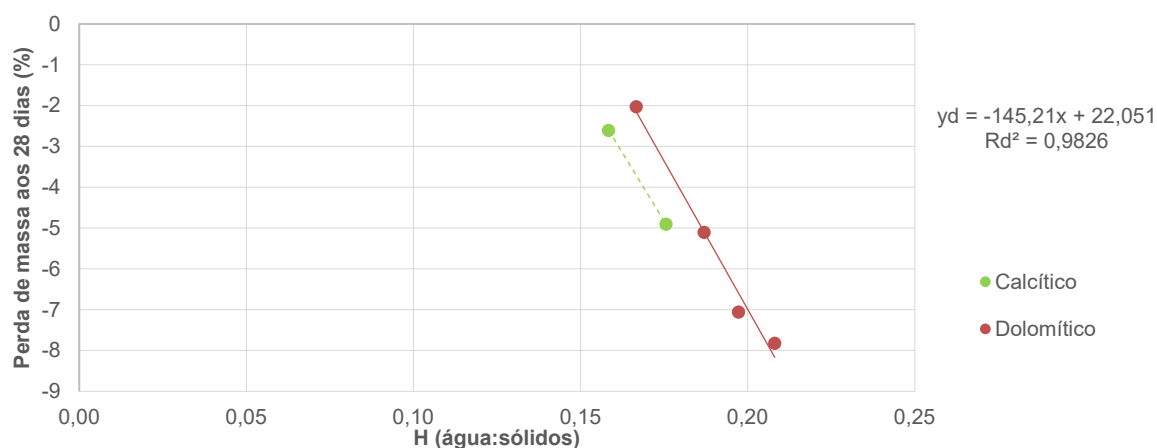
Figura 69 - Variação de massa das misturas na Etapa Experimental 3



Fonte: Autoria própria, 2026

Diferentemente do que acontece na variação linear, a avaliação da perda de massa em função do fator H (Figura 70) evidencia uma correlação bem definida. Observa-se que o aumento do fator H resultou em incremento sistemático da perda de massa, comportamento confirmado pelo elevado coeficiente de determinação para as misturas MD ($R^2 = 0,9826$), indicando forte dependência entre essas variáveis.

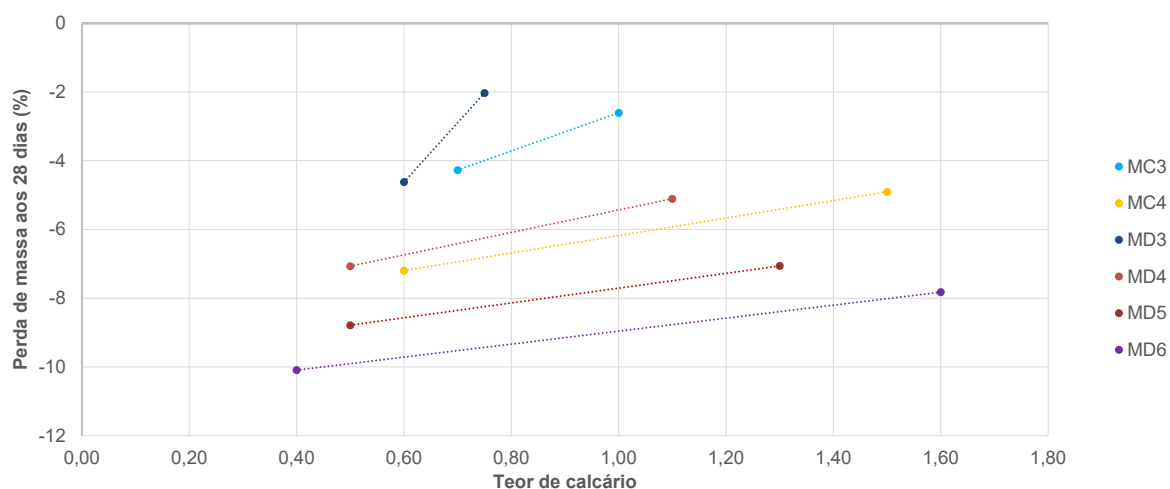
Figura 70 - Perda de massa das misturas da Etapa Experimental 3 aos 28 dias em função do fator H



Fonte: Autoria própria, 2026

A comparação da perda de massa aos 28 dias (Figura 71) evidencia que, embora ambas as etapas apresentem redução acumulada de massa ao longo do período de cura, as misturas da Etapa Experimental 3 mantiveram valores sistematicamente inferiores aos observados na etapa anterior.

Figura 71 - Comparação da variação de massa aos 28 dias entre as Etapas Experimentais 2 e 3



Fonte: Autoria própria, 2026

Esse comportamento sugere que o aumento do teor de fíler calcário contribuiu para a diminuição da taxa de evaporação de umidade, possivelmente em razão do melhor

empacotamento das partículas e da consequente redução da conectividade dos poros capilares. A presença de partículas finas de fíler atua preenchendo vazios e refinando a estrutura porosa, dificultando a mobilidade da água no interior da matriz cimentícia.

Observa-se, ainda, uma relação consistente entre a perda de massa e a retração dimensional, indicando que as deformações registradas estão fortemente associadas à saída de água da matriz ao longo do tempo. No entanto, conforme discutido anteriormente, a presença de fíler em maiores teores pode introduzir mecanismos expansivos que parcialmente compensam os efeitos da retração por secagem, especialmente em idades mais avançadas.

11.1.4 Desempenho no estado endurecido: resistência à flexão

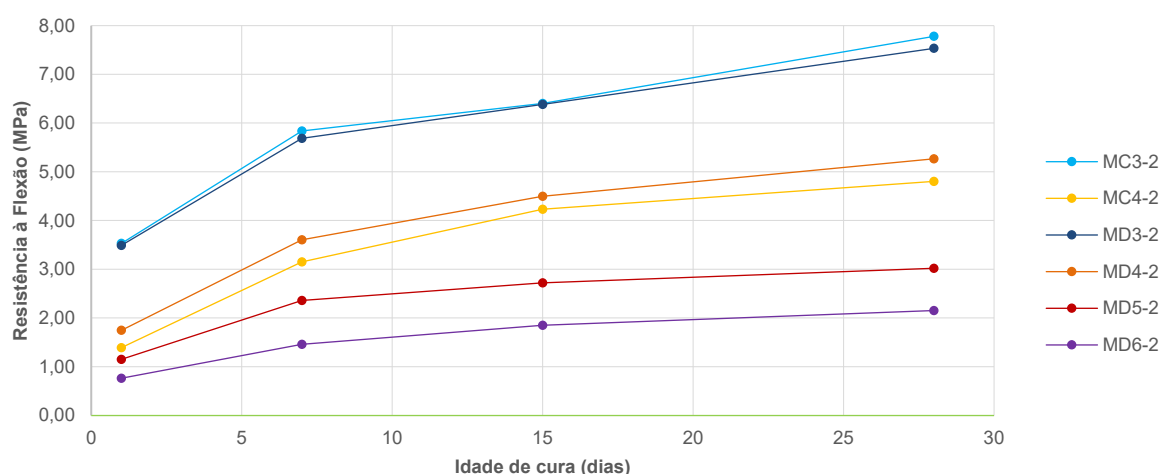
Os resultados de resistência à flexão (Tabela 21 e Figura 72) indicam crescimento progressivo ao longo do tempo para todas as misturas.

Tabela 21 - Resultados de resistência à flexão das misturas da Etapa Experimental 3

MISTURA	1D (MPa)		7D (MPa)		15D (MPa)		28D (MPa)	
	MÉDIA	D.P.	MÉDIA	D.P.	MÉDIA	D.P.	MÉDIA	D.P.
MC3-2	3,53	0,19	5,84	0,54	6,40	0,36	7,78	1,37
MC4-2	1,39	0,11	3,15	0,17	4,23	0,68	4,80	0,31
MD3-2	3,49	0,05	5,69	0,37	6,38	0,99	7,53	0,52
MD4-2	1,75	0,13	3,60	0,28	4,50	0,19	5,27	0,19
MD5-2	1,15	0,09	2,36	0,19	2,72	0,27	3,02	0,09
MD6-2	0,76	0,07	1,46	0,06	1,85	0,10	2,15	0,28

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 72 - Evolução da resistência à flexão das misturas da Etapa Experimental 3



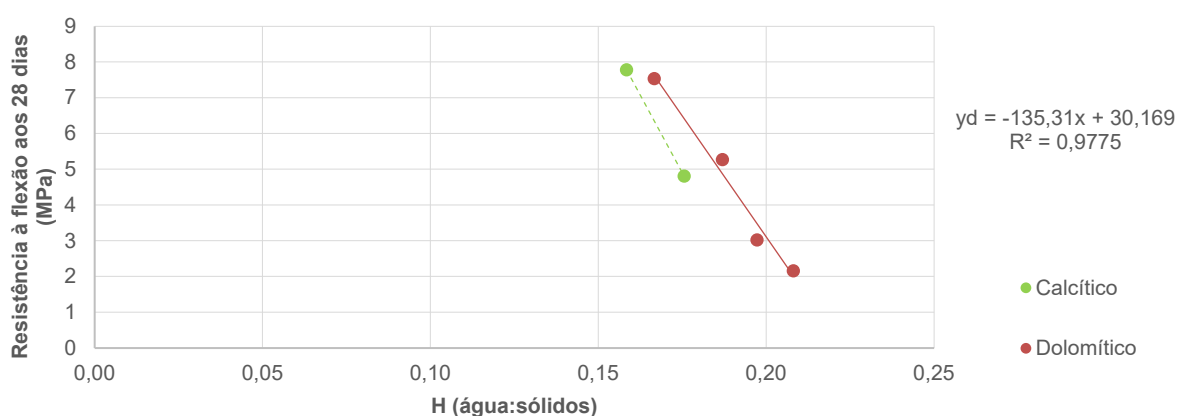
Fonte: Autoria própria, 2026

A análise da relação entre a resistência à flexão inicial (1 dia) e a resistência final (28 dias) demonstra que as misturas MC3-2 e MD3-2 apresentam uma relação mais equilibrada entre

os valores inicial e final, evidenciando uma evolução mecânica mais uniforme e consistente ao longo do tempo. Em contraste, as misturas MD5-2 e MD6-2 apresentam resistências iniciais significativamente reduzidas em relação aos valores obtidos aos 28 dias, o que indica uma matriz menos eficiente nos estágios iniciais de cura, possivelmente associada à menor formação inicial de produtos de hidratação capazes de promover a coesão interna da pasta cimentícia.

A análise da resistência à flexão aos 28 dias em função do fator H (Figura 73) evidencia uma tendência clara de redução da resistência com o aumento do fator H. Esse comportamento é coerente com o aumento da porosidade da matriz cimentícia decorrente de maiores teores de água, o que compromete a capacidade de transferência de tensões e favorece a propagação de fissuras sob carregamento

Figura 73 - Resistência à flexão da Etapa Experimental 3 aos 28 dias em função do fator H



Fonte: Autoria própria, 2026

Quando comparados aos resultados das misturas da etapa experimental anterior (Tabela 22), observa-se que o aumento do teor de fíler calcário resultou, de modo geral, em redução da resistência à flexão em todas as idades analisadas. A única exceção foi a mistura MC3-2, que apresentou desempenho superior ao da mistura de referência MC3, com um incremento de aproximadamente 3,64% na resistência à flexão aos 28 dias (Figura 74).

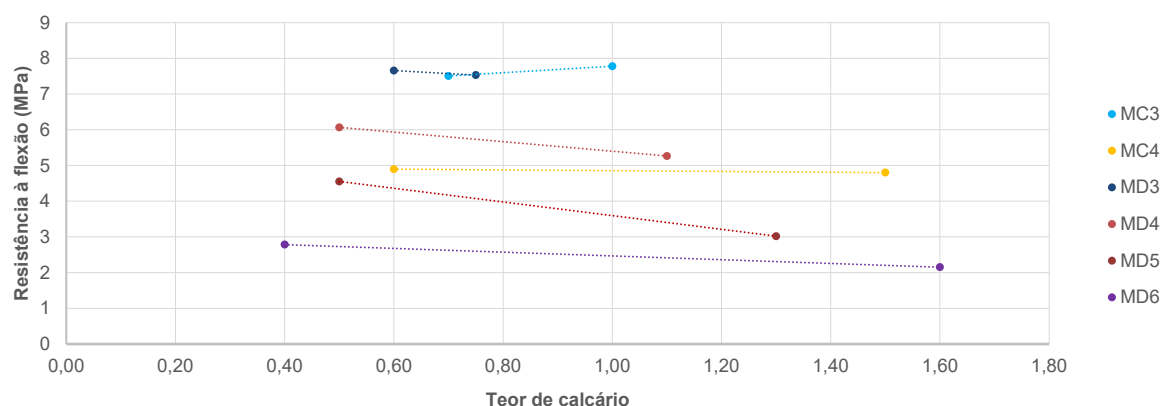
Tabela 22 - Variação percentual da resistência à flexão aos 28 dias entre as Etapas Experimentais 2 e 3

MISTURA	1D	7D	15D	28D
MC3 MC3-2	-0,47	13,70	2,62	3,64
MC4 MC4-2	-40,09	-24,70	-9,36	-1,97
MD3 MD3-2	-16,11	18,89	-0,93	-1,65
MD4 MD4-2	-37,25	-16,97	-20,54	-13,23
MD5 MD5-2	-31,55	-17,00	-30,91	-33,67
MD6 MD6-2	-33,82	-29,47	-28,29	-22,73

Fonte: Autoria própria, 2026

Para as misturas MC4-2 e MD3-2, embora também se observe uma redução da resistência à flexão em relação às misturas correspondentes da etapa anterior, essa diferença é relativamente pequena, da ordem de 2,0% e 1,62% aos 28 dias, respectivamente. Por outro lado, as misturas MD4-2, MD5-2 e MD6-2 apresentaram reduções expressivas da resistência à flexão quando comparadas às suas misturas de referência, alcançando aproximadamente 13,2%, 33,7% e 22,8% aos 28 dias, respectivamente.

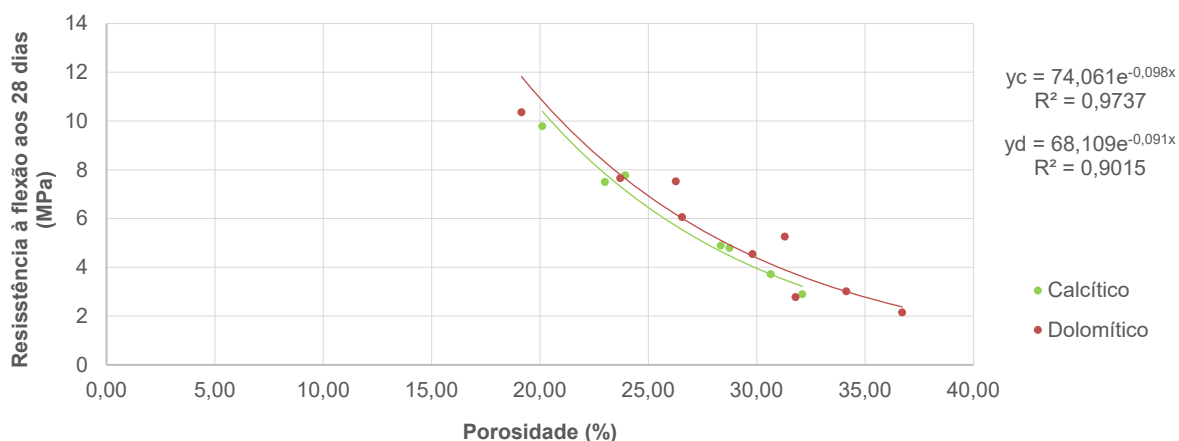
Figura 74 - Comparação da resistência à flexão aos 28 dias entre misturas das Etapas Experimentais 2 e 3



Fonte: Autoria própria, 2026

Além do efeito direto do fator H, a elevada incorporação de fíler calcário intensifica o efeito de diluição da matriz cimentícia, reduzindo a fração de cimento disponível e, consequentemente, limitando a formação de produtos de hidratação. Esse fenômeno torna-se mais crítico em misturas com maiores valores de H, nas quais a combinação entre o aumento da porosidade e a menor quantidade de ligante resulta em uma matriz estruturalmente mais frágil.

Esse comportamento é evidenciado na Figura 75, que mostra uma relação clara entre o aumento da porosidade e a redução da resistência à flexão das misturas. Assim, observa-se que, à medida que a porosidade se eleva, seja pelo incremento do fator H ou pelo maior teor de fíler, ocorre uma degradação significativa do desempenho mecânico, refletindo a menor coesão e capacidade resistente da matriz.

Figura 75 - Correlação entre a resistência à flexão e o volume de poros teóricos calculados

Fonte: Autoria própria, 2026

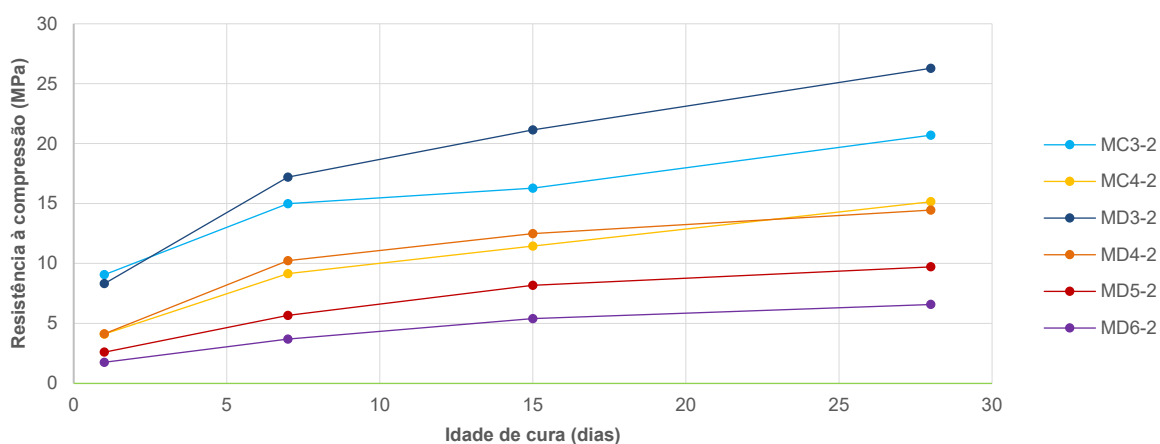
11.1.5 Desempenho no estado endurecido: resistência à compressão

Conforme apresentado na Tabela 23 e ilustrado na Figura 76, as misturas da Etapa Experimental 3 apresentaram ganho progressivo de resistência à compressão ao longo do período de cura.

Tabela 23 - Resultados de resistência à compressão das misturas da Etapa Experimental 3

MISTURA	1D (MPa)		7D (MPa)		15D (MPa)		28D (MPa)	
	MÉDIA	D.P.	MÉDIA	D.P.	MÉDIA	D.P.	MÉDIA	D.P.
MC3-2	9,1	0,7	15,0	2,4	16,3	2,4	20,7	2,2
MC4-2	4,1	0,1	9,2	0,3	11,5	0,6	15,2	0,7
MD3-2	8,3	0,5	17,2	2,4	21,1	2,4	26,3	1,6
MD4-2	4,1	0,3	10,2	0,4	12,5	1,2	14,5	0,7
MD5-2	2,6	0,2	5,7	0,3	8,2	0,7	9,7	0,5
MD6-2	1,8	0,3	3,7	0,2	5,4	0,1	6,6	0,3

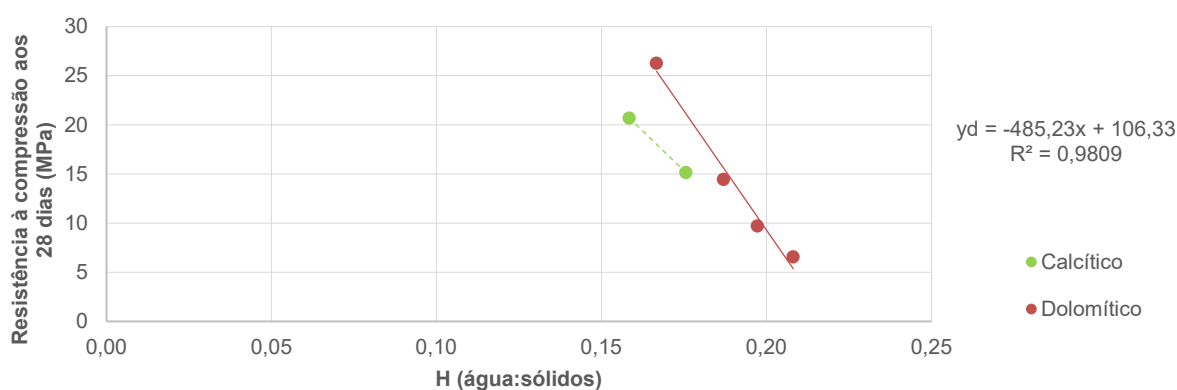
Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 76 - Evolução da resistência à compressão das misturas da Etapa Experimental 3

Fonte: Autoria própria, 2026

A análise da resistência à compressão aos 28 dias em função do fator H (Figura 77) reforça os resultados observados na resistência à flexão, evidenciando uma relação inversa entre essas variáveis, na qual o aumento do fator H resulta em redução significativa da resistência mecânica.

Figura 77 - Resistência à compressão da Etapa Experimental 3 aos 28 dias em função do fator H



Fonte: Autoria própria, 2026

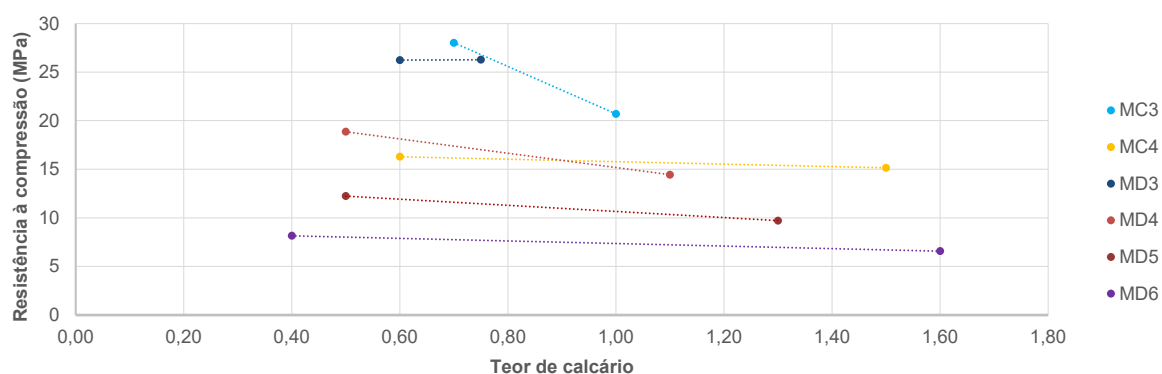
Na comparação apresentada na Tabela 24 e na Figura 78, no entanto, observa-se que a mistura MD3-2, aos 28 dias, apresentou resistência à compressão aos 28 dias muito próxima à registrada para a mistura MD3 da Etapa Experimental 2.

Tabela 24 - Variação percentual da resistência à compressão entre as Etapas Experimentais 2 e 3

MISTURA	1D	7D	15D	28D
MC3 MC3-2	-1,09	-14,54	-39,87	-26,12
MC4 MC4-2	-31,86	-32,80	-26,37	-7,06
MD3 MD3-2	-29,22	-19,38	-12,37	0,18
MD4 MD4-2	-42,99	-29,43	-25,03	-23,41
MD5 MD5-2	-36,33	-37,61	-29,39	-20,68
MD6 MD6-2	-38,60	-46,10	-28,95	-19,39

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 78 - Comparação da resistência à compressão aos 28 dias entre as Etapas Experimentais 2 e 3



Fonte: Autoria própria, 2026

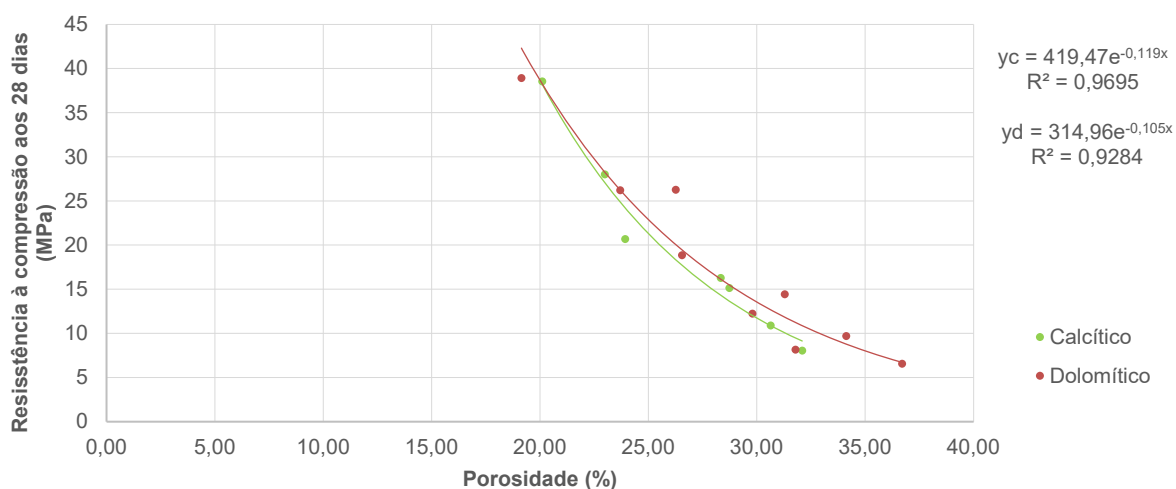
Esse resultado indica que, de maneira semelhante ao verificado para a resistência à tração na flexão, o aumento do teor de filer calcário nessa composição específica provocou impacto pouco significativo sobre o desempenho mecânico. Assim, a mistura manteve níveis de resistência elevados e compatíveis com aplicações estruturais ou semiestruturais, evidenciando que, para determinadas proporções, a elevação da fração de filer pode ser realizada sem comprometimento substancial da capacidade resistente.

Em contrapartida, as demais misturas MD apresentaram reduções mais acentuadas quando comparadas às suas correspondentes da Etapa Experimental 2, evidenciando maior sensibilidade ao aumento do teor de filer e ao fator H. Esse comportamento indica que, em composições com menor teor de cimento e, conseqüentemente, menor fração de pasta ativa, o acréscimo de material inerte tende a comprometer de forma mais pronunciada a capacidade resistente.

Observa-se ainda que as misturas MD5-2 e MD6-2, associadas aos maiores valores de fator H, apresentaram os menores desempenhos mecânicos, com resistências inferiores a 10 MPa aos 28 dias. Esse resultado reforça que a combinação entre elevado teor de água e alto conteúdo de filer resulta em uma matriz excessivamente porosa e com baixa eficiência na transferência de tensões (Figura 79).

De forma consistente com o comportamento observado na resistência à flexão, verifica-se que o aumento da porosidade das misturas também está diretamente associado à redução da resistência à compressão, evidenciando o papel determinante da estrutura porosa no desempenho mecânico do material.

Figura 79 - Correlação entre a resistência à compressão e o volume de poros teóricos calculados



Fonte: Autoria própria, 2026

11.1.6 Desempenho no estado endurecido: módulo de elasticidade

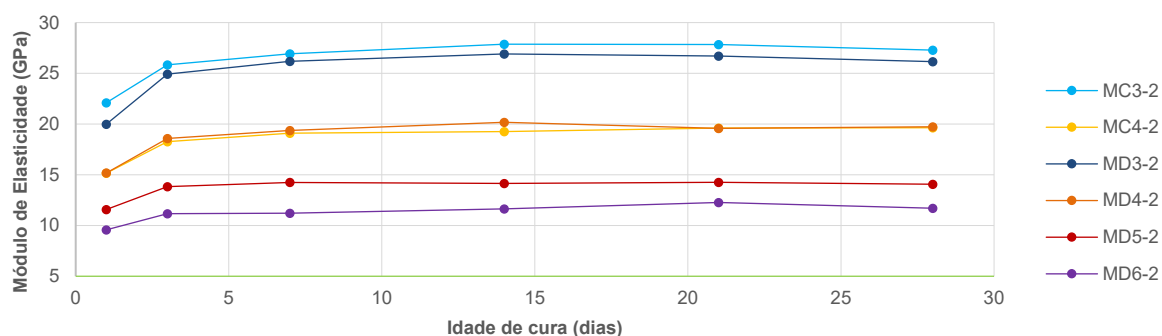
A Tabela 25 e a Figura 80 apresentam a evolução do módulo de elasticidade das misturas ao longo das idades de cura. Observa-se crescimento progressivo do módulo em todas as composições, com ganhos mais expressivos nas idades iniciais e tendência à estabilização a partir de 7 a 14 dias, comportamento típico de materiais cimentícios.

Tabela 25 - Valores do módulo de elasticidade das misturas da Etapa Experimental 3

MISTURAS	1D (GPa)		3D (GPa)		7D (GPa)		14D (GPa)		21D (GPa)		28D (GPa)	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
MC3-2	22,1	0,4	25,8	0,3	26,9	0,5	27,9	0,4	27,8	0,5	27,3	0,3
MC4-2	15,2	0,3	18,3	0,3	19,1	0,4	19,2	0,1	19,6	0,1	19,6	0,2
MD3-2	20,0	0,2	24,9	0,3	26,2	0,1	26,9	0,3	26,7	0,3	26,1	0,3
MD4-2	15,2	0,5	18,6	0,1	19,4	0,7	20,2	0,5	19,6	0,3	19,7	0,2
MD5-2	11,6	0,2	13,8	0,3	14,3	0,4	14,1	0,5	14,2	0,9	14,1	0,8
MD6-2	9,6	0,3	11,2	0,8	11,2	0,7	11,6	0,7	12,3	0,1	11,7	0,5

Fonte: Autoria própria, 2026

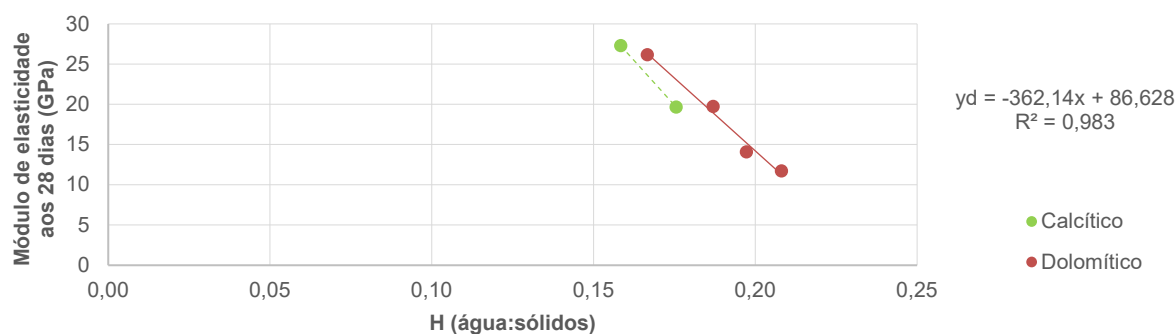
Figura 80 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas da Etapa Experimental 3



Fonte: Autoria própria, 2026

A análise em função do fator H aos 28 dias (Figura 81) evidencia uma relação inversa bem definida, semelhante à observada para a resistência à flexão e à compressão: o aumento do fator H resulta em redução significativa da rigidez da matriz.

Figura 81 - Módulo de elasticidade da Etapa Experimental 3 aos 28 dias em função do fator H



Fonte: Autoria própria, 2026

Esse comportamento pode estar diretamente relacionado ao aumento do volume de poros capilares e à redução da continuidade da matriz sólida, fatores que comprometem a capacidade do material de resistir a deformações elásticas. Além disso, o aumento do teor de fíler calcário contribui para o efeito de diluição do cimento, reduzindo a quantidade de produtos de hidratação responsáveis pela formação de uma estrutura rígida e coesa.

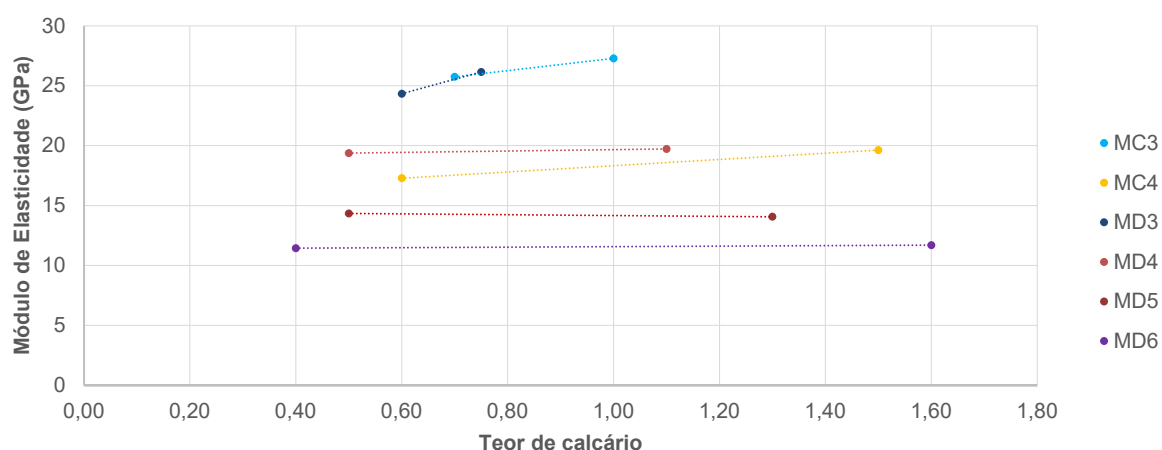
A comparação com a segunda etapa experimental (Tabela 26 e Figura 82) evidencia que, de modo geral, as misturas da Etapa 3 apresentaram ganhos percentuais positivos no módulo de elasticidade, sobretudo nas idades iniciais, indicando que o aumento do teor de fíler calcário, mesmo de forma modesta, contribuiu para a elevação da rigidez inicial da matriz.

Tabela 26 - Variação percentual do módulo de elasticidade em relação a Etapa Experimental 2

MISTURA		1D	3D	7D	14D	21D	28D
MC3	MC3-2	13,16	8,30	8,49	4,10	5,13	5,95
MC4	MC4-2	-0,54	16,26	20,35	8,80	11,76	13,57
MD3	MD3-2	1,52	13,49	14,17	7,83	8,11	7,45
MD4	MD4-2	-4,39	8,41	7,51	0,63	-0,62	1,79
MD5	MD5-2	-3,69	9,46	5,94	-4,97	-2,46	-1,91
MD6	MD6-2	0,54	21,70	11,09	-0,56	5,90	2,17

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 82 - Comparação do módulo de elasticidade aos 28 dias entre as Etapas Experimentais 2 e 3



Fonte: Autoria própria, 2026

Destacam-se as misturas com menores valores do parâmetro E, como MC3-2 e MD3-2, que apresentaram ganhos consistentes ao longo de todas as idades analisadas, evidenciando que, nessas composições, o incremento do fíler favoreceu o desenvolvimento da rigidez sem comprometer a evolução temporal da propriedade.

11.2 SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 3

De forma global, os resultados da Etapa Experimental 3 evidenciam que o aumento do teor de fíler calcário promove alterações relevantes no comportamento, na estrutura volumétrica e no desempenho no estado endurecido das argamassas.

No estado fresco, verificou-se melhora consistente da trabalhabilidade das misturas, expressa pelo aumento do índice de consistência, comportamento associado à maior incorporação de ar. Apesar desse incremento, não foram observadas reduções expressivas na densidade de massa, indicando que o efeito do ar incorporado, embora significativo, não comprometeu de forma crítica a compacidade global do sistema.

Do ponto de vista volumétrico, constatou-se que o aumento do teor de fíler em massa não resulta, necessariamente, em elevação proporcional da fração volumétrica de finos. A incorporação de ar desempenhou papel determinante na redistribuição das fases, tornando a estrutura interna das misturas mais complexa e evidenciando que o ar passa a atuar como um terceiro componente relevante no balanço volumétrico.

No estado endurecido, os resultados de estabilidade dimensional indicaram redução da retração em módulo, com tendência à expansão em idades mais avançadas, especialmente nas misturas com maiores teores de fíler. Esse comportamento está associado à formação de produtos hidratados capazes de promover variações volumétricas positivas, evidenciando que o aumento do fíler não atua apenas como material de preenchimento, mas também influencia a evolução química do sistema.

A análise da perda de massa demonstrou que o fator H exerce influência direta sobre a evaporação de água, especialmente nas misturas com fíler dolomítico, para as quais foi observada forte correlação entre essas variáveis. Ainda assim, as misturas da Etapa Experimental 3 apresentaram perdas inferiores às da etapa anterior, indicando que o aumento do teor de fíler contribui para a redução da mobilidade da água no sistema.

De modo geral, as misturas com fíler calcítico tenderam a apresentar maiores magnitudes de retração, mesmo associadas a perdas de massa moderadas, enquanto as misturas com fíler dolomítico demonstraram maior sensibilidade à variação do fator H em termos de perda de massa, porém com comportamento dimensional mais estável em determinadas composições. Essas diferenças sugerem que características intrínsecas dos materiais, como granulometria, morfologia e composição mineralógica, influenciam de forma significativa a interação entre os constituintes da matriz.

No que se refere ao desempenho mecânico, observou-se redução generalizada das resistências à flexão e à compressão com o aumento do fator H e do teor de fíler, evidenciando a influência da redução da fração de ligante ativo no sistema. Esse efeito foi mais pronunciado nas misturas com fíler dolomítico, que apresentaram maior sensibilidade às variações de composição, sobretudo em maiores valores de H. Por outro lado, composições com menores teores de fíler e menores valores de H, como MC3-2 e MD3-2, mantiveram níveis de resistência mais elevados, indicando que a incorporação de fíler pode ser realizada sem perdas significativas quando adequadamente balanceada.

O módulo de elasticidade apresentou comportamento coerente com as resistências mecânicas, com redução progressiva em função do aumento do fator H. Ainda assim, verificaram-se ganhos de rigidez nas idades iniciais em comparação a etapa experimental anterior, sugerindo que o aumento do teor de finos contribui positivamente para o desenvolvimento inicial da matriz, embora esse efeito seja limitado em composições com maiores teores de água.

Em síntese, os resultados indicam que o uso de fíler calcário em níveis elevados é tecnicamente viável, especialmente do ponto de vista de estabilidade dimensional. No entanto, sua incorporação implica um compromisso com o desempenho mecânico, tornando essencial o controle rigoroso da relação água:sólidos e da fração de ligante. Assim, a otimização conjunta desses parâmetros se mostra fundamental para o desenvolvimento de argamassas com desempenho equilibrado, adequadas à aplicação em processos de impressão 3D.

CAPÍTULO 12

ETAPA EXPERIMENTAL 4: OTIMIZAÇÃO FINAL

Entre as misturas avaliadas até a Etapa Experimental 3, a composição MD3-2 apresentou o melhor equilíbrio entre capacidade de extrusão, capacidade de estruturação e desempenho mecânico, associando comportamento satisfatório a um consumo de cimento inferior ao de misturas anteriormente destacadas, como MC2 e MD2. Esse desempenho indicou potencial de aplicabilidade prática, justificando sua escolha como traço base para a etapa final de otimização.

Apesar dos resultados favoráveis, a mistura MD3-2 apresentava relação água/cimento igual a 0,80, valor considerado elevado sob a perspectiva da durabilidade. Aïtcin (2003) defende que concretos e argamassas com menores relações água/aglomerante tendem a apresentar microestrutura mais densa e menor conectividade capilar, reduzindo a permeabilidade e aumentando a resistência à ação de agentes agressivos. O autor destaca que, em sistemas com relação água/cimento superior a 0,50, parte da água não é consumida pelas reações de hidratação, permanecendo em poros capilares de maior diâmetro e elevada conectividade, o que pode comprometer o desempenho a longo prazo.

Assim, a Etapa Experimental 4 teve como objetivo otimizar esta composição, buscando reduzir a relação água/ligante sem comprometer a capacidade de extrusão, a estabilidade geométrica e o desempenho mecânico das misturas.

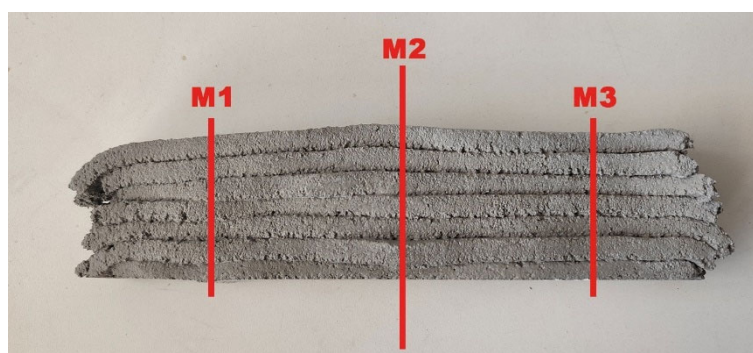
Inicialmente, adotou-se relação água/ligante igual a 0,60, realizando-se ajustes progressivos no teor de aditivo superplastificante. O teor inicial adotado foi de 2,0% em relação à massa de cimento, sendo posteriormente incrementado gradativamente em passos de 0,5%, com ajustes intermediários de 0,25% quando necessário, até o limite máximo de 4,0%, buscando atender às condições desejadas de fluidez, plasticidade e capacidade de extrusão das misturas.

Posteriormente, a relação água/ligante foi reduzida gradativamente em etapas sucessivas, com decréscimos de 0,05, repetindo-se os ajustes do teor de aditivo até atingir o limite de eficiência do sistema. Também foi avaliada a influência do aumento do teor de sílica ativa de 5% para 10% em relação à massa de cimento, buscando promover refinamento da matriz cimentícia e melhoria da coesão das misturas.

Além da caracterização no estado fresco e no estado endurecido, as formulações foram submetidas a ensaios específicos de extrusão e empilhamento, com medições geométricas

dos filamentos depositados, permitindo avaliar a estabilidade dimensional das camadas extrudadas e o comportamento das misturas sob condições simuladas de impressão 3D. Os filamentos, com comprimento aproximado de 20 cm, tiveram a altura total e a largura da primeira camada medidas em três pontos distintos, conforme ilustrado na Figura 83. Para o cálculo da variação dimensional, adotou-se como referência o tamanho efetivo do bico de extrusão, correspondente a $29,8 \times 9,7$ mm.

Figura 83 - Avaliação da estabilidade geométrica de filamentos extrudados



Fonte: Autoria própria, 2026

12.1 RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 4

A seguir são apresentadas as análises dos resultados obtidos para as misturas da Etapa Experimental 4, avaliando de forma integrada os efeitos da relação água/ligante, do teor de superplastificante (SP) e do aumento de sílica ativa (SA) no comportamento no estado fresco, no estado endurecido e na aplicabilidade para impressão 3D. A composição das misturas testadas está apresentada na Tabela 27 em proporção e em massa para 1m^3 de mistura.

Tabela 27 - Parâmetros de dosagem e ajustes da Etapa Experimental 4

(continua)

MISTURA		CPII-F-40	S.A.	C.D	AGREGADO	A/L	SP
M0,6-REF	Proporção	1,0	0,05	-	3,0	0,60	0,0200
	Massa (kg)	466,7	23,3	0,0	1400,1	294,0	9,3
M0,6-SP2	Proporção	1,0	0,05	0,75	3,0	0,60	0,0200
	Massa (kg)	414,6	20,7	310,9	1243,7	261,2	8,3
M0,6-SP2,5	Proporção	1,0	0,05	0,75	3,0	0,60	0,0250
	Massa (kg)	413,8	20,7	310,3	1241,3	260,7	10,3
M0,6-SP2,75	Proporção	1,0	0,05	0,75	3,0	0,60	0,0275
	Massa (kg)	413,4	20,7	310,0	1240,1	260,4	11,4
M0,6-SP3	Proporção	1,0	0,05	0,75	3,0	0,60	0,0300
	Massa (kg)	412,9	20,6	309,7	1238,8	260,2	12,4
M0,55-REF	Proporção	1,0	0,05	-	3,0	0,55	0,0200
	Massa (kg)	478,4	23,9	0,0	1435,2	276,3	9,6
M0,55-SP3	Proporção	1,0	0,05	0,75	3,0	0,55	0,0300
	Massa (kg)	422,1	21,1	316,6	1266,3	243,8	12,7
M0,55-SP3,5	Proporção	1,0	0,05	0,75	3,0	0,55	0,0350
	Massa (kg)	421,3	21,1	315,9	1263,8	243,3	14,7

Tabela 27 - Parâmetros de dosagem e ajustes da Etapa Experimental 4

							(conclusão)
MISTURA		CPII-F-40	S.A.	C.D	AGREGADO	A/L	SP
M0,55-SP3,75	Proporção	1,0	0,05	0,75	3,0	0,55	0,0375
	Massa (kg)	420,8	21,0	315,6	1262,5	243,0	15,8
M0,6-REF-SA	Proporção	1,0	0,1	-	3,0	0,60	0,0200
	Massa (kg)	455,5	45,5	0,0	1366,5	300,6	9,1
M0,6-SP2-SA	Proporção	1,0	0,1	0,75	3,0	0,60	0,020
	Massa (kg)	405,7	40,6	304,3	1217,1	267,8	8,1
M0,6-SP2,5-SA	Proporção	1,0	0,1	0,75	3,0	0,60	0,0250
	Massa (kg)	404,9	40,5	303,7	1214,8	267,3	10,1
M0,6-SP2,75-SA	Proporção	1,0	0,1	0,75	3,0	0,60	0,0275
	Massa (kg)	404,5	40,5	303,4	1213,6	267,0	11,1
M0,55-REF-SA	Proporção	1,0	0,1	-	3,0	0,55	0,0200
	Massa (kg)	467,2	46,7	0,0	1401,6	282,7	9,3
M0,55-SP3-SA	Proporção	1,0	0,1	0,75	3,0	0,55	0,0300
	Massa (kg)	413,3	41,3	310,0	1240,0	250,1	12,4
M0,55-SP3,5-SA	Proporção	1,0	0,1	0,75	3,0	0,55	0,0350
	Massa (kg)	412,5	41,3	309,4	1237,6	249,6	14,4
M0,55-SP3,75-SA	Proporção	1,0	0,1	0,75	3,0	0,55	0,0375
	Massa (kg)	412,1	41,2	309,1	1236,4	249,3	15,5
M0,5-REF-SA	Proporção	1,0	0,1	-	3,0	0,50	0,0200
	Massa (kg)	479,5	48,0	0,0	1438,5	263,7	9,6
M0,5-SP4-SA	Proporção	1,0	0,1	0,75	3,0	0,50	0,0400
	Massa (kg)	421,3	42,1	316,0	1263,9	231,7	16,9

Fonte: Autoria própria, 2026

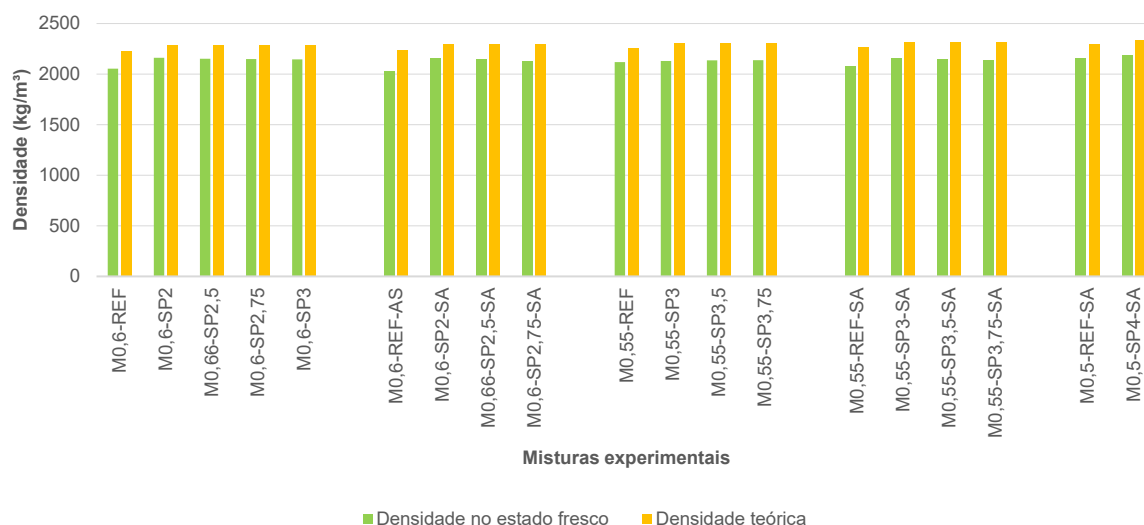
12.1.1 Comportamento no estado fresco: densidade

A Tabela 28 apresenta os valores de densidade no estado fresco experimental e densidade teórica calculada, enquanto a Figura 84 ilustra comparativamente esses resultados.

Tabela 28 - Densidade no estado fresco experimental e densidade teórica das misturas avaliadas

MISTURA	DENSIDADE (kg/m³)	DENSIDADE TEÓRICA (Kg/m³)
M0,6-REF	2054	2225
M0,6-SP2	2161	2288
M0,6-SP2,5	2151	2285
M0,6-SP2,75	2148	2284
M0,6-SP3	2146	2283
M0,6-REF-SA	2027	2238
M0,6-SP2-SA	2153	2300
M0,6-SP2,5-SA	2145	2297
M0,6-SP2,75-SA	2133	2296
M0,55-REF	2118	2253
M0,55-SP3	2130	2309
M0,55-SP3,5	2136	2307
M0,55-SP3,75	2137	2306
M0,55-REF-SA	2080	2266
M0,55-SP3-SA	2154	2320
M0,55-SP3,5-SA	2147	2317
M0,55-SP3,75-SA	2141	2316
M0,5-REF-SA	2163	2294
M0,5-SP4-SA	2188	2341

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 84 - Densidade no estado fresco e densidade teórica das misturas avaliadas

Fonte: Autoria própria, 2026

De forma geral, todas as misturas apresentaram densidades no estado fresco inferiores às densidades teóricas, comportamento esperado devido à incorporação de ar durante a mistura. Entretanto, a diferença relativa entre os valores mostrou-se fortemente dependente da composição.

Nas misturas com $a/l = 0,60$ e 5% de sílica ativa, a M0,6-REF apresentou densidade no estado fresco de 2054 kg/m³ frente a 2225 kg/m³ teóricos, diferença de aproximadamente 7,7%, refletindo menor eficiência de empacotamento. A ausência de fíler calcário nessas misturas de referência reduz o teor de finos e limita a compacidade inicial.

A introdução de fíler e ajuste de SP promoveu aumento da densidade no estado fresco e redução da diferença relativa. A M0,6-SP2 atingiu 2161 kg/m³ para 2288 kg/m³ teóricos, reduzindo a diferença para cerca de 5,6%, evidenciando melhoria no empacotamento. Contudo, a partir de teores mais elevados de SP (2,75% e 3%), observa-se estabilização ou leve redução da densidade no estado fresco, sugerindo limite ótimo de dispersão.

Com 10% de sílica ativa, as densidades teóricas aumentaram sistematicamente devido ao maior conteúdo de finos. Entretanto, quando o teor de SP não foi ajustado adequadamente, como na M0,6-REF-SA, a densidade no estado fresco não acompanhou proporcionalmente esse aumento, indicando que o acréscimo isolado de finura não garante compacidade efetiva. Nas misturas com superplastificante ajustado, como M0,6-SP2-SA e M0,6-SP2,5-SA, a densidade no estado fresco se aproxima mais da densidade teórica, evidenciando que a ação dispersante do aditivo é capaz de compensar o aumento da área específica promovido pela sílica ativa, especialmente em sistemas com maior teor de finos.

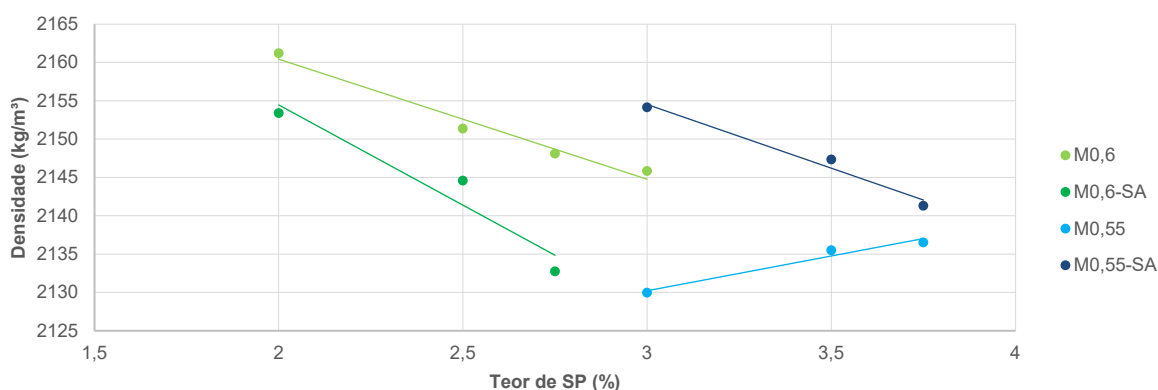
Para $a/l = 0,55$, as diferenças relativas tenderam a diminuir nas misturas de referência (6,0%), indicando sistemas mais compactos em função do menor teor de água. Já nas misturas com fíler e SP, as diferenças mantiveram-se entre 7,0% e 7,5%, sugerindo que, em sistemas mais densos, os ganhos adicionais de empacotamento tornam-se menos expressivos. Com o aumento do teor de sílica ativa, associada ao uso de superplastificante, verifica-se tendência similar às misturas M0,6-SA. Esse comportamento sugere que, em sistemas com menor teor de água, a matriz já se encontra relativamente compacta, mas o elevado teor de finos pode contribuir para um preenchimento mais eficiente dos vazios desde que adequadamente disperso.

Com $a/l = 0,50$, foram registrados os maiores valores absolutos de densidade no estado fresco. A M0,5-SP4-SA atingiu 2188 kg/m³ frente a 2341 kg/m³ teóricos, configurando o sistema mais compacto do conjunto experimental.

Globalmente, a aproximação entre densidade no estado fresco e teórica mostrou-se diretamente relacionada à combinação entre redução da a/l e ajuste adequado do teor de SP, sendo a sílica ativa um potencial intensificador da compacidade quando devidamente dispersa.

Avaliou-se a influência do teor de superplastificante na densidade fresca das misturas foi avaliada considerando quatro as séries experimentais (Figura 85). A análise dos resultados evidencia que o efeito do SP sobre a densidade não é único, variando em função da relação água/ligante e da quantidade de sílica ativa.

Figura 85 - Influência do teor de superplastificante na densidade das misturas



Fonte: Autoria própria, 2026

Para a série M0,6, observou-se redução progressiva da densidade com o aumento do teor de SP. O comportamento apresentou tendência aproximadamente linear, indicando que o incremento do aditivo promoveu maior dispersão das partículas cimentícias e possivelmente maior incorporação de ar, resultando em leve diminuição da massa específica fresca.

Comportamento semelhante foi observado na série M0,6-SA, porém com maior intensidade. Nota-se que a presença de SA aumentou a sensibilidade da mistura ao aumento do teor de superplastificante. Esse resultado sugere que a interação entre SP e SA pode favorecer maior estabilidade de bolhas de ar ou alterar a estrutura da matriz, potencializando a redução da densidade.

Para a série M0,55, o comportamento foi distinto. Verificou-se aumento da densidade com o incremento do teor de SP. Nesse caso, o maior teor de superplastificante parece ter promovido melhor dispersão das partículas e maior eficiência no empacotamento, reduzindo vazios internos e elevando levemente a densidade fresca. Esse comportamento pode estar associado à menor relação da mistura, na qual o ganho de fluidez proporcionado pelo SP contribui para maior compacidade do sistema. Entretanto, na série M0,55-SA, a tendência voltou a ser de redução da densidade com o aumento do teor de SP. A presença de SA, novamente, modificou o efeito do superplastificante, indicando que a interação entre os dois aditivos influencia diretamente a estrutura interna da mistura fresca.

De modo geral, os resultados demonstram que o aumento do teor de SP tende a reduzir a densidade nas misturas com relação água/ligante 0,6 e nas misturas contendo mais SA. Entretanto, para a mistura com relação 0,55 com menor teor de SA, observou-se comportamento inverso, com leve aumento da densidade. Assim, conclui-se que o efeito do superplastificante sobre a densidade fresca depende da relação da mistura e da presença de SA, podendo atuar tanto na melhoria do empacotamento quanto na maior incorporação de ar no sistema.

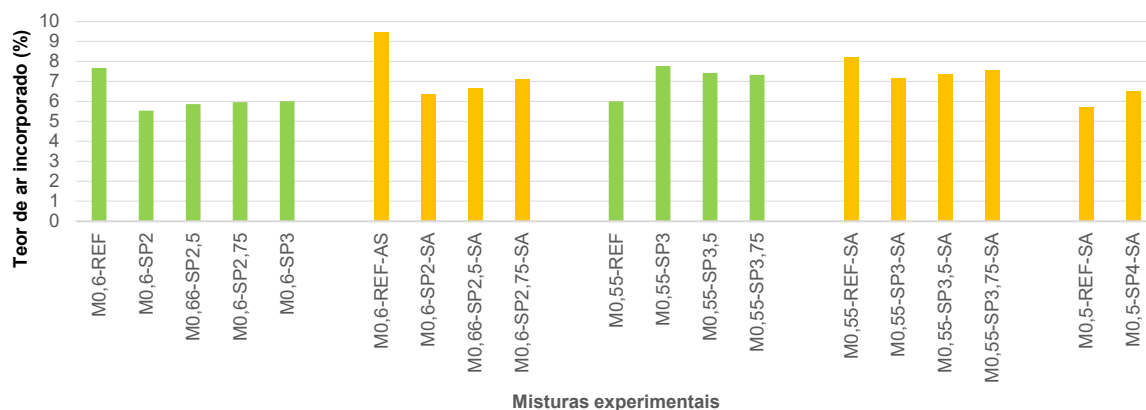
12.1.2 Comportamento no estado fresco: teor de ar incorporado

A Tabela 29 apresenta os teores de ar estimados a partir da diferença entre densidades, e a Figura 86 sintetiza os resultados.

Tabela 29 - Teor de ar incorporado das misturas da Etapa Experimental 4

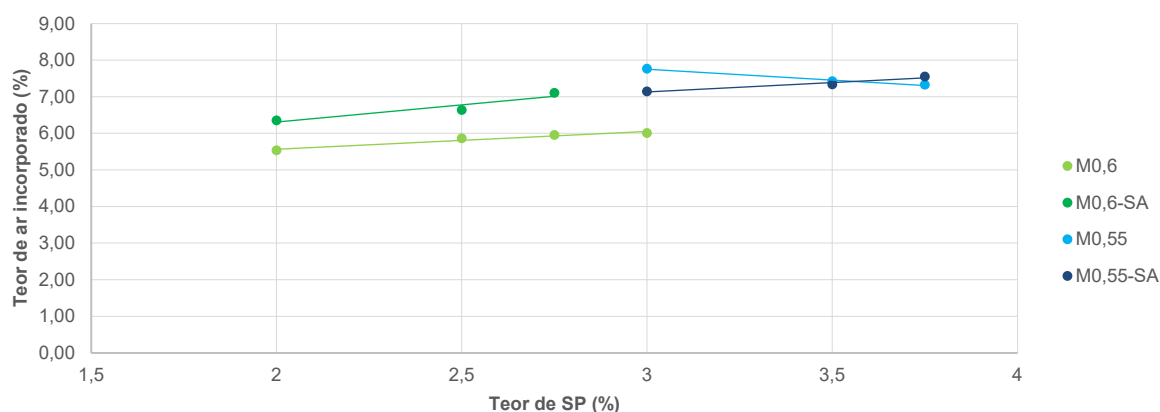
MISTURA	TEOR DE AR (%)	MISTURA	TEOR DE AR (%)
M0,6-REF	7,67	M0,55-REF	6,00
M0,6-SP2	5,53	M0,55-SP3	7,77
M0,6-SP2,5	5,86	M0,55-SP3,5	7,43
M0,6-SP2,75	5,96	M0,55-SP3,75	7,33
M0,6-SP3	6,01	M0,55-REF-SA	8,20
M0,6-REF-SA	9,45	M0,55-SP3-SA	7,15
M0,6-SP2-SA	6,36	M0,55-SP3,5-SA	7,34
M0,6-SP2,5-SA	6,64	M0,55-SP3,75-SA	7,55
M0,6-SP2,75-SA	7,11	M0,5-REF-SA	5,72
		M0,5-SP4-SA	6,52

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 86 - Teor de ar incorporado no estado fresco das misturas da Etapa Experimental 4

Fonte: Autoria própria, 2026

A Figura 87 apresenta a relação entre o teor de superplastificante e o teor de ar incorporado.

Figura 87 - Relação do teor de superplastificante com o teor de ar incorporado

Fonte: Autoria própria, 2026

Para a série M0,6, observou-se aumento progressivo do teor de ar com o incremento do teor de SP. O comportamento apresentou tendência aproximadamente linear, indicando que o aumento do superplastificante favoreceu a incorporação ou estabilização de bolhas de ar na mistura fresca. Esse resultado está em consonância com a redução observada na densidade fresca dessa mesma série, sugerindo correlação inversa entre densidade e teor de ar.

Na série M0,6-SA, o comportamento foi semelhante, porém mais acentuado. A presença de SA intensificou o efeito do SP na incorporação de ar, indicando possível sinergia entre os aditivos na estabilização de bolhas ou na modificação da tensão superficial do sistema. Esse aumento mais pronunciado explica a redução mais significativa da densidade observada anteriormente nessa série.

Para a série M0,55, verificou-se um leve decréscimo do teor de ar incorporado com o aumento do teor de SP. Já na série M0,55-SA, observou-se comportamento distinto, com tendência crescente à medida que se elevou o teor de aditivo. Diferentemente da série com menor teor de SA, a presença desse material modificou a resposta da mistura ao incremento de superplastificante, indicando interação significativa entre ambos os componentes e evidenciando que o efeito do SP não ocorre de forma isolada, mas depende da composição da fração ligante.

Com $a/l = 0,50$, registraram-se os menores teores de ar da etapa experimental, evidenciando que a elevada compacidade e o menor teor de água favorecem a expulsão de ar durante a mistura.

Esses resultados indicam que o efeito do superplastificante sobre a incorporação de ar depende da composição da mistura e da interação entre os aditivos, podendo atuar tanto na estabilização de bolhas quanto na melhoria da compactação e liberação de ar aprisionado. Observa-se ainda forte correlação entre teor de ar e densidade no estado fresco, confirmando que variações na incorporação de ar influenciam diretamente a massa específica das misturas analisadas.

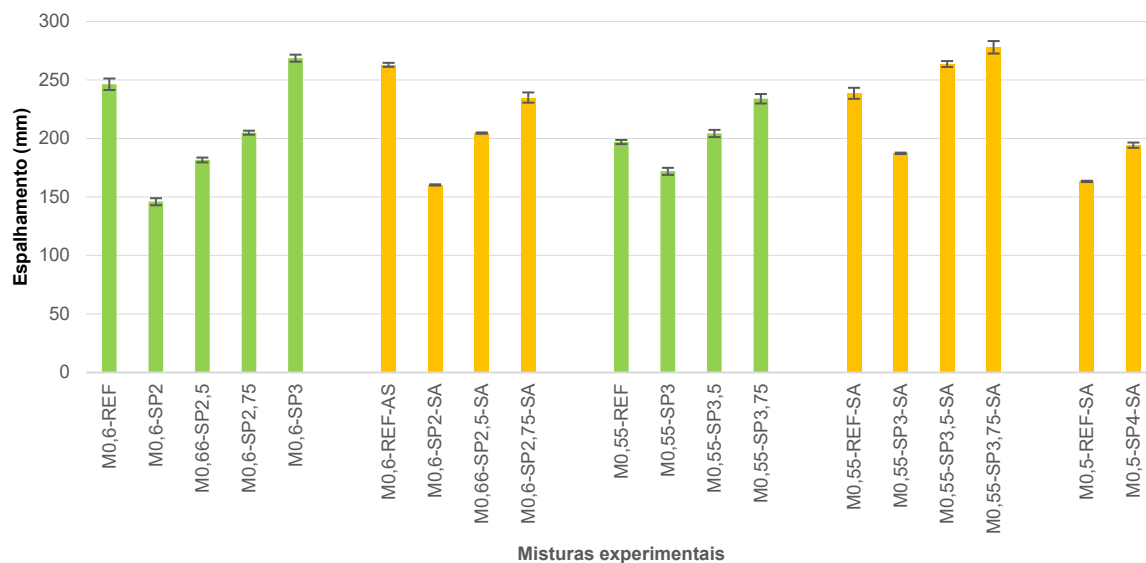
12.1.3 Comportamento no estado fresco: índice de consistência

Os valores de índice de consistência estão apresentados na Tabela 30 e na Figura 88.

Tabela 30 - Valores de espalhamento das misturas da Etapa Experimental 4

MISTURA	ESPALHAMENTO (mm)	
	Média	Desvio Padrão
M0,6-REF	246	5
M0,6-SP2	146	3
M0,6-SP2,5	182	2
M0,6-SP2,75	205	2
M0,6-SP3	269	3
M0,6-REF-SA	263	2
M0,6-SP2-SA	160	1
M0,6-SP2,5-SA	205	1
M0,6-SP2,75-SA	235	4
M0,55-REF	197	2
M0,55-SP3	172	3
M0,55-SP3,5	204	3
M0,55-SP3,75	234	4
M0,55-REF-SA	239	5
M0,55-SP3-SA	187	1
M0,55-SP3,5-SA	264	3
M0,55-SP3,75-SA	278	5
M0,5-REF-SA	163	1
M0,5-SP4-SA	194	2

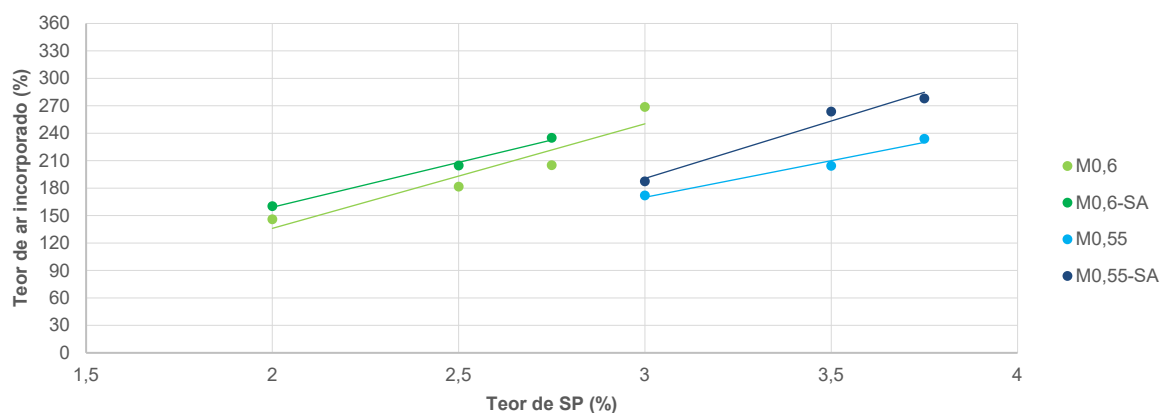
Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 88 - Espalhamento das misturas da Etapa Experimental 4

Fonte: Autoria própria, 2026

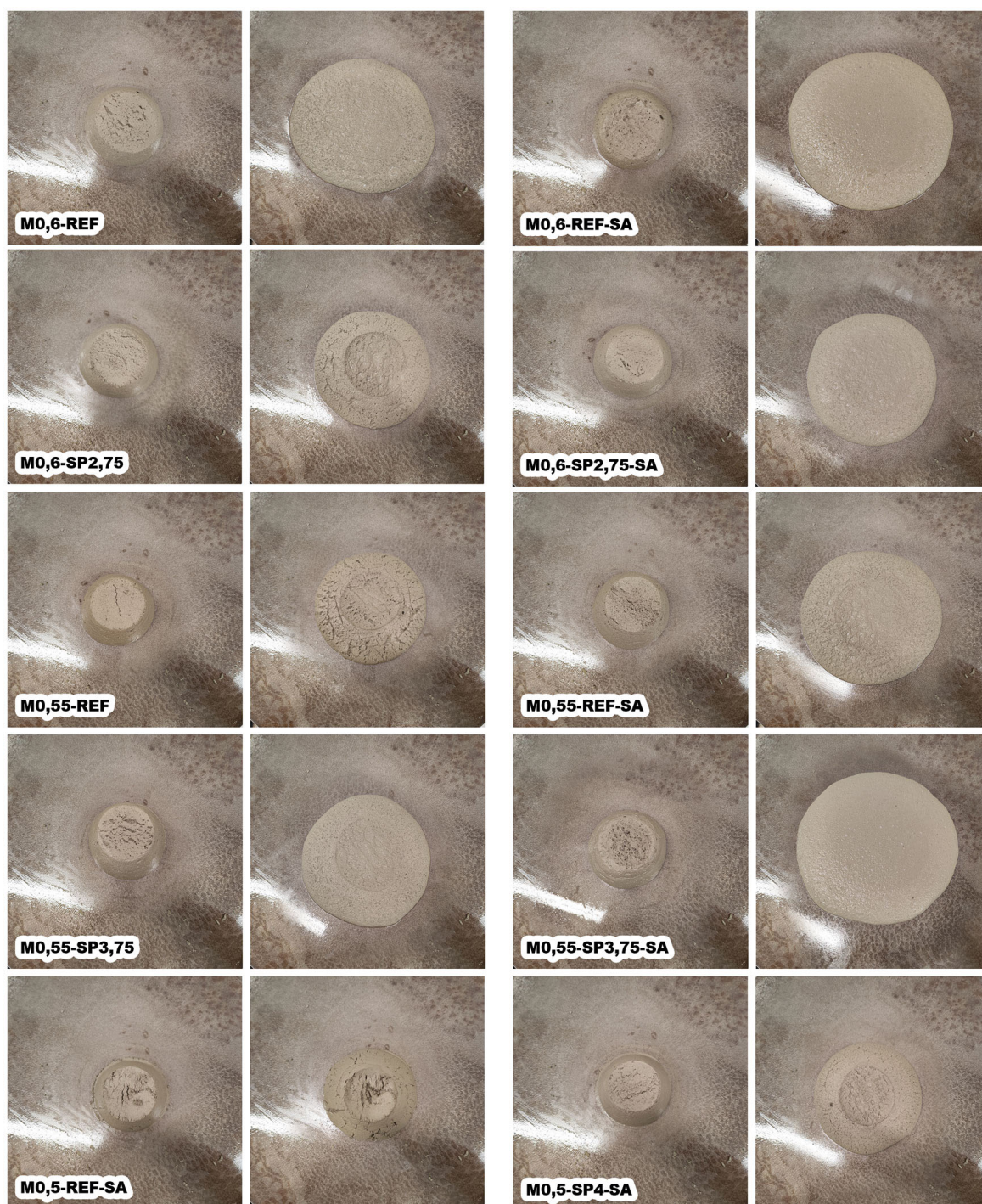
De modo geral, os resultados de espalhamento evidenciam o papel do superplastificante como principal agente de controle da fluidez das misturas. As variações observadas no ensaio de consistência, apresentadas na Figura 90, estão diretamente relacionadas ao teor de superplastificante, à relação água/ligante e ao teor de sílica ativa (5% ou 10%), além da influência exercida pelo filer calcário na estruturação da matriz.

A Figura 89 apresenta a relação entre o teor de superplastificante e o índice de consistência das misturas.

Figura 89 - Relação entre superplastificante e espalhamento

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 90 - Registros fotográficos do ensaio de espalhamento das misturas de referência e das misturas com maior teor de superplastificante



Fonte: Autoria própria, 2026

Para $a/l = 0,60$, a M0,6-REF apresentou 246 mm. A introdução de filer sem ajuste de SP (M0,6-SP2) reduziu o espalhamento para 146 mm (queda de 41%), evidenciando aumento da coesão. O aumento progressivo de SP resultou em recuperação da fluidez, atingindo 269 mm em M0,6-SP3 (+84% em relação à SP2). Com 10% de SA, os espalhamentos foram

sistematicamente superiores quando o teor de SP foi suficiente para garantir dispersão adequada.

A mistura M0,6-REF-SA apresentou espalhamento cerca de 7% superior ao da M0,6-REF. A introdução do fíler calcário na mistura M0,6-SP2-SA, resultou, novamente, em redução do espalhamento para 160 mm, queda de aproximadamente 39% em relação à M0,6-REF-SA, mas 9,8% maior que M0,6-SP2. O aumento SP (M0,6-SP2,5-SA e M0,6-SP2,75-SA) promoveu recuperação da fluidez resultando em valores de espalhamento 12,7% e 14,6% maiores que as misturas com 5% de SA, respectivamente.

A redução da a/l para 0,55 promoveu queda global do espalhamento. A mistura M0,55-REF apresentou redução de cerca de 20% à M0,6-REF. Ao elevar o teor de sílica ativa para 10%, a mistura M0,55-REF-SA apresentou espalhamento cerca de 21% maior que M0,55-REF. M0,55-SP3-SA apresentou valor 8,9% maior que o equivalente com 5% de sílica ativa, enquanto M0,55-SP3,5-SA e M0,55-SP3,75-SA mostraram aumentos de aproximadamente 29% e 18,8%, respectivamente.

Para a/l = 0,50, o espalhamento reduziu para 163 mm na mistura referência (31,6% menor que M0,55-REF-SA e 37,9% menor que M0,6-REF-SA), confirmando a dominância da relação água/ligante sobre a trabalhabilidade. O aumento do teor de superplastificante para 4% na mistura M0,5-SP4-SA, elevou o espalhamento, mas este ainda se manteve menor em função do menor teor de água disponível.

De maneira geral, o SP demonstrou eficiência na recuperação da fluidez, mas seus efeitos foram limitados pela disponibilidade de água nas misturas.

12.1.4 Variação de massa e retração

A Tabela 31 apresenta a variação de comprimento dos corpos de prova ao longo de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias.

Tabela 31 - Variação do comprimento (mm/m) dos corpos de prova a Etapa Experimental 4

(continua)

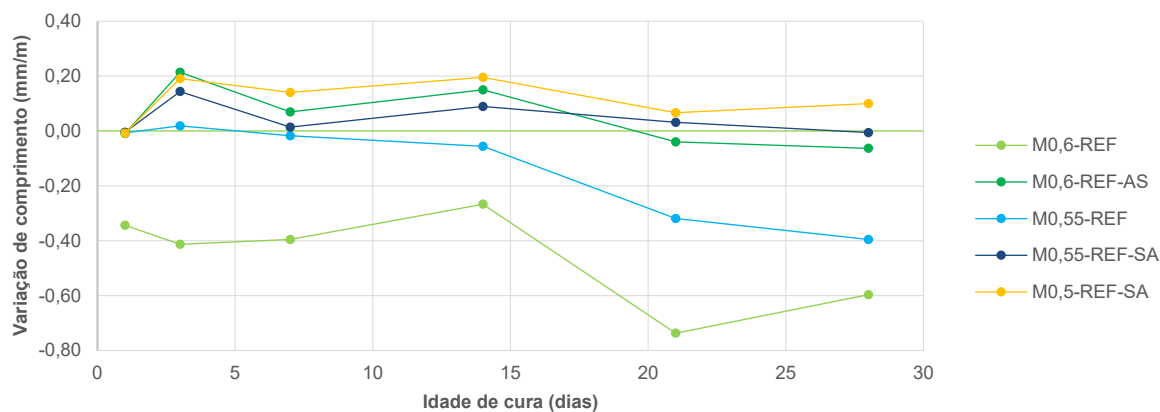
MISTURAS	1D		3D		7D		14D		21D		28D	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
M0,6-REF	-0,344	0,404	-0,413	0,383	-0,395	0,292	-0,267	0,209	-0,737	0,233	-0,596	0,280
M0,6-SP2	-0,012	0,005	0,278	0,116	0,218	0,206	0,242	0,192	-0,008	0,319	0,067	0,337
M0,6-SP2,5	-0,009	0,005	0,247	0,088	0,067	0,079	0,060	0,095	-0,085	0,065	-0,089	0,086
M0,6-SP2,75	-0,008	0,004	0,216	0,072	0,124	0,054	0,173	0,065	0,077	0,046	0,068	0,067
M0,6-SP3	-0,009	0,005	0,276	0,144	0,209	0,187	0,165	0,134	0,042	0,185	0,021	0,166
M0,6-REF-SA	-0,009	0,002	0,214	0,053	0,069	0,130	0,150	0,063	-0,040	0,129	-0,063	0,091
M0,6-SP2-SA	-0,005	0,002	0,166	0,040	-0,019	0,005	0,070	0,007	-0,064	0,053	-0,001	0,018
M0,6-SP2,5-SA	-0,009	0,002	0,274	0,047	-0,032	0,006	0,061	0,032	-0,018	0,028	0,015	0,014

Tabela 31 - Variação do comprimento (mm/m) dos corpos de prova a Etapa Experimental 4

MISTURAS	(conclusão)											
	1D		3D		7D		14D		21D		28D	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
M0,6-SP2,75-SA	-0,075	0,033	-0,213	0,099	-0,204	0,009	-0,226	0,044	-0,427	0,199	-0,386	0,213
M0,55-REF	-0,007	0,000	0,019	0,054	-0,018	0,146	-0,056	0,183	-0,319	0,229	-0,395	0,189
M0,55-SP3	-0,005	0,004	0,005	0,065	0,050	0,109	0,075	0,017	-0,082	0,058	-0,087	0,155
M0,55-SP3,5	-0,007	0,004	0,056	0,088	0,047	0,085	0,149	0,108	-0,143	0,065	-0,138	0,029
M0,55-SP3,75	-0,009	0,005	0,067	0,084	-0,022	0,089	0,147	0,209	-0,298	0,309	-0,213	0,237
M0,55-REF-SA	-0,005	0,005	0,144	0,116	0,014	0,214	0,089	0,182	0,032	0,179	-0,006	0,156
M0,55-SP3-SA	-0,008	0,002	0,159	0,153	-0,032	0,006	-0,167	0,433	-0,336	0,445	-0,237	0,439
M0,55-SP3,5-SA	0,130	0,353	-0,120	0,318	-0,108	0,333	0,008	0,346	-0,557	0,512	-0,572	0,502
M0,55-SP3,75-SA	-0,005	0,085	-0,264	0,215	-0,287	0,237	-0,219	0,174	-0,458	0,311	-0,524	0,225
M0,5-REF-SA	-0,008	0,002	0,191	0,048	0,140	0,131	0,195	0,066	0,067	0,086	0,099	0,104
M0,5-SP4-SA	-0,006	0,002	0,172	0,019	-0,020	0,004	0,042	0,007	-0,007	0,036	0,039	0,025

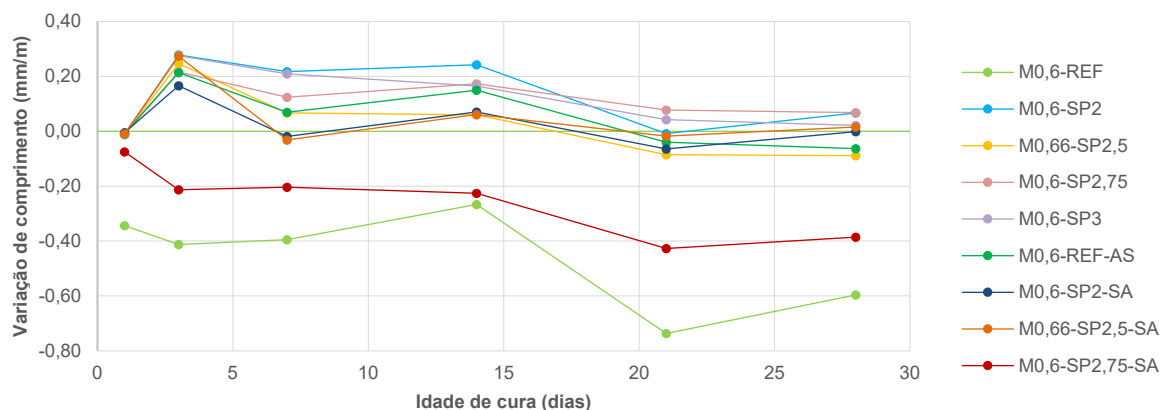
Fonte: Autoria própria, 2026

A análise dos dados evidencia comportamentos distintos em função da relação água/ligante, do teor de superplastificante e da incorporação de sílica ativa (Figura 91). De maneira geral, as deformações iniciais foram pouco expressivas para a maioria das formulações, com exceção da M0,6-REF, que apresentou retração significativamente superior desde as primeiras idades, indicando maior suscetibilidade à variação volumétrica na ausência de fíler calcário.

Figura 91 - Variação linear das misturas de referência da Etapa Experimental 4

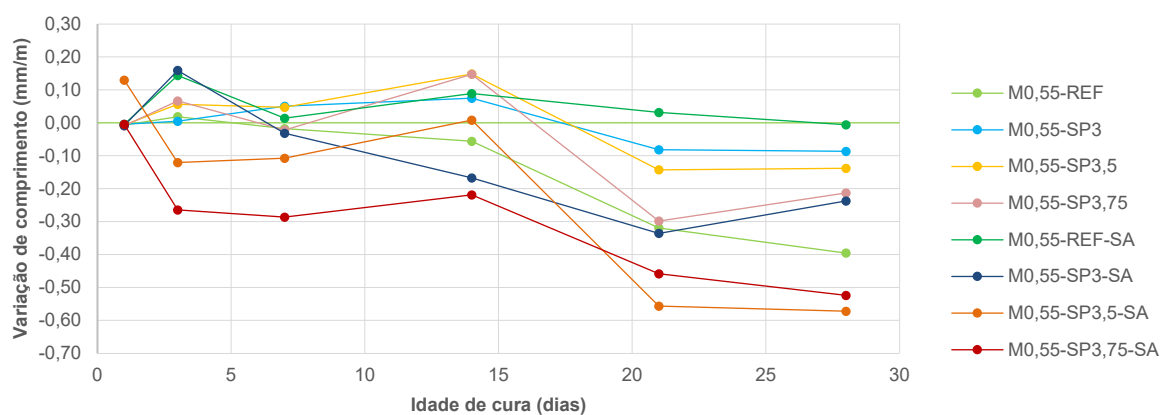
Fonte: Autoria própria, 2026

Observa-se que as misturas com relação a/l = 0,6 (Figura 92) e teores moderados de superplastificante apresentaram, em geral, melhor estabilidade dimensional, com variações reduzidas ao longo do período analisado. Destaca-se a M0,6-SP2-SA, cuja deformação final foi praticamente nula, evidenciando que a combinação entre relação a/l adequada, teor controlado de superplastificante e incorporação de 10% de sílica ativa pode favorecer o refinamento da microestrutura sem comprometer a estabilidade geométrica.

Figura 92 - Variação linear das misturas M0,6 e M0,6-SA

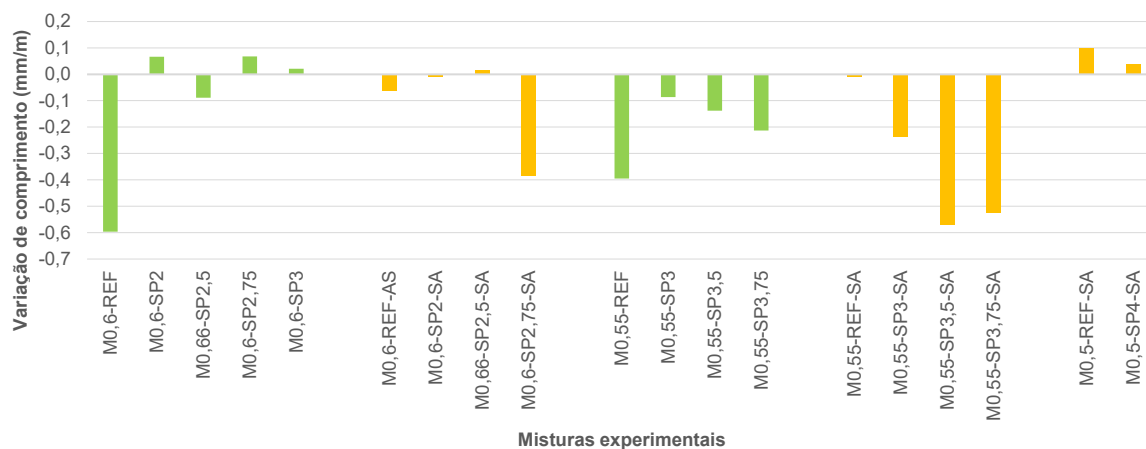
Fonte: Autoria própria, 2026

Por outro lado, as misturas com menor relação água/ligante = 0,55 (Figura 93), especialmente aquelas com 10% de sílica ativa e maiores teores de superplastificante, apresentaram retrações mais acentuadas aos 28 dias. Esse comportamento sugere que o maior refinamento da estrutura porosa, associado à redução da água disponível, intensifica as tensões capilares decorrentes da perda de umidade, resultando em maiores deformações ao longo do tempo.

Figura 93 - Variação linear das misturas M0,55 e M0,55-SA

Fonte: Autoria própria, 2026

De forma geral (Figura 94), aos 28 dias, verifica-se que a redução da relação água/ligante contribui para o controle da retração quando associada a dosagens equilibradas de aditivo. Entretanto, combinações com alto teor de sílica ativa e maior teor de superplastificante podem potencializar a retração, evidenciando a necessidade de otimização conjunta desses parâmetros para garantir desempenho volumétrico adequado.

Figura 94 - Comparação da variação de linear das misturas da Etapa Experimental 4 aos 28 dias

Fonte: Autoria própria, 2026

As Tabela 32 apresenta os resultados de variação de massa das misturas ao longo de 28 dias. De maneira geral, todas as formulações apresentaram perda progressiva de massa com o avanço da idade, sendo os maiores incrementos observados até os 7 dias, seguidos de tendência de estabilização após 14 dias.

Tabela 32 - Variação de percentual massa das misturas da Etapa Experimental 4

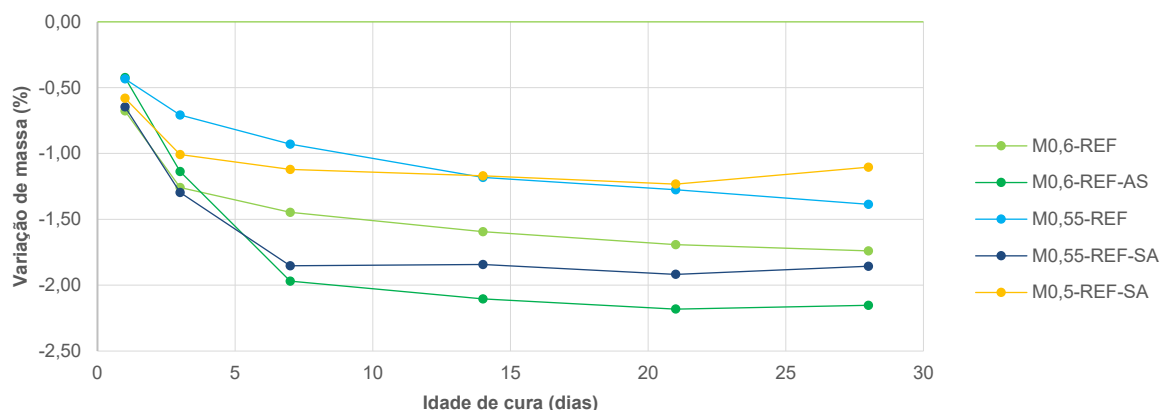
MISTURAS	1D		3D		7D		14D		21D		28D	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
M0,6-REF	-0,68	0,46	-1,26	0,45	-1,45	0,53	-1,59	0,52	-1,69	0,47	-1,74	0,44
M0,6-SP2	-0,86	0,63	-1,54	0,94	-1,70	0,74	-1,91	0,61	-1,94	0,59	-1,97	0,58
M0,6-SP2,5	-0,62	0,34	-0,94	0,27	-1,72	0,05	-1,86	0,10	-1,97	0,05	-1,97	0,07
M0,6-SP2,75	-0,86	0,55	-1,82	0,73	-2,21	0,45	-2,24	0,43	-2,32	0,44	-2,32	0,44
M0,6-SP3	-1,14	0,24	-1,32	0,21	-1,74	0,33	-1,96	0,24	-2,07	0,24	-2,05	0,22
M0,6-REF-SA	-0,42	0,01	-1,14	0,41	-1,97	0,33	-2,10	0,24	-2,18	0,23	-2,15	0,23
M0,6-SP2-SA	-0,17	0,06	-0,25	0,07	-0,37	0,04	-0,41	0,05	-0,46	0,03	-0,49	0,04
M0,6-SP2,5-SA	-0,30	0,25	-0,39	0,25	-0,69	0,13	-0,72	0,11	-0,78	0,13	-0,80	0,14
M0,6-SP2,75-SA	-0,74	0,53	-1,28	0,53	-1,43	0,61	-1,54	0,60	-1,59	0,60	-1,65	0,59
M0,55-REF	-0,43	0,16	-0,71	0,15	-0,93	0,24	-1,18	0,25	-1,28	0,24	-1,39	0,22
M0,55-SP3	-0,49	0,27	-0,83	0,24	-1,06	0,34	-1,45	0,18	-1,48	0,18	-1,56	0,19
M0,55-SP3,5	-1,04	0,27	-2,07	1,49	-1,34	0,17	-1,58	0,25	-1,67	0,21	-1,80	0,16
M0,55-SP3,75	-1,13	0,29	-1,37	0,21	-1,45	0,23	-1,64	0,23	-1,88	0,16	-1,91	0,19
M0,55-REF-SA	-0,65	0,29	-1,30	0,31	-1,85	0,26	-1,84	0,25	-1,92	0,28	-1,86	0,26
M0,55-SP3-SA	-0,45	0,02	-0,70	0,17	-0,68	0,12	-0,70	0,12	-0,80	0,13	-0,80	0,13
M0,55-SP3,5-SA	-0,47	0,26	-0,91	0,40	-1,08	0,40	-1,12	0,41	-1,17	0,41	-1,22	0,42
M0,55-SP3,75-SA	-0,89	0,06	-1,62	0,13	-1,77	0,10	-1,76	0,05	-1,85	0,06	-1,90	0,06
M0,5-REF-SA	-0,58	0,27	-1,01	0,22	-1,12	0,20	-1,17	0,22	-1,23	0,21	-1,10	0,23
M0,5-SP4-SA	-0,44	0,13	-0,46	0,18	-0,50	0,22	-0,52	0,21	-0,59	0,17	-0,57	0,20

Fonte: Autoria própria, 2026

A influência da relação água/ligante pode ser observada nas misturas de referência. Aos 28 dias, a M0,6-REF apresentou variação de massa de -1,74%, enquanto a M0,55-REF registrou -1,39%, correspondendo a uma redução aproximada de 20% na perda de massa. A evolução

temporal dessas misturas é apresentada na Figura 95, que evidencia claramente a menor taxa de perda de massa para a mistura com menor a/l .

Figura 95 - Evolução da variação de massa das misturas de referência da Etapa Experimental 4

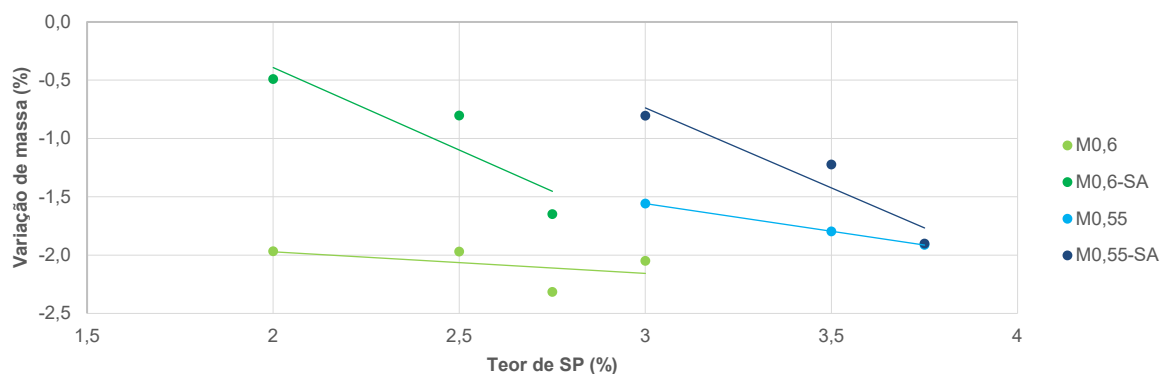


Fonte: Autoria própria, 2026

Entre as misturas com 10% de sílica ativa, o efeito da relação a/l torna-se ainda mais expressivo. A M0,6-REF-SA apresentou -2,15% aos 28 dias, enquanto a M0,55-REF-SA registrou -1,86% e a M0,5-REF-SA apenas -1,10%. A redução da a/l de 0,60 para 0,50 implicou diminuição de aproximadamente 49% na perda de massa final.

A influência do superplastificante mostrou-se dependente da combinação com a sílica ativa (Figura 96).

Figura 96 - Relação entre teor de superplastificante e perda de massa na Etapa Experimental 4

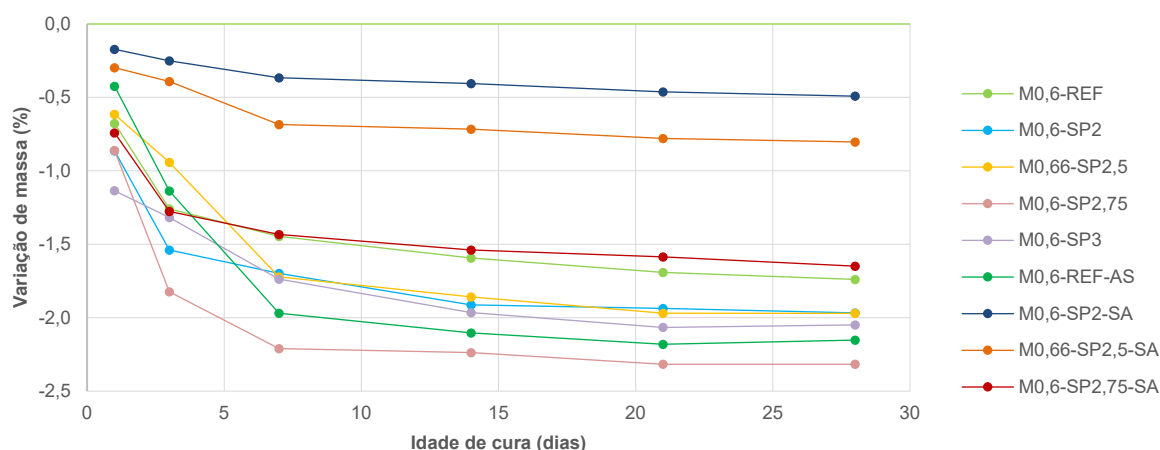


Fonte: Autoria própria, 2026

Para as misturas com relação $a/l = 0,6$ (Figura 96), observa-se que os teores de 2,00% e 2,50% de SP apresentaram perdas de massa idênticas (-1,97% aos 28 dias), sugerindo comportamento relativamente estável nessa faixa de dosagem. Contudo, ao elevar o teor para 2,75%, verificou-se aumento da perda de massa, representando o pior desempenho do grupo.

Em 3,00%, houve discreta redução da perda, embora ainda superior aos teores mais baixos. Esses resultados indicam comportamento não linear, sugerindo a existência de um teor ótimo de superplastificante próximo a 2,0–2,5%, acima do qual pode ocorrer aumento da porosidade efetiva ou alterações microestruturais que favorecem maior degradação.

Figura 97 - Evolução da variação de massa das misturas M0,6 e M0,6-SA

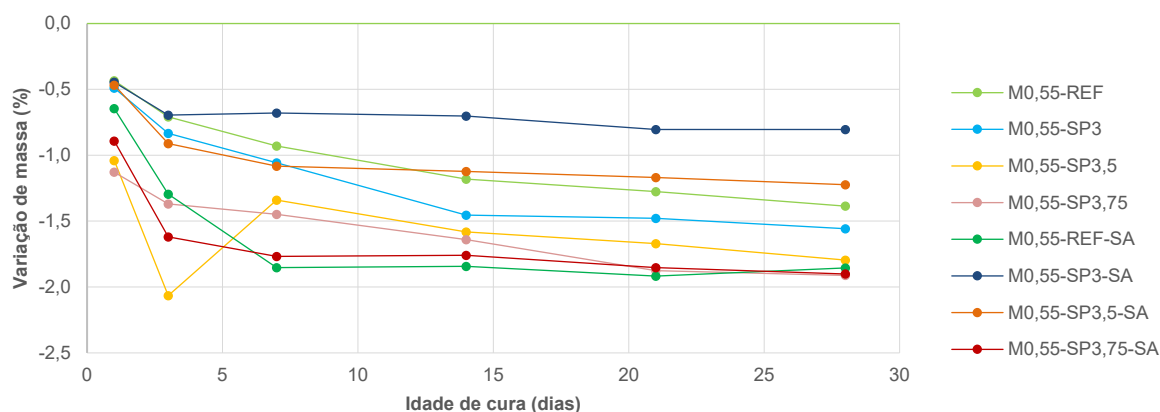


Fonte: Autoria própria, 2026

Nas misturas M0,6-SA, a perda de massa apresentou aumento progressivo com o incremento do teor de SP, variando de -0,49% (2,00%) para -1,65% (2,75%). Apesar dessa tendência crescente, os valores foram substancialmente inferiores aos observados no grupo M0,6. Isso demonstra que o aumento de SA contribuiu significativamente para a redução da perda de massa, indicando melhoria na integridade da matriz cimentícia e maior resistência aos mecanismos de deterioração.

Para as misturas M0,55, verificou-se comportamento mais uniforme (Figura 98). A perda de massa aumentou gradualmente com o aumento do teor de SP, passando de -1,56% (3,00%) para -1,91% (3,75%). Embora a tendência seja crescente, a variação foi moderada, possivelmente em função da menor relação a/c, que naturalmente promove matriz mais densa e menos suscetível à perda de material.

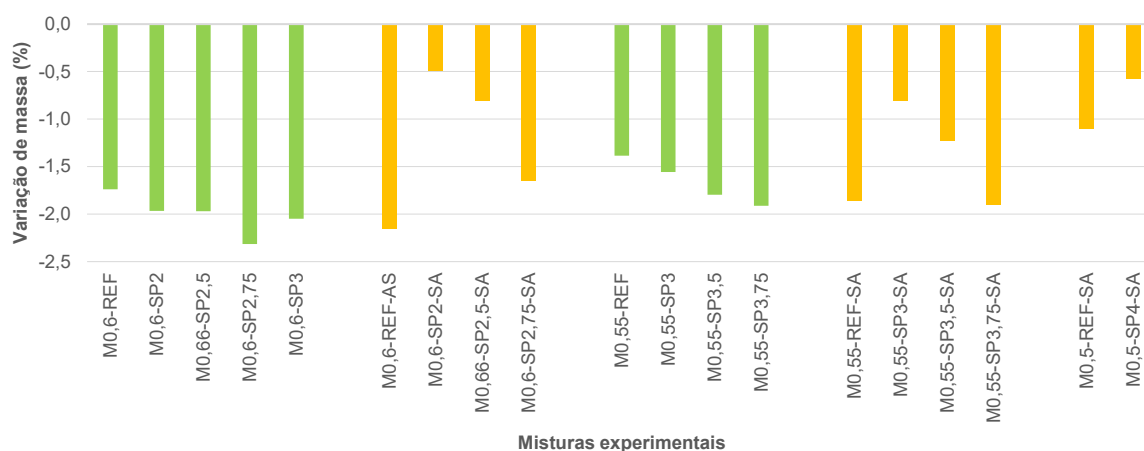
De maneira semelhante ao observado na relação $a/l = 0,6$, as misturas M0,55-SA apresentaram perdas de massa inferiores às correspondentes com menor teor. Os valores variaram de -0,80% (3,00%) a -1,90% (3,75%), evidenciando que a presença de SA também foi eficaz na mitigação da perda de massa nesse grupo. Entretanto, assim como nos demais casos, o aumento do teor de superplastificante resultou em crescimento progressivo da perda.

Figura 98 - Evolução da variação de massa das misturas M0,55 e M0,55-SA

Fonte: Autoria própria, 2026

De forma geral, os resultados indicam que o aumento do teor de superplastificante tende a elevar a perda de massa, especialmente em teores mais elevados, possivelmente devido ao excesso de dispersão das partículas cimentícias e à alteração da microestrutura da matriz. Por outro lado, a maior presença de SA mostrou-se determinante na redução da perda de massa em ambas as relações a/l, demonstrando efeito benéfico na durabilidade das misturas. Assim, os dados sugerem a existência de um teor ótimo de superplastificante, a partir do qual o desempenho tende a ser prejudicado, reforçando a importância do ajuste adequado da dosagem em função da composição da mistura.

A comparação global das perdas de massa aos 28 dias pode ser visualizada na Figura 99, que sintetiza os efeitos combinados da relação a/l, do teor de SP e da presença de sílica ativa.

Figura 99 - Comparação da variação de massa das misturas da Etapa Experimental 4 aos 28 dias

Fonte: Autoria própria, 2026

12.1.5 Comportamento no estado endurecido: resistência à flexão e compressão

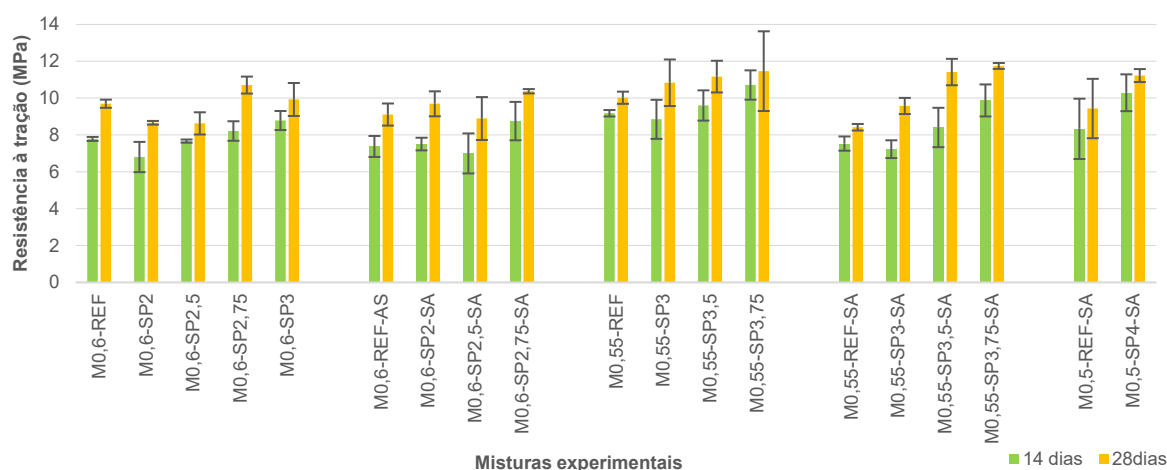
A Tabela 33 apresenta os resultados de resistência à flexão obtidos aos 14 e 28 dias. A evolução desses valores ao longo do período de cura está ilustrada na Figura 100.

Tabela 33 - Resistência à tração das misturas da Etapa Experimental 4

MISTURAS	14 DIAS (MPa)		28 DIAS (MPa)	
	Média	D.P.	Média	D.P.
M0,6-REF	7,79	0,11	9,70	0,22
M0,6-SP2	6,80	0,82	8,66	0,10
M0,6-SP2,5	7,67	0,09	8,63	0,61
M0,6-SP2,75	8,21	0,53	10,71	0,46
M0,6-SP3	8,78	0,52	9,93	0,90
M0,6-REF-SA	7,38	0,57	9,11	0,60
M0,6-SP2-SA	7,51	0,34	9,69	0,68
M0,6-SP2,5-SA	7,00	1,08	8,89	1,16
M0,6-SP2,75-SA	8,75	1,05	10,37	0,12
M0,55-REF	9,18	0,17	10,02	0,33
M0,55-SP3	8,85	1,06	10,83	1,26
M0,55-SP3,5	9,60	0,82	11,17	0,86
M0,55-SP3,75	10,71	0,79	11,46	2,16
M0,55-REF-SA	7,53	0,39	8,42	0,18
M0,55-SP3-SA	7,23	0,48	9,57	0,44
M0,55-SP3,5-SA	8,41	1,07	11,42	0,72
M0,55-SP3,75-SA	9,87	0,87	11,74	0,16
M0,5-REF-SA	8,33	1,64	9,43	1,61
M0,5-SP4-SA	10,29	1,00	11,23	0,35

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 100 - Comparação gráfica da evolução da resistência à compressão das misturas aos 14 e 28 dias

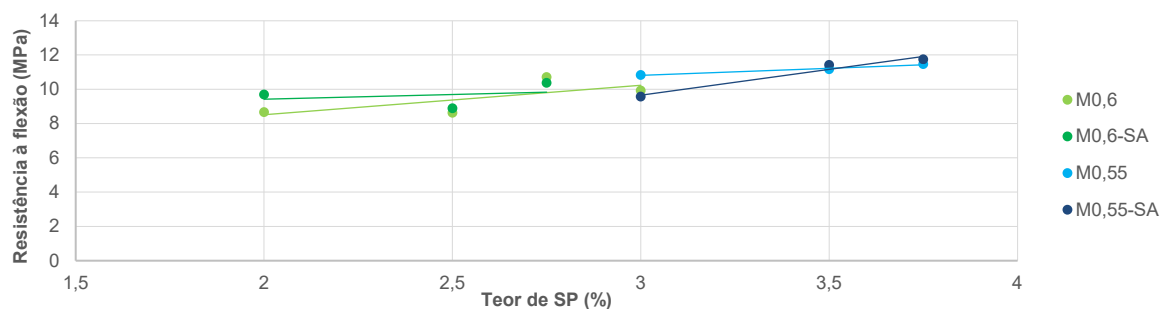


Fonte: Autoria própria, 2026

Para $a/l = 0,60$, a mistura M0,6-REF apresentou resistência à flexão de 9,70 MPa aos 28 dias. A introdução de fíler calcário em M0,6-SP2 resultou em redução de 10,6%, indicando que o efeito de diluição do ligante e possíveis alterações na compacidade superaram os benefícios do empacotamento de partículas. Com o aumento do teor de superplastificante, observou-se melhoria progressiva do desempenho (Figura 101). A mistura M0,6-SP2,75 apresentou ganho

de 10,5% em relação à referência, enquanto para M0,6-SP3 foi de apenas 2,4%, sugerindo que incrementos adicionais de aditivo não necessariamente resultam em benefícios mecânicos proporcionais.

Figura 101 - Relação entre o teor de superplastificante e a resistência à flexão aos 28 dias



Fonte: Autoria própria, 2026

A elevação do teor de sílica ativa para 10% não produziu, nesse grupo, ganhos expressivos de tração. A mistura M0,6-REF-SA apresentou redução de 6,0% em relação à M0,6-REF, enquanto M0,6-SP2,75-SA apresentou valor 3,2% inferior à mistura equivalente (M0,6-SP2,75). Esses resultados indicam que, para a/l mais elevadas, o efeito de diluição inicial do ligante e a maior demanda de água da sílica ativa podem reduzir a eficiência do empacotamento, atenuando os benefícios pozolânicos na tração, especialmente quando a microestrutura ainda apresenta porosidade relativamente elevada.

Para $a/l = 0,55$, observa-se, conforme a Tabela 33, aumento geral das resistências. A mistura M0,55-REF atingiu valor 3,4% superior ao obtido para a referência com $a/l = 0,60$. O aumento do teor de superplastificante promoveu ganhos mais significativos para este grupo. Com a incorporação de 10% de sílica ativa, os efeitos tornaram-se mais dependentes da combinação com o teor de SP. A mistura M0,55-REF-SA apresentou redução de 15,9% em relação à M0,55-REF. Entretanto, quando combinada a teores mais elevados de superplastificante, a sílica ativa mostrou-se eficaz evidenciando que a sílica ativa contribui positivamente quando associada a adequada dispersão.

Para $a/l = 0,50$, a melhoria da compacidade refletiu-se em valores ainda mais elevados. A mistura M0,5-REF-SA apresentou resistência 12% superior à M0,55-REF-SA e 3,6% superior à M0,6-REF-SA. O aumento do teor de superplastificante para 4% (M0,5-SP4-SA) resultou em ganho de 19% em relação à referência.

A análise demonstra que a resistência à tração é fortemente influenciada pela compacidade da matriz e pela qualidade da interface pasta/agregado, sendo mais sensível que a compressão a efeitos de diluição ou variações no teor de aditivo. Os melhores resultados

foram obtidos para misturas com baixa relação água/ligante associada a teores ótimos de superplastificante, enquanto a sílica ativa mostrou-se benéfica principalmente quando combinada com adequada dispersão das partículas. Assim, a maximização da resistência à tração depende não apenas do aumento do teor pozolânico, mas do equilíbrio entre empacotamento, dispersão e consumo de água, que juntos determinam a homogeneidade e a integridade da microestrutura cimentícia.

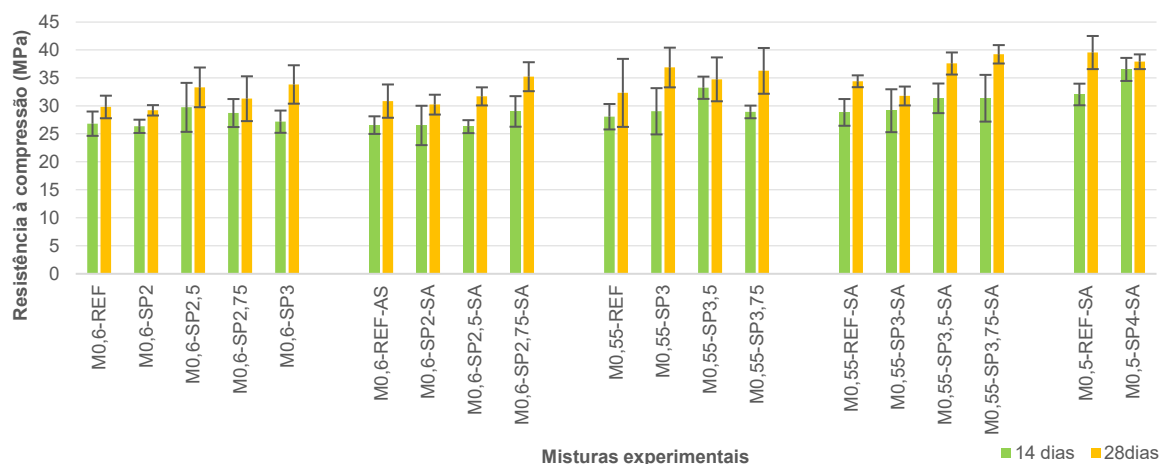
A Tabela 34 apresenta os dados de resistência à compressão aos 14 e 28 dias, ilustrados comparativamente na Figura 102.

Tabela 34 - Resistência à compressão (MPa) das misturas da Etapa Experimental 4

MISTURAS	14 DIAS (MPa)		28 DIAS (MPa)	
	Média	D.P.	Média	D.P.
M0,6-REF	26,8	2,2	29,8	2,0
M0,6-SP2	26,4	1,2	29,2	0,9
M0,6-SP2,5	29,8	4,4	33,3	3,5
M0,6-SP2,75	28,7	2,5	31,3	4,0
M0,6-SP3	27,2	2,0	33,8	3,4
M0,6-REF-SA	26,6	1,6	30,9	3,0
M0,6-SP2-SA	26,5	3,5	30,2	1,8
M0,6-SP2,5-SA	26,3	1,2	31,7	1,6
M0,6-SP2,75-SA	29,0	2,7	35,2	2,6
M0,55-REF	28,1	2,3	32,3	6,1
M0,55-SP3	29,1	4,1	36,9	3,5
M0,55-SP3,5	33,3	2,0	34,8	3,9
M0,55-SP3,75	28,9	1,1	36,3	4,1
M0,55-REF-SA	28,9	2,4	34,4	1,1
M0,55-SP3-SA	29,1	3,8	31,8	1,7
M0,55-SP3,5-SA	31,4	2,6	37,6	2,0
M0,55-SP3,75-SA	31,4	4,2	39,2	1,6
M0,5-REF-SA	32,1	1,9	39,5	3,0
M0,5-SP4-SA	36,5	2,0	37,9	1,3

Fonte: Autoria própria, 2026

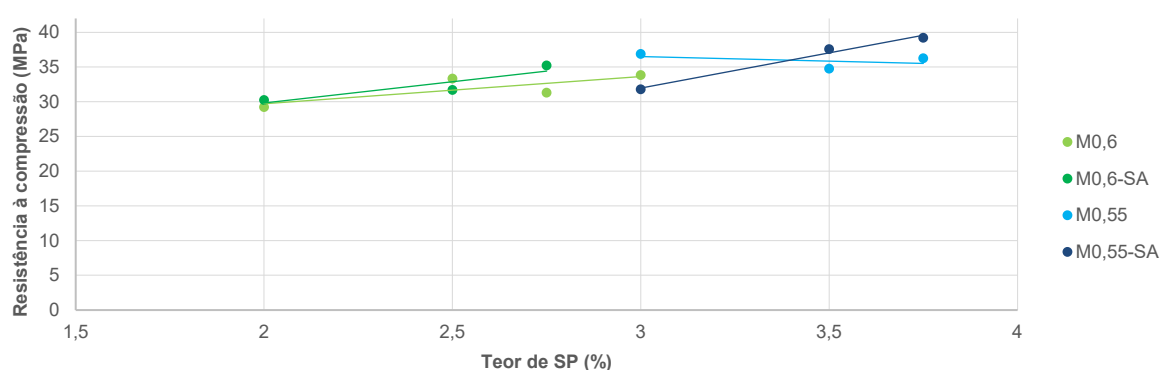
Figura 102 - Comparação gráfica da evolução da resistência à compressão das misturas aos 14 e 28 dias



Fonte: Autoria própria, 2026

Observando inicialmente o grupo com $a/l = 0,60$, a introdução de filer calcário (M0,6-SP2) resultou em redução da resistência em cerca de 2,1% em relação à M0,6-REF. Com o aumento do teor de SP, a Figura 103 evidencia tendência de crescimento das resistências. A mistura M0,6-SP2,5 atingiu aumento de 11,7% em relação à referência, enquanto para M0,6-SP2,75 e M0,6-SP3 o aumento foi de 4,9%, e 13,4%, respectivamente. Esses resultados indicam teor ótimo próximo de 3%, no qual a melhor dispersão das partículas cimentícias reduz a floculação, aumenta a eficiência do empacotamento e contribui para maior densificação da pasta.

Figura 103 - Relação entre teor de superplastificante e resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Autoria própria, 2026

A elevação do teor de sílica ativa para 10% produziu ganhos adicionais. A mistura M0,6-SP2,75-SA atingiu valor 12,5% superior à mistura equivalente (M0,6-SP2,75). Além disso, essa formulação apresentou ganho de 21,4% entre 14 e 28 dias, o maior do grupo, evidenciando a contribuição da reação pozolânica tardia.

A redução da relação água/ligante para 0,55 resultou em incremento consistente das resistências. A mistura M0,55-REF atingiu valor 8,3% superior ao da mistura M0,6-REF, confirmando a influência predominante da redução da porosidade capilar. O aumento do superplastificante promoveu ganhos adicionais de 14,3% para M0,55-SP3, 7,6% para M0,55-SP3,5 e 12,3% para M0,55-SP3,75, sendo observada uma faixa ótima entre 3% e 3,75%.

Com o aumento para 10% de sílica ativa, os ganhos tornaram-se mais pronunciados. A mistura M0,55-REF-SA apresentou aumento de 6,8% em relação à M0,55-REF, enquanto para maiores teores de aditivo, os efeitos foram potencializados. Esses resultados demonstram a sinergia entre baixa relação a/l , elevada dispersão e maior teor pozolânico, resultando em microestrutura mais compacta e resistente.

As maiores resistências absolutas foram registradas para $a/l = 0,50$. A mistura M0,5-REF-SA atingiu valor 14,5% maior em relação à M0,55-REF-SA e de 28,8% em relação à M0,6-REF-SA. Entretanto, o aumento do teor de superplastificante para 4% queda de aproximadamente 4%, sugerindo possível superdosagem do aditivo.

Em síntese, a análise conjunta da Tabela 34 e da Figura 102 demonstra que a resistência à compressão aumenta sistematicamente com a redução da relação água/ligante, sendo potencializada por teores ótimos de superplastificante e maior conteúdo de sílica ativa. As misturas com $a/l \leq 0,55$ associadas a 3–3,75% de SP e 10% de sílica ativa apresentaram o melhor desempenho global, confirmando que a densificação microestrutural é o principal fator responsável pelo aumento da capacidade resistente do material.

12.1.6 Comportamento no estado endurecido: módulo de elasticidade

A Tabela 35 apresenta a evolução do módulo de elasticidade das 19 misturas.

Tabela 35 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas da Etapa Experimental 4

MISTURAS	1D (GPa)		3D (GPa)		7D (GPa)		14D (GPa)		21D (GPa)		28D (GPa)	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
M0,6-REF	23,7	0,2	26,3	0,1	26,8	0,2	28,8	0,0	28,4	0,2	29,2	0,2
M0,6-SP2	24,4	0,2	28,5	0,2	29,3	0,2	31,6	0,3	31,5	0,4	31,7	0,3
M0,6-SP2,5	24,1	0,2	28,4	0,2	30,1	0,1	31,8	0,2	32,1	0,3	31,7	0,2
M0,6-SP2,75	23,7	0,1	29,6	0,3	30,6	0,2	33,5	0,2	33,2	0,3	33,2	0,4
M0,6-SP3	23,5	0,1	29,9	0,2	31,2	0,3	33,6	0,2	33,7	0,1	33,7	0,2
M0,6-REF-SA	20,5	0,2	23,6	0,3	25,1	0,3	26,7	0,4	27,1	0,5	27,2	0,6
M0,6-SP2-SA	26,2	0,2	30,5	0,4	32,3	0,5	33,9	1,0	34,5	0,7	34,7	0,3
M0,6-SP2,5-SA	24,9	0,2	29,7	0,0	31,6	0,8	32,8	0,5	33,5	0,7	33,8	0,6
M0,6-SP2,75-SA	23,8	0,2	28,9	0,3	30,4	0,2	33,3	0,3	33,4	0,3	33,9	0,3
M0,55-REF	23,7	0,2	29,1	0,3	30,3	0,1	31,6	0,4	31,7	0,3	31,7	0,3
M0,55-SP3	22,7	0,2	31,1	0,3	32,2	0,3	33,7	0,3	34,6	0,4	34,6	0,5
M0,55-SP3,5	19,2	0,1	29,2	0,2	32,0	0,3	33,2	0,3	33,5	0,3	33,8	0,2
M0,55-SP3,75	17,0	0,1	30,1	0,3	32,4	0,3	33,5	0,3	33,2	0,3	34,1	0,2
M0,55-REF-SA	23,4	0,3	26,3	0,2	28,2	0,1	30,4	0,1	31,1	0,2	31,2	0,0
M0,55-SP3-SA	27,5	0,2	32,2	0,1	34,2	0,4	35,7	0,4	36,3	0,9	36,7	0,5
M0,55-SP3,5-SA	25,8	0,2	32,0	0,3	33,0	0,3	36,3	0,4	37,5	0,4	37,2	0,4
M0,55-SP3,75-SA	25,0	0,2	31,5	0,3	32,7	0,3	36,2	0,4	36,9	0,4	36,9	0,4
M0,5-REF-SA	26,0	0,1	29,4	0,1	32,1	1,0	33,8	0,4	34,6	0,5	34,8	0,6
M0,5-SP4-SA	26,2	0,2	34,5	0,5	36,9	0,4	38,4	0,5	39,1	0,6	39,5	0,1

Fonte: Autoria própria, 2026

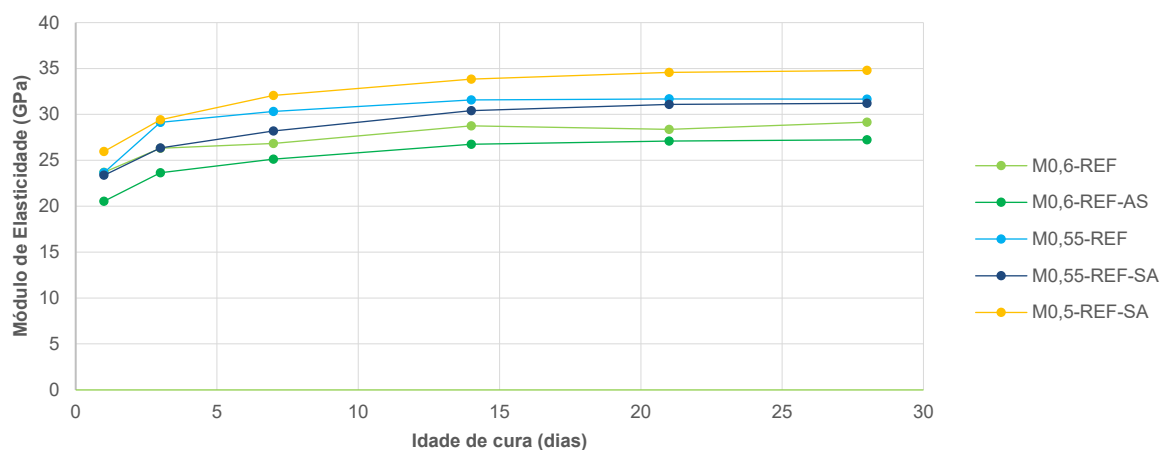
De forma geral, todas as misturas apresentaram crescimento progressivo do módulo de elasticidade com a idade, com maiores incrementos observados entre 1 e 7 dias, seguidos de tendência de estabilização após 14 dias.

Inicialmente, analisou-se o efeito da relação a/l nas misturas de referência (Figura 104). A redução da relação a/l da mistura M0,6-REF para M0,55-REF resultou em incremento de aproximadamente 9,8% no módulo aos 28 dias. Observa-se ainda que, já aos 3 dias, a mistura

M0,55-REF apresentou módulo 11,7% superior ao da M0,6-REF, indicando que a redução da a/l também acelera o desenvolvimento inicial da rigidez.

Quando a análise é realizada nas misturas com 10% de sílica ativa, o efeito da relação a/l torna-se ainda mais pronunciado. Comparando M0,6-REF-SA, M0,55-REF-SA e M0,5-REF-SA aos 28 dias, verifica-se que a redução de 0,60 para 0,55 promoveu aumento de 14,6%, enquanto a redução adicional para 0,50 resultou em incremento total de 27,8% em relação à M0,6-REF-SA. Esse comportamento evidencia interação entre baixa relação a/l e reação pozolânica da sílica ativa, uma vez que a menor disponibilidade de água livre favorece a formação de uma microestrutura mais densa e potencializa o consumo de hidróxido de cálcio, com formação adicional de C-S-H secundário.

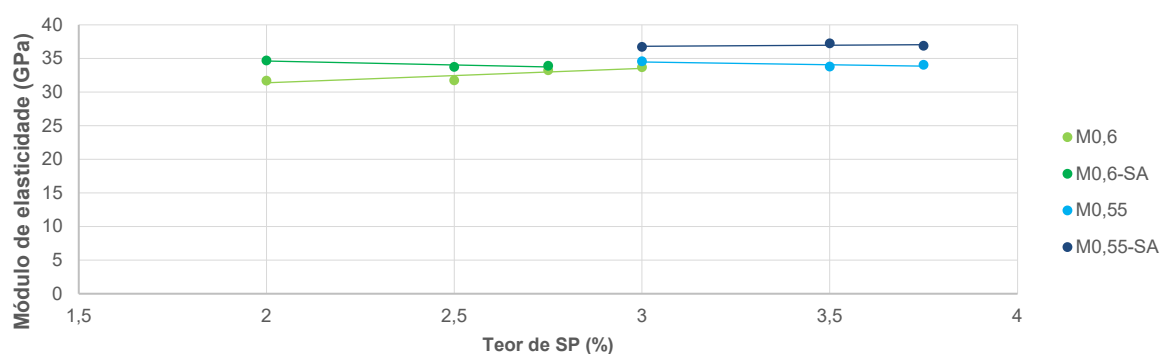
Figura 104 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas de referência



Fonte: Autoria própria, 2026

A influência do superplastificante foi avaliada dentro de cada grupo de mesma relação a/l (Figura 105).

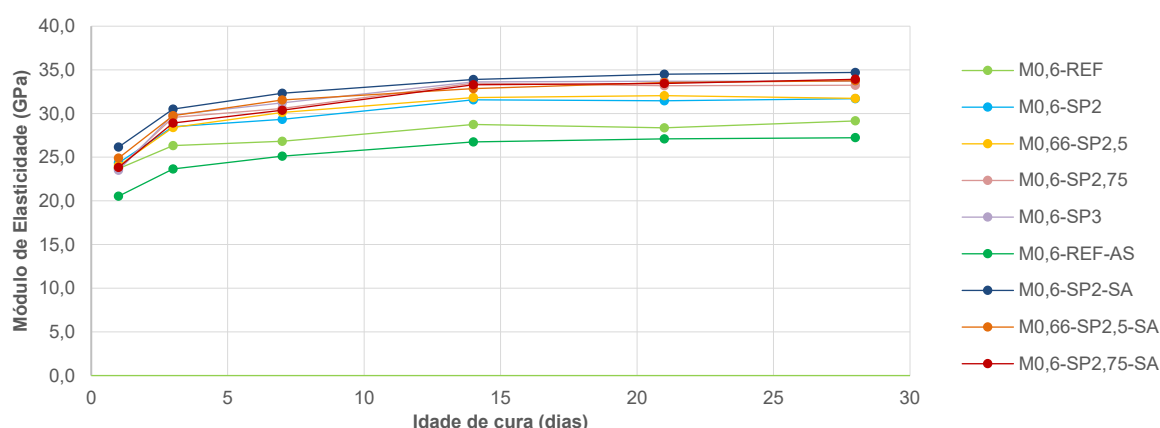
Figura 105 - Relação entre o teor de superplastificante e o módulo de elasticidade aos 28 dias



Fonte: Autoria própria, 2026

No grupo M0,6 (Figura 106), o aumento do teor de SP de 2% para 3% promoveu crescimento sistemático do módulo aos 28 dias, correspondendo a ganho de 16,7% em relação à M0,6-REF. O efeito foi progressivo, com incrementos intermediários de aproximadamente 10–15% para teores entre 2% e 2,75%. Nas misturas com 10% de sílica ativa, o efeito do SP mostrou-se ainda mais relevante. No grupo M0,6-SA a mistura M0,6-SP2-SA apresentou incremento de 9,5% em relação à correspondente (M0,6-SP2) e 27,9% superior à M0,6-REF-SA.

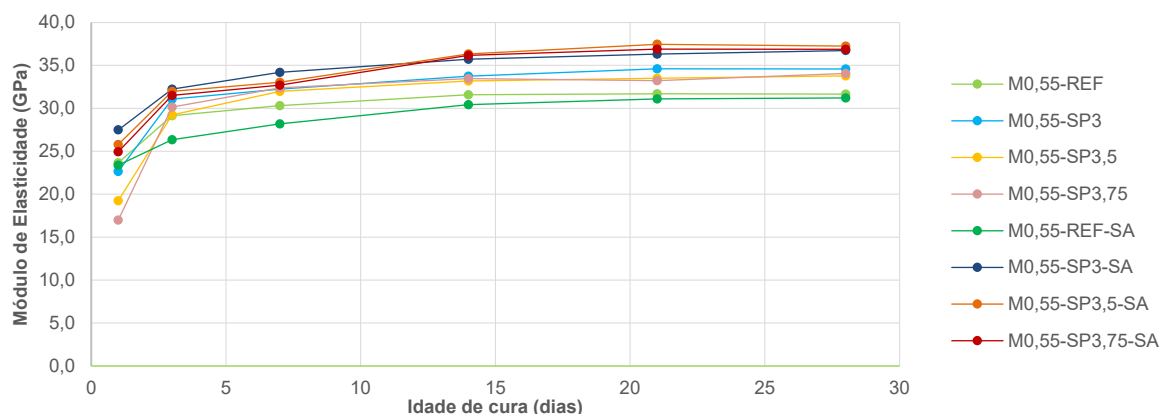
Figura 106 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas do grupo M0,6 e M0,6-SA



Fonte: Autoria própria, 2026

No grupo M0,55 (Figura 107), a tendência geral também foi de aumento do módulo com maiores teores de SP. Contudo, observou-se comportamento atípico nas idades iniciais para SP3,5 e SP3,75, com valores significativamente reduzidos aos 1 e 3 dias. Essa queda inicial, seguida de recuperação expressiva aos 7 dias, sugere possível retardamento temporário da hidratação ou maior incorporação de ar devido ao elevado teor de aditivo. Entretanto, aos 28 dias os valores convergiram para patamares próximos, indicando que o efeito foi predominantemente cinético e não comprometeu a rigidez final.

Figura 107 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas do grupo M0,55

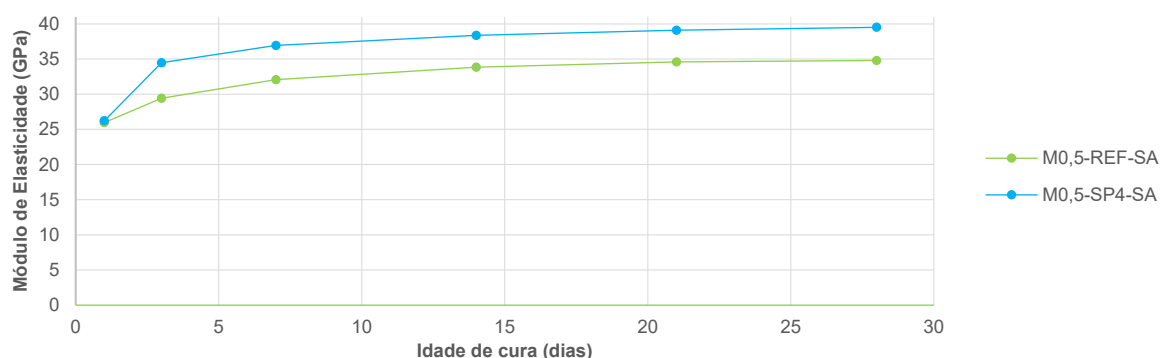


Fonte: Autoria própria, 2026

No grupo M0,55-SA, os módulos apresentaram aumento de aproximadamente 6–8% em relação às misturas equivalentes. Isso confirma que a presença de sílica ativa amplifica os efeitos do superplastificante, possivelmente devido à maior necessidade de dispersão associada à elevada área específica da adição mineral.

O melhor desempenho global foi observado na mistura M0,5-SP4-SA aos 28 dias (Figura 108), representando aumento de 13,6% em relação à M0,5-REF-SA e 37% superior à M0,6-REF. Além disso, essa mistura já apresentou 36,9 GPa aos 7 dias, indicando desenvolvimento acelerado de rigidez.

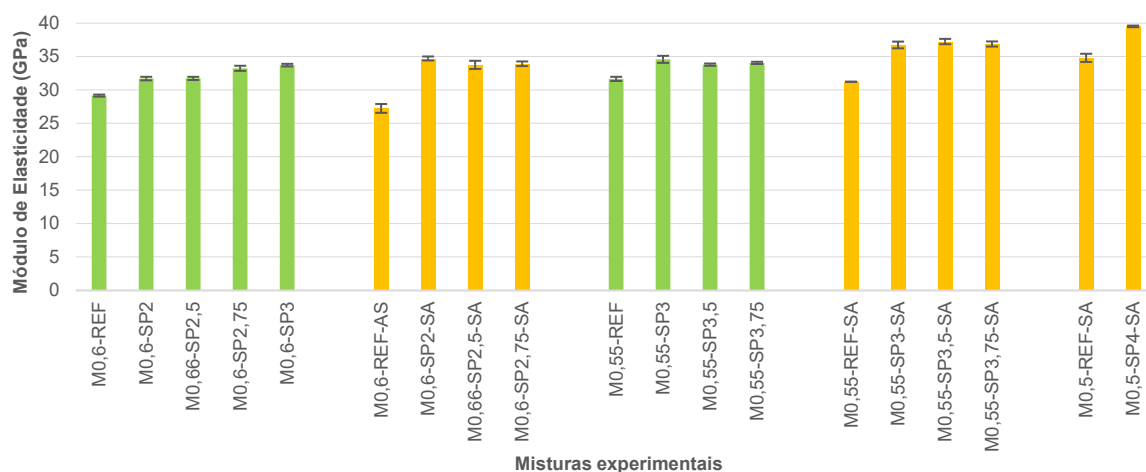
Figura 108 - Evolução do módulo de elasticidade das misturas do grupo M0,5-SA em função do teor de superplastificante



Fonte: Autoria própria, 2026

De forma integrada, os resultados indicam que a redução da relação água/ligante constituiu o fator mais determinante no aumento do módulo de elasticidade, evidenciando a forte influência da compacidade da matriz cimentícia na rigidez do material, refletindo em incrementos expressivos nos valores obtidos aos 28 dias (Figura 109).

Figura 109 - Comparação do módulo de elasticidade aos 28 dias para as misturas da Etapa Experimental 4



Fonte: Autoria própria, 2026

12.1.7 Capacidade de extrusão e estabilidade dimensional

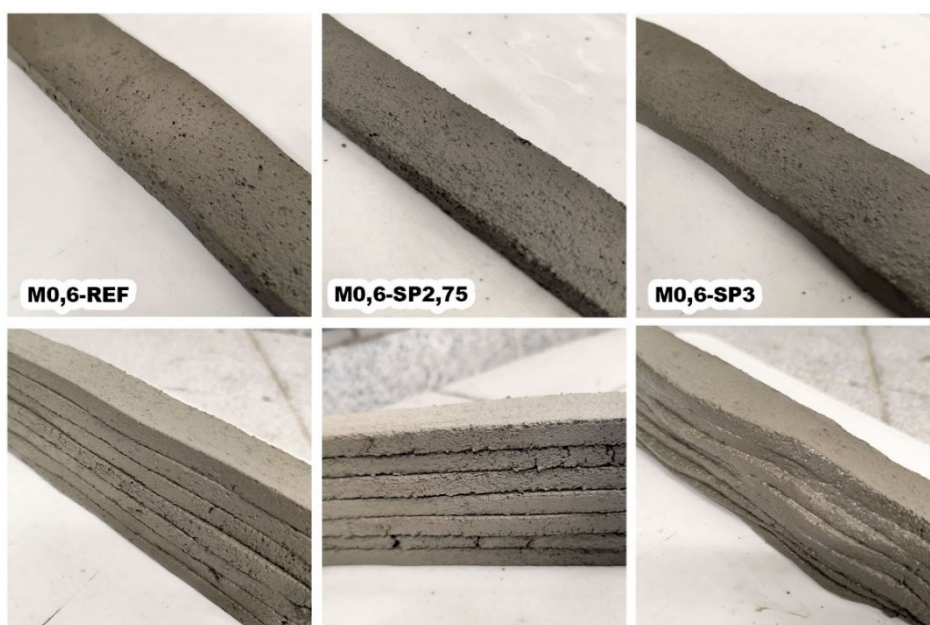
Em argamassas para impressão 3D, o espalhamento representa um indicador indireto da fluidez inicial, porém não é suficiente isoladamente para garantir boa capacidade de impressão. Misturas com espalhamento muito baixo tendem a apresentar baixa coesão e dificuldade de extrusão, enquanto espalhamentos excessivamente elevados favorecem o colapso geométrico, fundição entre camadas e perda de definição.

Em geral, observou-se que as misturas apresentaram espalhamentos variando aproximadamente entre 180 e 270 mm, sendo que os melhores resultados de estabilidade geométrica ocorreram em uma faixa intermediária, associada a um balanço adequado entre fluidez, coesão e capacidade de estruturação após a deposição.

Dentre as 19 misturas avaliadas, 12 apresentaram capacidade de extrusão na pistola manual. A Figura 110 apresenta os filamentos extrudados e o ensaio de empilhamento das misturas com relação $a/l = 0,6$, enquanto a Figura 111 apresenta os resultados correspondentes às misturas M0,6 com 10% de sílica ativa (SA).

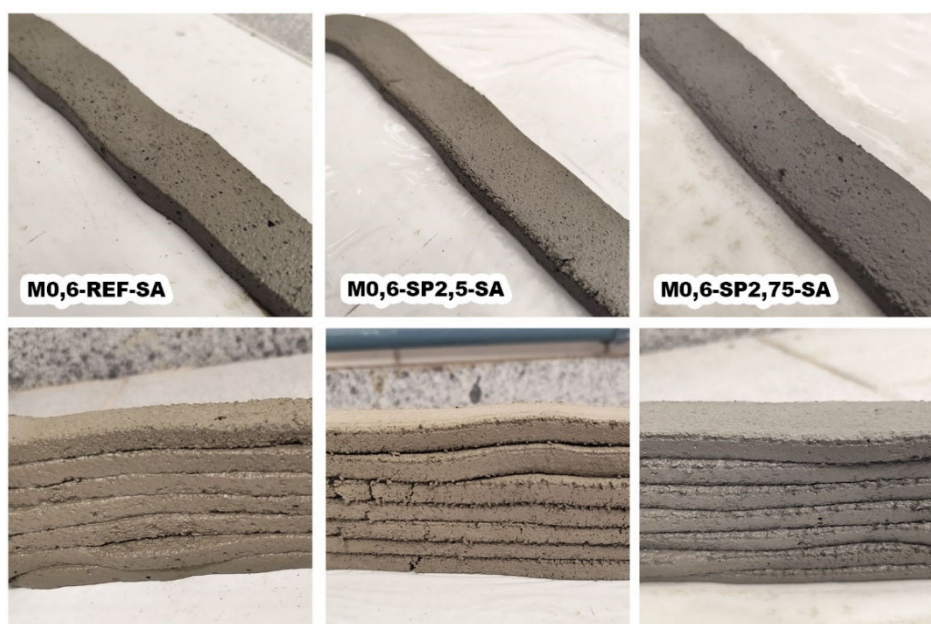
As misturas M0,6-SP2 e M0,6-SP2-SA não apresentaram capacidade de extrusão. Apesar do aumento do teor de sílica ativa ter promovido maior espalhamento, para esse valor de a/l e SP as misturas apresentaram aspecto extremamente seco, comportamento friável e baixa coesão, resultando na formação de um material em farelo, incapaz de ser extrudado pela pistola.

Figura 110 - Filamentos extrudados e ensaio de empilhamento das misturas com relação $a/l = 0,6$



Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 111 - Filamentos extrudados e ensaio de empilhamento das misturas M0,6 com 10% de sílica ativa



Fonte: Autoria própria, 2026

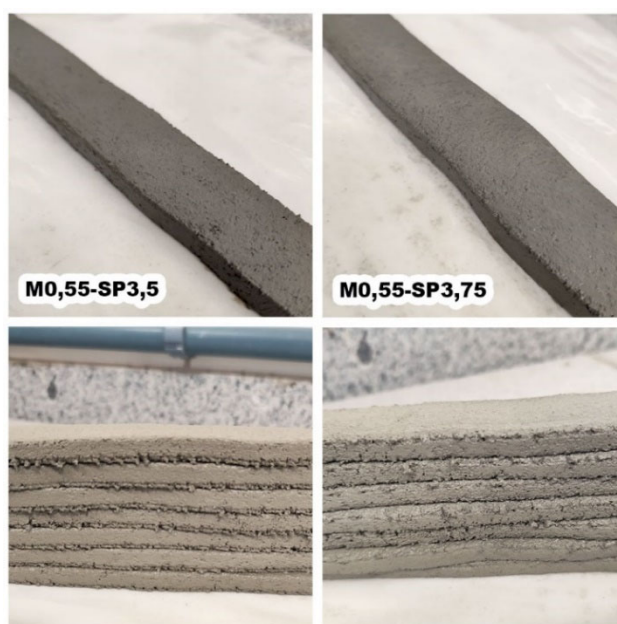
A mistura M0,6-SP2,5, embora tenha apresentado melhora na coesão em relação à M0,6-SP2, ainda não atingiu condições adequadas de extrusão contínua. Esse comportamento foi corrigido com o aumento do teor de sílica ativa, evidenciando o papel da SA na melhoria da coesão e da retenção de água, favorecendo a capacidade de extrusão.

A mistura M0,6-SP2,75 apresentou melhor extrusão, porém com resistência significativa durante o teste, resultando em filamentos com tendência ao rompimento. Já a mistura M0,6-SP3, embora facilmente imprimível, apresentou baixa capacidade de estruturação, com deformações evidentes durante o empilhamento. Esses resultados indicam que, para a relação $a/l = 0,6$ e 5% de sílica ativa, o teor ótimo de superplastificante situa-se entre 2,75% e 3,0%, representando um compromisso entre capacidade de extrusão e estabilidade geométrica.

No caso das misturas com sílica ativa, a M0,6-SP2,75-SA representou o limite superior da capacidade de impressão para esse nível de água, apresentando deformações visíveis já durante o teste de empilhamento, com tendência à perda de forma nas camadas inferiores.

A Figura 112 apresenta os filamentos e o ensaio de empilhamento das misturas com relação $a/l = 0,55$, enquanto a Figura 113 apresenta os resultados para as misturas M0,55-SA.

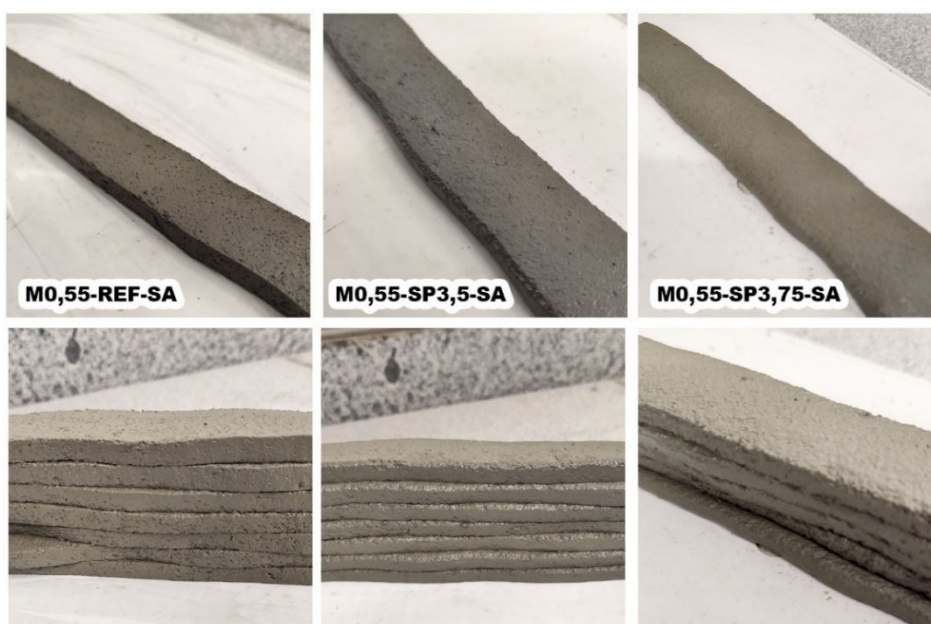
Figura 112 - Filamentos extrudados e ensaio de empilhamento das misturas com relação $a/l = 0,55$



Fonte: Autoria própria, 2026

As misturas M0,55-SP3 e M0,55-SP3-SA apresentaram comportamento excessivamente seco e pouco coeso, inviabilizando a impressão. A mistura M0,55-REF evidenciou que, para o teor de superplastificante adotado como referência, a redução da relação a/l mostrou-se impraticável para garantir consistência adequada à extrusão.

Figura 113 - Filamentos extrudados e ensaio de empilhamento das misturas M0,55 com 10% de sílica ativa

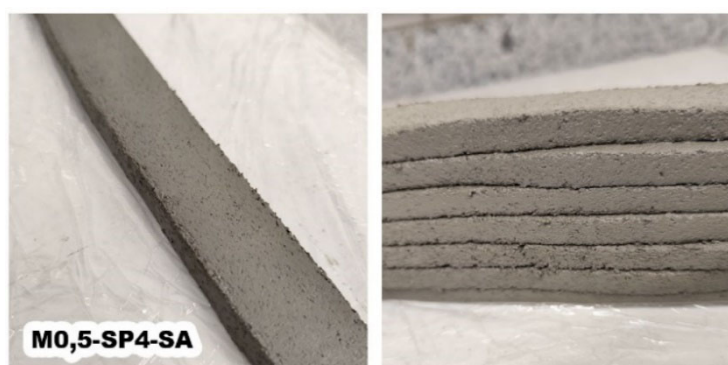


Fonte: Autoria própria, 2026

A mistura M0,55-SP3,5, embora passível de extrusão, também apresentou certa resistência para execução no processo manual, com filamentos com tendência ao rompimento durante a execução. Enquanto a mistura M0,55-SP3,75-SA apresentou elevada deformação já na deposição da primeira camada, com espalhamento excessivo e dificuldade de manutenção da geometria do filamento, indicando um excesso de fluidez para esse nível de água.

A Figura 114 apresenta os filamentos e o ensaio de empilhamento para as misturas com relação $a/l = 0,5$. A mistura M0,5-SP4-SA, embora também tenha sido extrudada, apresentou leve resistência à extrusão durante o teste, indicando que, apesar do elevado teor de superplastificante, a baixa relação a/l comprometeu a coesão estrutural do material.

Figura 114 - Filamentos extrudados e ensaio de empilhamento das misturas com relação $a/l = 0,5$



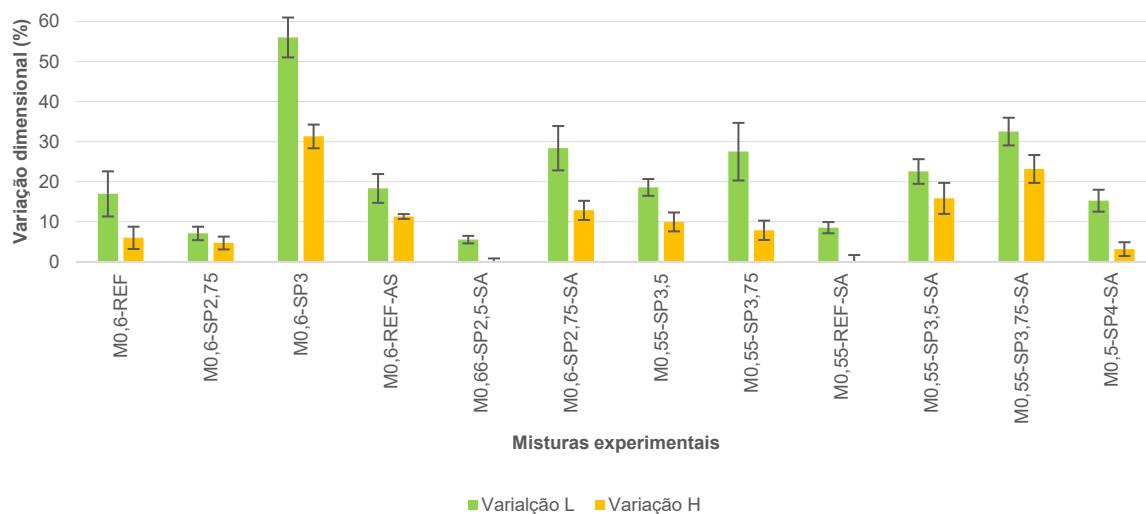
Fonte: Autoria própria, 2026

Após período de cura, os corpos de prova impressos foram medidos da largura da primeira camada (L) e da altura total (H). As variações percentuais em relação aos valores esperados estão apresentadas na Tabela 36 (Figura 115).

Tabela 36 - Variação dimensional da largura da primeira camada e da altura total dos corpos de prova impressos em relação às dimensões teóricas

MISTURA	VARIAÇÃO L (%)		VARIAÇÃO H (%)	
	Média	D.P.	Média	D.P.
M0,6-REF	16,99	5,64	6,01	2,77
M0,6-SP2,75	7,11	1,67	4,71	1,58
M0,6-SP3	56,04	4,97	31,34	2,95
M0,6-REF-SA	18,34	3,59	11,33	0,60
M0,6-SP2,5-SA	5,57	0,94	0,04	0,83
M0,6-SP2,75-SA	28,38	5,54	12,87	2,38
M0,55-SP3,5	18,59	2,11	9,98	2,35
M0,55-SP3,75	27,54	7,19	7,89	2,43
M0,55-REF-SA	8,55	1,41	0,13	1,57
M0,55-SP3,5-SA	22,58	3,08	15,87	3,88
M0,55-SP3,75-SA	32,55	3,46	23,20	3,48
M0,5-SP4-SA	15,27	2,73	3,19	1,71

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 115 - Comparação entre variação da altura e largura para as misturas extrudadas com pistola

Fonte: Autoria própria, 2026

Em geral, misturas com maior espalhamento no estado fresco apresentaram as maiores variações geométricas, confirmando a relação direta entre fluidez excessiva e perda de estabilidade dimensional. Em contraste, misturas como M0,6-SP2,5-SA e M0,55-REF-SA, que apresentaram espalhamentos intermediários e boa coesão, mostraram variações mínimas de largura e altura, indicando melhor desempenho para impressão 3D.

A análise visual permitiu complementar os resultados obtidos nos ensaios de espalhamento, capacidade de extrusão e variação dimensional, fornecendo informações qualitativas relevantes sobre a estabilidade geométrica, a definição das camadas, a coesão do filamento.

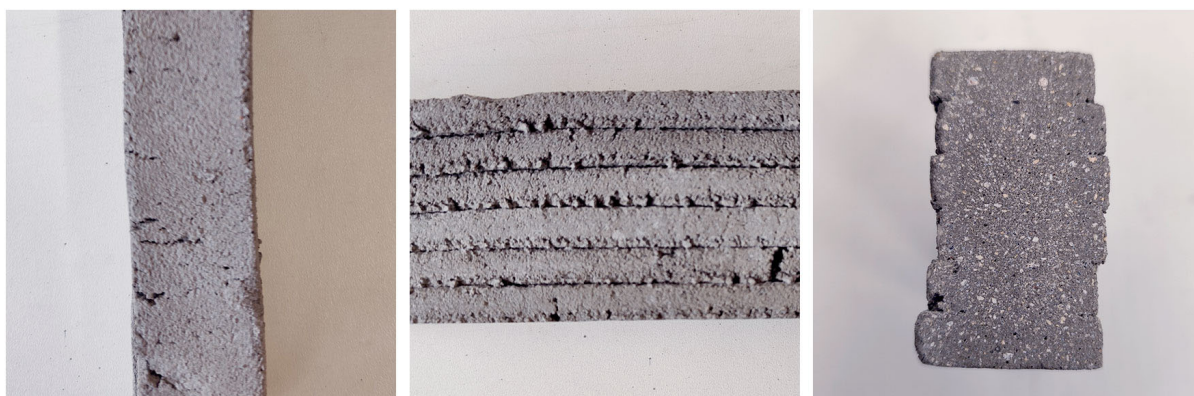
A mistura M0,6-REF (Figura 116) apresentou baixa deformação na primeira camada. O acabamento superficial mostrou-se liso, com aspecto semibrilhante, e foram observados sinais iniciais de fusão entre as faces das camadas, indicando fluidez excessiva.

Figura 116 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,6-REF: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte

Fonte: Autoria própria, 2026

A mistura M0,6-SP2,75 (Figura 117) não apresentou deformações visíveis nas camadas impressas, com camadas bem definidas ao longo da altura do corpo de prova. No entanto, o filamento apresentou textura rugosa e aspecto bastante áspero. Observou-se propensão ao rompimento do filamento durante a extrusão, indicando elevada rigidez do material no estado fresco.

Figura 117 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,6-SP2,75: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte



Fonte: Autoria própria, 2026

A mistura M0,6-SP3 (Figura 118) apresentou alta deformação em todas as camadas, com perda progressiva da altura total do corpo de prova. O acabamento superficial foi liso e brilhante, com baixa definição de camadas (praticamente fundidas entre si), evidenciando fluidez excessiva e baixa resistência à deformação sob o peso próprio.

Figura 118 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,6-SP3: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte



Fonte: Autoria própria, 2026

Na mistura M0,6-REF-SA (Figura 119), observou-se espalhamento significativo da primeira camada, seguido por deformações nas camadas superiores. O corpo de prova apresentou

aspecto liso, lustroso e brilhante, com baixa definição entre camadas, sugerindo excesso de fluidez associado à presença de sílica ativa nesse nível de relação água/ligante.

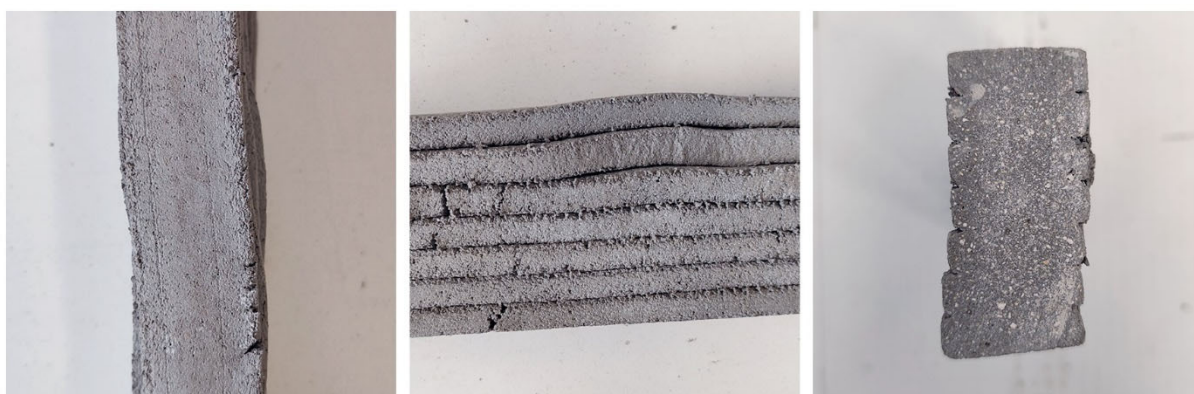
Figura 119 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,6-REF-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte



Fonte: Autoria própria, 2026

A mistura M0,6-SP2,5-SA (Figura 120) não apresentou deformações visíveis em nenhuma das camadas. O acabamento superficial mostrou-se áspero, com camadas bem definidas e boa manutenção da geometria ao longo da altura. Apesar do bom desempenho geométrico, observou-se tendência ao rompimento do filamento durante a extrusão, indicando elevada rigidez e menor capacidade de deformação plástica do material.

Figura 120 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,6-SP2,5-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte



Fonte: Autoria própria, 2026

A mistura M0,6-SP2,75-SA (Figura 121) apresentou deformação acentuada na primeira camada, deformação moderada na segunda e comportamento estável nas camadas superiores. O acabamento superficial apresentado é predominantemente liso, com aspecto semibrilhante. Foram observados sinais iniciais de redução da resolução entre camadas.

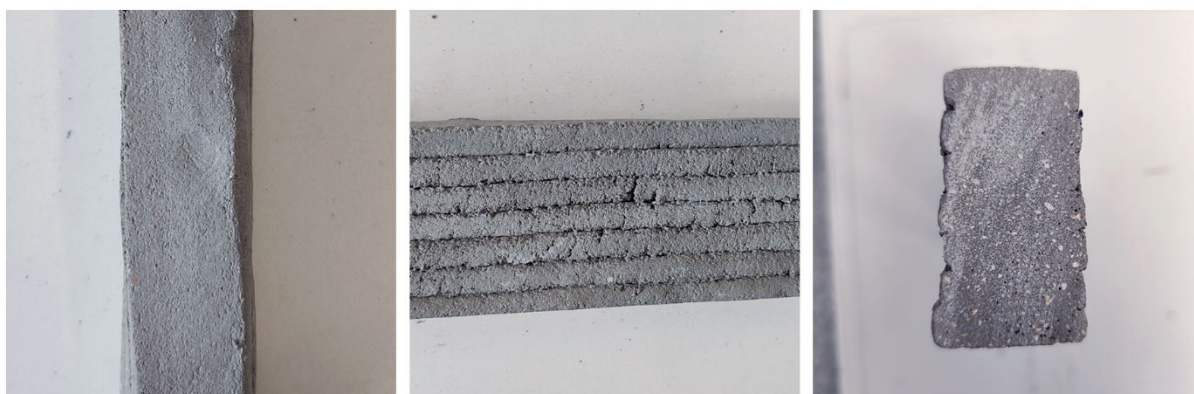
Figura 121 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,6-SP2,75-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte



Fonte: Autoria própria, 2026

A mistura M0,55-SP3,5 (Figura 122) apresentou deformação na primeira camada e nas regiões próximas às extremidades do corpo de prova. O acabamento superficial mostrou-se levemente rugoso nas faces laterais e liso na face superior. As camadas permaneceram definidas, embora com indícios iniciais de fusão, indicando um comportamento intermediário entre estabilidade e fluidez excessiva.

Figura 122 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,55-SP3,5: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte



Fonte: Autoria própria, 2026

Na mistura M0,55-SP3,75 (Figura 123), observou-se redução gradual da altura das camadas ao longo da impressão. O corpo de prova apresentou aspecto liso, com acabamento rústico-brilhante, e as camadas encontravam-se praticamente fundidas com baixa definição entre estas, evidenciando baixa capacidade de suporte estrutural após a deposição.

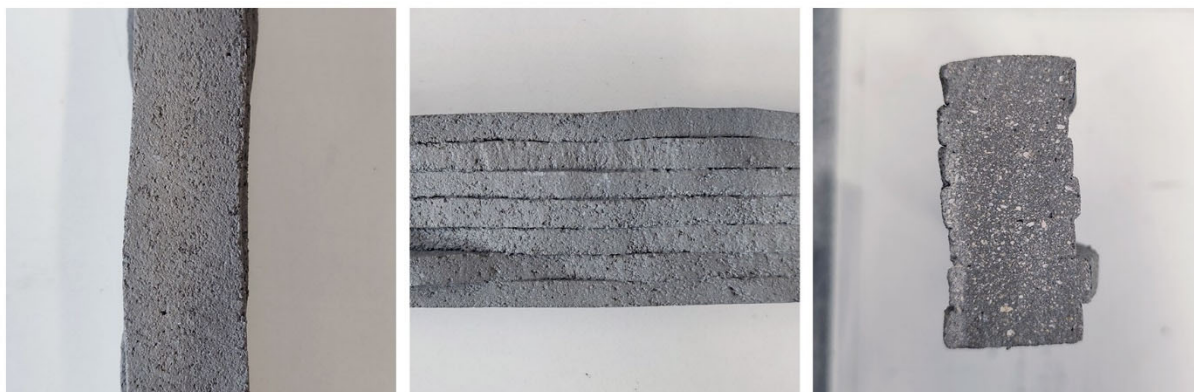
Figura 123 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,55-SP3,75: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte



Fonte: Autoria própria, 2026

A mistura M0,55-REF-SA (Figura 124) não apresentou alterações visuais significativas. O corpo de prova apresentou aspecto rústico, com presença de estrias perpendiculares às camadas, mantendo ainda uma superfície relativamente lisa. As camadas permaneceram bem definidas, com boa aderência intercamadas e adequada estabilidade geométrica.

Figura 124 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,55-REF-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte



Fonte: Autoria própria, 2026

A mistura M0,55-SP3,5-SA (Figura 125) apresentou redução visível das duas primeiras camadas, indicando deformação inicial significativa. O acabamento superficial foi liso, com aspecto brilhante e aparência envernizada, sendo observado início de redução da definição entre camadas.

Figura 125 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,55-SP3,5-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte



Fonte: Autoria própria, 2026

Na mistura M0,55-SP3,75-SA (Figura 126), observou-se elevada deformação nas primeiras camadas, enquanto as camadas superiores apresentaram melhor estabilidade. O acabamento superficial mostrou-se heterogêneo, com uma face mais rugosa e outra lisa, além de superfície superior lisa. As camadas apresentaram menor definição nas camadas de base, melhorando nas camadas superiores.

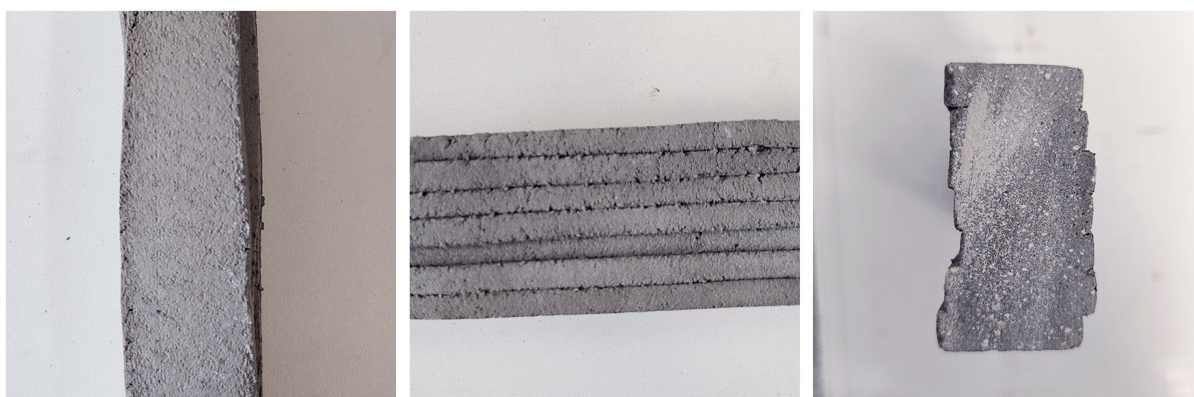
Figura 126 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,55-SP3,75-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte



Fonte: Autoria própria, 2026

Por fim, a mistura M0,5-SP4-SA (Figura 127) não apresentou alterações visuais significativas nas camadas extrudadas. O acabamento superficial foi predominantemente rústico e as camadas mantiveram-se bem definidas ao longo da altura do corpo de prova.

Figura 127 - Caracterização visual do corpo de prova da mistura M0,5-SP4-SA: (a) superfície superior; (b) vista lateral das camadas extrudadas; (c) seção transversal após corte



Fonte: Autoria própria, 2026

12.2 SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA EXPERIMENTAL 4

De forma integrada, os resultados da Etapa Experimental 4 evidenciam que a redução da relação água/ligante constituiu o fator mais determinante para a melhoria do desempenho global das misturas, influenciando simultaneamente a densidade, o teor de ar incorporado, a estabilidade dimensional e as propriedades mecânicas. A diminuição progressiva da a/l promoveu maior compacidade da matriz, redução da perda de massa e da retração, além de incrementos consistentes na resistência à compressão, à tração e no módulo de elasticidade.

O superplastificante demonstrou papel central no controle da fluidez e na viabilização da capacidade de extrusão em baixos teores de água, porém seu efeito mostrou-se dependente da dosagem e da interação com a sílica ativa. Teores moderados de SP favoreceram a dispersão das partículas, otimizaram o empacotamento e resultaram em ganhos mecânicos; entretanto, superdosagens tenderam a aumentar a incorporação de ar, elevar a perda de massa e comprometer a estabilidade geométrica das camadas impressas.

A incorporação de 10% de sílica ativa contribuiu para o refinamento microestrutural e para o aumento do módulo de elasticidade e da resistência à compressão, especialmente quando associada a adequada dispersão. Contudo, sua presença também aumentou a sensibilidade do sistema ao teor de superplastificante, exigindo ajustes finos para evitar fluidez excessiva ou perda de coesão.

No que se refere à aplicabilidade em impressão 3D, verificou-se que o melhor desempenho foi obtido em misturas com espalhamento intermediário, capazes de conciliar fluidez suficiente para extrusão contínua com resistência inicial adequada para sustentar o empilhamento das camadas. De modo geral, as formulações com $a/l \leq 0,55$, associadas a teores ótimos de

superplastificante e à presença de sílica ativa, apresentaram o equilíbrio mais favorável entre desempenho, estabilidade dimensional e capacidade resistente.

Assim, a Etapa Experimental 4 permitiu estabelecer parâmetros de otimização final da mistura, demonstrando que a combinação equilibrada entre baixa relação água/ligante, teor adequado de superplastificante e incorporação controlada de sílica ativa é essencial para alcançar desempenho mecânico elevado e viabilidade prática em sistemas de impressão 3D.

CAPÍTULO 13

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver, avaliar e otimizar composições de argamassas cimentícias destinadas à aplicação em impressão 3D, considerando simultaneamente características no estado fresco, estabilidade volumétrica e propriedades mecânicas. A estratégia experimental foi estruturada em quatro etapas complementares, permitindo a construção progressiva do conhecimento e a validação de um método de dosagem aplicável a sistemas extrudáveis.

A Etapa Experimental 1 estabeleceu a base metodológica do estudo, demonstrando a aplicabilidade do método de Selmo (1989), como uma referência inicial para desenvolvimento para argamassas destinadas à impressão 3D. As correlações obtidas entre composição, comportamento no estado fresco e desempenho mecânico evidenciaram consistência e previsibilidade, permitindo a definição de traços iniciais com controle racional da demanda de água e da trabalhabilidade. Dessa forma, essa etapa consolidou um modelo de dosagem capaz de orientar ajustes finos nas composições, reduzindo a dependência de procedimentos puramente empíricos.

Na Etapa Experimental 2, ao se investigar a influência do parâmetro E, da relação água:sólidos e do tipo de filer calcário, verificou-se que o desempenho das argamassas resulta da interação conjunta desses fatores. O aumento do parâmetro E implicou redução das resistências mecânicas, associada à diminuição da fração de ligante ativo, enquanto a elevação da relação água:sólidos intensificou a retração e a perda de massa. Nesse contexto, as misturas com filer dolomítico apresentaram, de modo geral, melhor desempenho mecânico e maior estabilidade dimensional em relação às calcíticas, indicando uma resposta mais eficiente às variações de composição. Os resultados dessa etapa evidenciaram a necessidade de equilíbrio entre esqueleto granular, teor de finos e conteúdo de água para garantir desempenho adequado.

A Etapa Experimental 3 aprofundou a análise ao avaliar o efeito do aumento do teor de filer nas misturas previamente definidas. Verificou-se que a incorporação adicional de filer promove melhoria da trabalhabilidade, associada ao aumento do teor de ar incorporado, sem comprometer de forma significativa a densidade no estado fresco. Do ponto de vista volumétrico, constatou-se que o aumento do filer em massa não resulta necessariamente em incremento proporcional da fração de finos, em função da influência da incorporação de ar na redistribuição das fases.

No estado endurecido, observou-se que o aumento do teor de fíler contribui para a redução da retração em módulo e para alterações no comportamento dimensional, com tendência à expansão em idades mais avançadas. A perda de massa apresentou forte dependência da relação água:sólidos, especialmente nas misturas com fíler dolomítico, evidenciando o papel central do fator H na mobilidade de água no sistema.

Por outro lado, verificou-se redução das resistências à flexão e à compressão com o aumento do teor de fíler e da relação água:sólidos, comportamento associado à diminuição da fração de ligante ativo. Esse efeito foi mais pronunciado nas misturas com fíler dolomítico, que apresentaram maior sensibilidade às variações de composição. Ainda assim, composições com menores teores de fíler e menores valores de H mantiveram desempenho mecânico satisfatório, indicando a existência de uma faixa de incorporação viável. Os resultados dessa etapa evidenciam, portanto, um compromisso claro entre melhoria de propriedades analisadas no estado fresco e perda de desempenho mecânico.

A Etapa Experimental 4 representou a etapa de otimização das misturas, avaliando de forma integrada os efeitos da relação água/ligante, do teor de superplastificante e da incorporação de sílica ativa. Os resultados demonstraram que a redução da relação água/ligante constitui o fator mais determinante para a melhoria do desempenho global, promovendo redução da perda de massa e da retração, além de incrementos consistentes nas resistências mecânicas e no módulo de elasticidade.

O superplastificante mostrou-se essencial para viabilizar baixos teores de água, atuando na dispersão das partículas e no controle da fluidez, embora sua eficácia dependa de dosagem adequada. A sílica ativa contribuiu para o aumento da resistência e da rigidez, especialmente quando associada a níveis ótimos de dispersão, mas também elevou a sensibilidade do sistema ao teor de aditivo.

A análise conjunta dos resultados permitiu identificar composições com diferentes níveis de desempenho e aplicabilidade. Misturas com menor relação água/ligante e maior teor de adições apresentaram desempenho mecânico superior, sendo mais adequadas para aplicações estruturais. Por outro lado, composições com maior relação água/ligante e menor consumo de aditivos mostraram maior viabilidade produtiva, com desempenho mecânico compatível com aplicações não estruturais ou de menor exigência.

De forma integrada, os resultados obtidos demonstram que o desempenho de argamassas para impressão 3D é governado pelo equilíbrio entre trabalhabilidade, estabilidade dimensional e capacidade resistente. A relação água/ligante (ou água:sólidos) se destaca

como o principal parâmetro de controle, influenciando simultaneamente todas as propriedades avaliadas, enquanto o teor de filler e o uso de aditivos atuam como variáveis de ajuste fino do sistema.

O método de dosagem adotado demonstrou-se tecnicamente consistente e adequado ao desenvolvimento de misturas para manufatura aditiva cimentícia, permitindo a definição de composições com comportamento previsível e desempenho ajustável conforme a aplicação. A abordagem proposta contribui para a sistematização do processo de formulação, ampliando a confiabilidade e a reprodutibilidade das misturas.

Por fim, os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos para aplicação prática das composições desenvolvidas, ao mesmo tempo em que estabelecem uma base sólida para investigações futuras. Recomenda-se, como continuidade da pesquisa, a avaliação da trabalhabilidade ao longo do tempo com o uso de aditivos modificadores de pega, a análise do comportamento estrutural de elementos impressos em escala real e a otimização ambiental das formulações, com foco na redução do teor de clínquer e na incorporação de materiais de menor impacto ambiental.

Entre essas perspectivas, destaca-se como prioritária a ampliação da janela de impressão, uma vez que a estabilidade ao longo do tempo constitui um dos principais desafios para a consolidação da tecnologia de impressão 3D em escala industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, Hadeer *et al.* Environmental Footprint and Economics of a Full-Scale 3D-Printed House. **Sustainability**, v. 13, n. 21, p. 11978, jan. 2021.

AC509. ICC Evaluation Service, LLC (ICC-ES), 2023. Disponível em: <<https://icc-es.org/acceptance-criteria/ac509/>>. Acesso em: 21 fev. 2025

ADALOUDIS, Max; BONNIN ROCA, Jaime. Sustainability tradeoffs in the adoption of 3D Concrete Printing in the construction industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 307, p. 127201, 20 jul. 2021.

AİTCİN, P. C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, Concrete Durability. v. 25, n. 4, p. 409–420, 1 maio 2003.

AL JASSMI, Hamad; AL NAJJAR, Fady; MOURAD, Abdel-Hamid Ismail. Large-Scale 3D Printing: The Way Forward. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 324, p. 012088, mar. 2018.

AL THIB, Raghd *et al.* A methodology for designing 3D printable mortar based on recycled sand. **Materials and Structures**, v. 56, n. 9, p. 165, 17 out. 2023.

ALAMI, Abdul Hai *et al.* 3D Concrete Printing: Recent Progress, Applications, Challenges, and Role in Achieving Sustainable Development Goals. **Buildings**, v. 13, n. 4, p. 924, abr. 2023.

ALI, Mohd Mukarram *et al.* Influence of carbon nanotubes on printing quality and mechanical properties of 3D printed cementitious materials. **Developments in the Built Environment**, v. 18, p. 100415, 1 abr. 2024.

ALLOUZI, Rawan; AL-AZHARI, Wael; ALLOUZI, Rabab. Conventional Construction and 3D Printing: A Comparison Study on Material Cost in Jordan. **Journal of Engineering**, v. 2020, n. 1, p. 1424682, 2020.

ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ, Martina-Inmaculada *et al.* Optimum Mix Design for 3D Concrete Printing Using Mining Tailings: A Case Study in Spain. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1568, jan. 2021.

AMBILY, Parukutty Sanker; RAJENDRAN, Neeraja; KALIYAVARADHAN, Senthil Kumar. Mix design, optimisation and performance evaluation of three-dimensional printable concrete. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v. 177, n. 5, p. 302–320, set. 2024.

ARAÚJO, Renato Costa. **IMPRESSÃO 3D PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL: Desenvolvimento de método para avaliar a capacidade de impressão e. Tese**—Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2024.

ARAÚJO, Rísia A. *et al.* Thermal performance of cement-leca composites for 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 349, p. 128771, 26 set. 2022.

ARUNOTHAYAN, Arun R. *et al.* Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119546, 10 out. 2020.

ARUNOTHAYAN, Arun R. *et al.* Rheological characterization of ultra-high performance concrete for 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 136, p. 104854, 1 fev. 2023.

ASLANI, Farhad *et al.* Mechanical and shrinkage performance of 3D-printed rubberised engineered cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 339, p. 127665, 11 jul. 2022.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15261 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear)**. Rio de Janeiro, , 2005c. . Acesso em: 22 maio. 2025

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1 - Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, , 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, , 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, , 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, , 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, , 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802 - Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. 2019.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281-2 - Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria**. Rio de Janeiro, , 2023.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM-C150-18 - Standard Specification for Portland Cement**. West Conshohocken, , 2018. Disponível em: <<https://store.astm.org/c0150-07.html>>. Acesso em: 20 maio. 2025

BAI, Meiyang *et al.* Workability and hardened properties of 3D printed engineered cementitious composites incorporating recycled sand and PE fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 71, p. 106477, 15 jul. 2023.

BAIGARINA, Akerke; SHEHAB, Essam; ALI, Md. Hazrat. Construction 3D printing: a critical review and future research directions. **Progress in Additive Manufacturing**, 7 fev. 2023.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. *In*: **ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1 p. 185–232.

BECHER, Brooke. **3D-Printed Houses: 12 Top Examples**. Disponível em: <<https://builtin.com/articles/3d-printed-house>>. Acesso em: 25 out. 2024.

BEDERINA, Madani; MAKHLOUFI, Zoubir; BOUZIANI, Tayeb. Effect of Limestone Fillers the Physic-Mechanical Properties of Limestone Concrete. **Physics Procedia**, Seventh International Conference on Material Sciences. v. 21, p. 28–34, 1 jan. 2011.

BOS, F. P. *et al.* The realities of additively manufactured concrete structures in practice. **Cement and Concrete Research**, v. 156, p. 106746, 1 jun. 2022.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **EN 197-1:2011 - Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements**. London, , 2011. Disponível em: <<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/64d327b1-d5ac-45e3-8b04-fafec9e0698e/en-197-1-2011>>. Acesso em: 20 maio. 2025

BUSWELL, R. A. *et al.* 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, SI : Digital concrete 2018. v. 112, p. 37–49, 1 out. 2018.

BUTKUTE, Karolina *et al.* Influence of Carbonated Bottom Slag Granules in 3D Concrete Printing. **Materials**, v. 16, n. 11, p. 4045, jan. 2023.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Comparison of the Silica Fume Content for High-Strength Concrete Production: Chemical Analysis of the Pozzolanic Reaction and Physical Behavior by Particle Packing. **Materials Research**, v. 23, p. e20200285, 9 out. 2020.

CARASEK, Helena. Argamassas. *In*: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: Geraldo C. Isaías, 2010. v. 1 p. 885–936.

CARASEK, Helena *et al.* Impressão 3D de materiais cimentícios: influência da aderência entre camadas nas propriedades mecânicas e na durabilidade. **CONCRETO & Construções**, v. XLIX, n. 103, p. 28–33, 2021.

CARVAJAL-ARANGO, David *et al.* Relationships between lean and sustainable construction: Positive impacts of lean practices over sustainability during construction phase. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 1322–1337, 10 out. 2019.

CHEN, Yidong *et al.* Extrusion-based 3D printing concrete with coarse aggregate: Printability and direction-dependent mechanical performance. **Construction and Building Materials**, v. 296, p. 123624, 16 ago. 2021.

CHOUGAN, Mehdi *et al.* Comparative analysis of ternary blended cement with clay and engineering brick aggregate for high-performance 3D printing. **Developments in the Built Environment**, v. 20, p. 100529, 1 dez. 2024.

CHRISTEN, Heidi *et al.* Phase change material infused recycled brick aggregate in 3D printed concrete. **Heliyon**, v. 8, n. 11, p. e11598, 1 nov. 2022.

CHU, S. H.; LI, L. G.; KWAN, A. K. H. Development of extrudable high strength fiber reinforced concrete incorporating nano calcium carbonate. **Additive Manufacturing**, v. 37, p. 101617, 1 jan. 2021.

ČÍTEK, David *et al.* Cementitious material development for additive fabrication. **Acta Polytechnica CTU Proceedings**, v. 47, p. 8–14, 16 maio 2024.

CITIZEN ROBOTICS. **First 3d printed home in Detroit**. Disponível em: <<https://www.citizenrobotics.org/projects/firsthome>>. Acesso em: 25 out. 2024.

COLYN, Markus; VAN ZIJL, Gideon; BABAFEMI, Adewumi John. Fresh and strength properties of 3D printable concrete mixtures utilising a high volume of sustainable alternative binders. **Construction and Building Materials**, v. 419, p. 135474, 15 mar. 2024.

COURARD, Luc; MICHEL, Frédéric. Limestone fillers cement based composites: Effects of blast furnace slags on fresh and hardened properties. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 439–445, 31 jan. 2014.

CUEVAS, Karla *et al.* 3D printable lightweight cementitious composites with incorporated waste glass aggregates and expanded microspheres – Rheological, thermal and mechanical properties. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 102718, 1 dez. 2021.

CUEVAS, Karla *et al.* Performance of normal-weight and lightweight 3D printed cementitious composites with recycled glass: Sorption and microstructural perspective. **Journal of Building Engineering**, v. 97, p. 110880, 15 nov. 2024.

CUI, Weijiu *et al.* Mechanical performance and permeability of low-carbon printable concrete. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 0, n. 0, p. 1–11, 2024.

DAHER, Jana *et al.* Recycling of Flash-Calcined Dredged Sediment for Concrete 3D Printing. **Buildings**, v. 12, n. 9, p. 1400, set. 2022.

DAHER, Jana *et al.* The Development of Soil-Based 3D-Printable Mixtures: A Mix-Design Methodology and a Case Study. **Buildings**, v. 13, n. 7, p. 1618, jul. 2023.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Adições minerais. In: **ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1 p. 261–309.

DING, Tao *et al.* Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118654, 10 jul. 2020a.

DING, Tao *et al.* Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand. **Cement and Concrete Composites**, v. 113, p. 103724, 1 out. 2020b.

DING, Tao *et al.* 3D printed concrete with sewage sludge ash: Fresh and hardened properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 148, p. 105475, 1 abr. 2024.

DIXON, Emily. **The world's longest 3D-printed concrete bridge is finished**. Disponível em: <<https://www.cnn.com/style/article/shanghai-3d-printed-bridge-scli-intl/index.html>>. Acesso em: 25 out. 2024.

DONG, Wenkui *et al.* Effects of silica fume on physicochemical properties and piezoresistivity of intelligent carbon black-cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 120399, 30 out. 2020.

DUAN, Zhenhua *et al.* Effect of metakaolin on the fresh and hardened properties of 3D printed cementitious composite. **Construction and Building Materials**, v. 350, p. 128808, 3 out. 2022.

DULAJ, A.; SALET, T. A. M.; LUCAS, S. S. Mechanical properties and self-sensing ability of graphene-mortar compositions with different water content for 3D printing applications. **Materials Today: Proceedings**, The International Conference on Additive Manufacturing for a Better World (AMBW 2022). v. 70, p. 412–417, 1 jan. 2022.

EL-SAYEGH, S.; ROMDHANE, L.; MANJIKIAN, S. A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 20, n. 2, p. 34, 10 mar. 2020.

FALLIANO, Devid; RESTUCCIA, Luciana; FERRO, Giuseppe Andrea. Biochar addition for 3DCP: a preliminary study. **Procedia Structural Integrity**, 2nd Mediterranean Conference on Fracture and Structural Integrity. v. 41, p. 699–703, 1 jan. 2022.

FEDEROWICZ, Karol *et al.* Development of 3D printed heavyweight concrete (3DPHWC) containing magnetite aggregate. **Materials & Design**, v. 233, p. 112246, 1 set. 2023.

FELTRIN, Cristina Silva; ISAIA, Geraldo Cechella. Propriedades do concreto com adição de filer calcário dolomítico. **Revista de Ciência e Inovação**, v. 3, n. 1, p. 58–71, 19 set. 2018.

FONSECA, Mariana; MATOS, Ana Mafalda. 3D Construction Printing Standing for Sustainability and Circularity: Material-Level Opportunities. **Materials**, v. 16, n. 6, p. 2458, jan. 2023.

GALVÃO, Jonhnatan Santiago da Silva *et al.* ESTUDO DO USO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA CARIRI NA PRODUÇÃO DE MISTURAS AUTOADENSÁVEIS. In: XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção**. São Paulo: 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/311534259_ESTUDO_DO_USO_DE_RESIDUO_DE_SERRAGEM_DE_PEDRA_CARIRI_NA_PRODUCAO_DE_MISTURAS_AUTOADENSAS_VEIS>. Acesso em: 21 maio. 2025

GARCIA, Varhen; MARIO, Christian. **Avaliação do impacto do uso de filer calcário como substituição ao cimento no comportamento reológico e retração de microconcretos**. text—[S.l.]: Universidade de São Paulo, 31 mar. 2017.

GIRIDHAR, Greeshma; PREM, Prabhat Ranjan; KUMAR, Shankar. Development of concrete mixes for 3D printing using simple tools and techniques. **Sādhanā**, v. 48, n. 1, p. 16, 18 jan. 2023.

GIWA, Ilerioluwa *et al.* Performance and macrostructural characterization of 3D printed steel fiber reinforced cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 369, p. 130593, 10 mar. 2023.

GOU, Hongxiang *et al.* Combined printable and mechanical analysis of 3D-printed green high-strength, lightweight engineered cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 149, p. 105506, 1 maio 2024.

GUAMÁN-RIVERA, Robert *et al.* Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts. **Buildings**, v. 12, n. 2, p. 229, fev. 2022.

HAMBACH, Manuel; RUTZEN, Matthias; VOLKMER, Dirk. Chapter 5 - Properties of 3D-Printed Fiber-Reinforced Portland Cement Paste. *In*: SANJAYAN, Jay G.; NAZARI, Ali; NEMATOLLAHI, Behzad (Orgs.). **3D Concrete Printing Technology**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2019. p. 73–113.

HAN, Yilong *et al.* Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123884, 1 jan. 2021.

HANRATTY, Niall; KHAN, Mehran; MCNALLY, Ciaran. The Role of Different Clay Types in Achieving Low-Carbon 3D Printed Concretes. **Buildings**, v. 14, n. 7, p. 2194, jul. 2024.

HOJATI, Maryam *et al.* 3D-printable quaternary cementitious materials towards sustainable development: Mixture design and mechanical properties. **Results in Engineering**, v. 13, p. 100341, 1 mar. 2022.

HOU, Shaodan *et al.* Fresh properties of 3D printed mortar with recycled powder. **Construction and Building Materials**, v. 309, p. 125186, 22 nov. 2021.

HOU, Shaodan *et al.* Rheology of fiber-reinforced mortar for 3D printing construction: Effect of recycled hybrid powder and polyethylene fiber. **Construction and Building Materials**, v. 447, p. 138126, 11 out. 2024.

HUNBUS, Ahmed; ALMANGOUR, Bandar. A Critical Review of Construction Using 3D Printing Technology. **ASME Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities**, v. 4, n. 2, p. 020801, 1 maio 2023.

IBRAHIM, Iman *et al.* 3D Printing in Sustainable Buildings: Systematic Review and Applications in the United Arab Emirates. **Buildings**, v. 12, n. 10, p. 1703, out. 2022.

IBRAHIM, Kamoru A.; VAN ZIJL, Gideon P. A. G.; BABAFEMI, Adewumi J. Influence of limestone calcined clay cement on properties of 3D printed concrete for sustainable construction. **Journal of Building Engineering**, v. 69, p. 106186, 15 jun. 2023.

INTERNATIONAL CODE COUNCIL – ICC. **Acceptance Criteria for 3D-Printed Concrete and Mortar Mixtures – ICC-ES AC509:2023**. 2023. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/81177.html>>. Acesso em: 21 fev. 2025.

ISAIA, Gustavo de Aguiar. O Filer Calcário no Concreto: Uma Revisão. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 15, n. 12, p. 132–172, 1 jun. 2021.

ISO/ASTM 52900:2021. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/74514.html>>. Acesso em: 24 out. 2024.

ISO/ASTM 52939:2023. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/81177.html>>. Acesso em: 21 fev. 2025.

ITIM, Ahmed; EZZIANE, Karim; KADRI, El-Hadj. Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3603–3609, 1 ago. 2011.

JALAEI, Farzad; JALAEI, Farnaz; MOHAMMADI, Sepehr. An integrated BIM-LEED application to automate sustainable design assessment framework at the conceptual stage of building projects. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, p. 101979, 1 fev. 2020.

KASZYŃSKA, Maria; SKIBICKI, Szymon; HOFFMANN, Marcin. 3D Concrete Printing for Sustainable Construction. **Energies**, v. 13, n. 23, p. 6351, jan. 2020.

KAUSHIK, Sandipan *et al.* Influence of nanoclay on the fresh and rheological behaviour of 3D printing mortar. **Materials Today: Proceedings**, 3rd International Congress on Materials & Structural Stability. v. 58, p. 1063–1068, 1 jan. 2022.

KAUSHIK, Sandipan *et al.* Optimisation of Mix Proportion of 3D Printable Mortar Based on Rheological Properties and Material Strength Using Factorial Design of Experiment. **Materials**, v. 16, n. 4, p. 1748, jan. 2023a.

KAUSHIK, Sandipan *et al.* Effect of nanoclay on the printability of extrusion-based 3D printable mortar. **Nanoworld Journal**, v. 9, n. S2, p. S53–S61, 22 set. 2023b.

KAZEMIAN, Ali *et al.* Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 639–647, 1 ago. 2017.

KHATIB, Jamal *et al.* Volume Stability of Cement Paste Containing Limestone Fines. **Buildings**, v. 11, n. 8, 18 ago. 2021.

KHOKHAR, M. I. A. *et al.* Mix design of concrete with high content of mineral additions: Optimisation to improve early age strength. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 5, p. 377–385, 1 maio 2010.

KILIC, Ugur *et al.* Effects of viscosity modifying admixture and nanoclay on fresh and rheo-viscoelastic properties and printability characteristics of cementitious composites. **Journal of Building Engineering**, v. 70, p. 106355, 1 jul. 2023.

KIM, Kwan Kyu *et al.* Strength Development Characteristics of SBR-Modified Cementitious Mixtures for 3-Dimensional Concrete Printing. **Sustainability**, v. 11, n. 15, p. 4164, jan. 2019.

KLYUEV, Sergey *et al.* Fresh and mechanical properties of low-cement mortars for 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 338, p. 127644, 4 jul. 2022.

LAPORTA, Taís. **Casas impressas em 3D evoluem e entram no radar de construtoras no Brasil.** **InfoMoney**, 7 jun. 2024. Disponível em: <<https://www.infomoney.com.br/business/casas-impressas-em-3d-evoluem-e-entram-no-radar-de-construtoras-no-brasil/>>. Acesso em: 25 out. 2024

LASLETT, Dean; URMEE, Tania. The effect of aggregation on city sustainability rankings. **Ecological Indicators**, v. 112, p. 106076, 1 maio 2020.

LE, T. T. *et al.* Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and Structures**, v. 45, n. 8, p. 1221–1232, 1 ago. 2012.

LESOVIK, Valery *et al.* 3D-Printed Mortars with Combined Steel and Polypropylene Fibers. **Fibers**, v. 9, n. 12, p. 79, dez. 2021.

LESOVIK, Valery *et al.* Improving the Performances of a Mortar for 3D Printing by Mineral Modifiers. **Buildings**, v. 12, n. 8, p. 1181, ago. 2022.

LI, Leo Gu *et al.* Adding Glass Fibers to 3D Printable Mortar: Effects on Printability and Material Anisotropy. **Buildings**, v. 13, n. 9, p. 2295, set. 2023a.

LI, Te; TIER, Laire. Analysis of the effect of glass powder on the printability of cement-based materials for 3D printing using ImageJ. **MRS Communications**, v. 13, n. 6, p. 1416–1422, 1 dez. 2023.

LI, Yeou-Fong *et al.* Mechanical Properties of 3D-Printed Carbon Fiber-Reinforced Cement Mortar. **Fibers**, v. 11, n. 12, p. 109, dez. 2023b.

LIM, S. *et al.* Developments in construction-scale additive manufacturing processes. **Automation in Construction**, v. 21, p. 262–268, 1 jan. 2012.

LIU, Chao *et al.* 3D printing concrete with recycled sand: The influence mechanism of extruded pore defects on constitutive relationship. **Journal of Building Engineering**, v. 68, p. 106169, 1 jun. 2023a.

LIU, Junli *et al.* 3D-printed concrete with recycled glass: Effect of glass gradation on flexural strength and microstructure. **Construction and Building Materials**, v. 314, p. 125561, 3 jan. 2022.

LIU, Junli *et al.* 3D printing of cementitious composites with seashell particles: Mechanical and microstructural analysis. **Construction and Building Materials**, v. 438, p. 136939, 9 ago. 2024.

LIU, Junli; SETUNGE, Sujeeva; TRAN, Phuong. 3D concrete printing with cement-coated recycled crumb rubber: Compressive and microstructural properties. **Construction and Building Materials**, v. 347, p. 128507, 12 set. 2022.

LIU, Zhenbang *et al.* Effect of Nanostructured Silica Additives on the Extrusion-Based 3D Concrete Printing Application. **Journal of Composites Science**, v. 7, n. 5, p. 191, maio 2023b.

LONG, Wu-Jian *et al.* Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 118054, 1 dez. 2019.

MA, Guowei *et al.* Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development. **Cement and Concrete Research**, v. 156, p. 106774, 1 jun. 2022.

MA, Guowei; LI, Zhijian; WANG, Li. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 613–627, 20 fev. 2018.

MARSH, Alastair T. M.; VELENTURF, Anne P. M.; BERNAL, Susan A. Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration. **Journal of Cleaner Production**, v. 362, p. 132486, 15 ago. 2022.

MARTINELLI, Juliana. **Brasil constrói sua primeira casa modelo impressa em 3D!** Disponível em: <<https://www.inovahouse3d.com.br/post/brasil-constrói-sua-primeira-casa-modelo-impressa-em-3d>>. Acesso em: 25 out. 2024.

MARTINS, Ben-Hur Raíra *et al.* INFLUÊNCIA DO USO DE ADITIVO INCORPORADOR DE AR EM ARGAMASSA AUTOADENSÁVEL. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, v. 13, p. 571–580, 2023.

MARTINS, Juliana Vieira *et al.* Influence of replacing Portland cement with three different concrete sludge wastes. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124519, 11 out. 2021.

MERCÊS, Uiliana Márcia da Silva. Produção de concreto autoadensável com uso de fíler calcário de resíduo de serragem de Pedra Cariri. 20 mar. 2017.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, Sílvia Maria de Souza. Avaliação de argamassas com entulhos reciclados por procedimentos racionais de dosagem. **Anais**, 1999.

MOHAMMAD, Malek; MASAD, Eyad; AL-GHAMDI, Sami G. 3D Concrete Printing Sustainability: A Comparative Life Cycle Assessment of Four Construction Method Scenarios. **Buildings**, v. 10, n. 12, p. 245, dez. 2020.

MOHAN, Manu K. *et al.* Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content. **Cement and Concrete Research**, v. 139, p. 106258, 1 jan. 2021.

MOLITCH-HOU, Michael. **ICON's First 3D Printed Home Opens for Tours at Wolf Ranch, Texas**. Disponível em: <<https://3dprint.com/302065/icons-first-3d-printed-home-opens-for-tours-at-wolf-ranch-texas/>>. Acesso em: 25 out. 2024.

MOURA, Washington Almeida; LEITE, Mônica Batista; BASTOS, Adolfo Jacques Oliveira. Avaliação do uso de resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 1, p. 7–24, 11 mar. 2013.

MUHAMMAD, Aisha *et al.* A systematic and bibliometric analysis on 3D printing published in scientific citation index-expanded indexed journals between 1999 and 2019. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 1739–1743, 2021.

MUTHUKRISHNAN, Shravan *et al.* Fresh Properties of Cementitious Materials Containing Rice Husk Ash for Construction 3D Printing. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 8, p. 04020195, 1 ago. 2020.

NADIM, Farhan *et al.* Effect of silica fume on the microstructural and mechanical properties of concrete made with 100% recycled aggregates. **Revista de la construcción**, v. 23, n. 2, p. 413–435, ago. 2024.

NATANZI, Atteyeh S.; MCNALLY, Ciaran. Experimental investigation of low carbon 3D printed concrete. **Transportation Research Procedia**, TRA Lisbon 2022 Conference Proceedings Transport Research Arena (TRA Lisbon 2022), 14th-17th November 2022, Lisboa, Portugal. v. 72, p. 3696–3702, 1 jan. 2023.

NIU, Geng *et al.* Preparation and performance analysis of 3D printed lightweight EPS concrete: Insights from the excess paste theory. **Cement and Concrete Composites**, v. 149, p. 105509, 1 maio 2024.

OGURA, Hiroki; NERELLA, Venkatesh Naidu; MECHTCHERINE, Viktor. Developing and Testing of Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC) in the Context of 3D-Printing. **Materials**, v. 11, n. 8, p. 1375, ago. 2018.

OOSTHUIZEN, Jandré Daniel; BABAFEMI, Adewumi John; WALLS, Richard Shaun. 3D-printed recycled plastic eco-aggregate (Resin8) concrete. **Construction and Building Materials**, v. 408, p. 133712, 8 dez. 2023.

PACHECO-MENOR, María Concepción; FLORES-COLEN, Inês; DE BRITO, Jorge. The use of stone waste as fine aggregate or cement replacement in cement-based mortars: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 106, p. 112503, 15 jul. 2025.

PANDA, Biranchi *et al.* The Effect of Material Fresh Properties and Process Parameters on Buildability and Interlayer Adhesion of 3D Printed Concrete. **Materials**, v. 12, n. 13, p. 2149, jan. 2019a.

PANDA, Biranchi *et al.* Improving the 3D printability of high volume fly ash mixtures via the use of nano attapulgite clay. **Composites Part B: Engineering**, v. 165, p. 75–83, 15 maio 2019b.

PANESAR, Daman K.; ZHANG, Runxiao. Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118866, 10 ago. 2020.

PANTIRU, Alexandru; LUCA, Bogdan Ionel; BARBUTA, Marinela. EXPERIMENTAL STUDY OF MIXTURE PROPORTIONS AND FRESH PROPERTIES OF CONCRETE WITH FLY ASH AND SILICA FUME AS A REPLACEMENT FOR CEMENT FOR 3D PRINTING. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 22, n. 9, p. 1647–1653, 2023.

PAOLINI, Alexander; KOLLMANNSEBERGER, Stefan; RANK, Ernst. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. **Additive Manufacturing**, v. 30, p. 100894, dez. 2019.

PASCO, Jubert; LEI, Zhen; ARANAS, Clodualdo. Additive Manufacturing in Off-Site Construction: Review and Future Directions. **Buildings**, v. 12, n. 1, p. 53, 6 jan. 2022.

PAULINO, Rafaella Salvador; TORALLES, Berenice Martins. PROCEDIMENTO PARA DOSAGEM DA ARGAMASSA AUTOADENSÁVEL COM FÍLER CALCÁRIO. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 11, n. 4, 2019.

PESSOA, S. *et al.* 3D printing in the construction industry - A systematic review of the thermal performance in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 141, p. 110794, 1 maio 2021.

PHAM, Luong; TRAN, Phuong; SANJAYAN, Jay. Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118785, 30 jul. 2020.

PIMENTEL TINOCO, Matheus *et al.* The use of rice husk particles to adjust the rheological properties of 3D printable cementitious composites through water sorption. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 130046, 15 fev. 2023.

PINTOS, Paula. **Casa Impressa em 3D com Tecnologia TECLA / Mario Cucinella Architects**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/960943/casa-impressa-em-3d-com-tecnologia-tecla-mario-cucinella-architects>>. Acesso em: 25 out. 2024.

POURMOHAMMADI, Hadi. **Transforming Construction: 2024 Guide to 3D Printing in Construction with 6 Detailed Case Studies - Neuroject**. , 22 jun. 2023. Disponível em: <<https://neuroject.com/3d-printing-in-construction/>>. Acesso em: 25 out. 2024

PURCHASE, Callun Keith *et al.* Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, Challenges, and Benefits. **Materials**, v. 15, n. 1, p. 76, jan. 2022.

QIAN, Hao *et al.* Utilization of recycled construction powder in 3D concrete printable materials through particle packing optimization. **Journal of Building Engineering**, v. 61, p. 105236, 1 dez. 2022.

QUARCIONI, Valdecir Angelo *et al.* Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 175–187, 14 dez. 2009.

QUEIROZ, Brendhy Torres. AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA CARIRI COMO AGREGADO MIÚDO SOBRE O COMPORTAMENTO DE CAA. **Anais dos Seminários de Iniciação Científica**, n. 21, 1 nov. 2017.

QUINTELLA, Ivvy Pedrosa Cavalcante Pessoa; FLORENCIO, Eduardo Quintella. Impressão 3D: como essa tecnologia vem impactando atualmente a construção civil? **CONCRETO & Construções**, v. LI, n. 114, p. 32–36, 2024.

RAHMAN, Nushrat. **Michigan's 1st 3D printed home is in Detroit — and almost complete**. Disponível em: <<https://www.freep.com/story/news/local/michigan/detroit/2023/10/02/3d-printed-home-detroit-michigan-citizen-robotics/70930324007/>>. Acesso em: 25 out. 2024.

RAMA KRISHANA, A. K.; MALLIK, Mainak; MAITY, Damodar. Developing an appropriate concrete mix for 3D concrete printing. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 9, n. 2, p. 104, 6 jun. 2024.

RANGEL, C. M. *et al.* 3D printing lightweight mortars with cork to improve thermal efficiency in buildings. **Construction and Building Materials**, v. 425, p. 136008, 26 abr. 2024.

REGINATO, Luan *et al.* **EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR CALCÁRIO CALCÍFICO EM ARGAMASSAS DE REPARO: PROPRIEDADES MECÂNICAS E RETRAÇÃO POR SECAGEM**. . XXXIV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. **Anais...** . Foz do Iguaçu, 2023.

REHMAN, Atta Ur; LEE, Sang-Min; KIM, Jung-Hoon. Use of municipal solid waste incineration ash in 3D printable concrete. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 142, p. 219–228, 1 out. 2020.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael *et al.* 3D Printing of Hybrid Cements Based on High Contents of Powders from Concrete, Ceramic and Brick Waste Chemically Activated with Sodium Sulphate (Na₂SO₄). **Sustainability**, v. 15, n. 13, p. 9900, jan. 2023a.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael *et al.* 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. **Automation in Construction**, v. 146, p. 104693, 1 fev. 2023b.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael *et al.* Utilization of powders and fine aggregates from the recycling of construction and demolition waste in the 3D printing of Portland-based cementitious materials. **Cleaner Materials**, v. 11, p. 100234, 1 mar. 2024.

RUBIO, M.; SONEBI, M.; AMZIANE, S. Fresh and rheological properties of 3D printing bio-cementbased materials. **Academic Journal of Civil Engineering**, v. 35, n. 2, p. 283–290, 21 jun. 2017.

ŞAHİN, Hatice Gizem; AKGÜMÜŞ, Fatih Eren; MARDANI, Ali. Mechanical and rheological properties of fiber-reinforced 3D printable concrete; in terms of fiber content and aspect ratio. **Structural Concrete**, v. n/a, n. n/a, 2024.

ŞAHİN, Hatice Gizem; MARDANI, Ali; MARDANI, Naz. Performance Requirements and Optimum Mix Proportion of High-Volume Fly Ash 3D Printable Concrete. **Buildings**, v. 14, n. 7, p. 2069, jul. 2024.

SAKIN, Mehmet; KIROGLU, Yusuf Caner. 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. **Energy Procedia**, Sustainability in Energy and Buildings 2017: Proceedings of the Ninth KES International Conference, Chania, Greece, 5-7 July 2017. v. 134, p. 702–711, 1 out. 2017.

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

SAMBUCCI, Matteo; VALENTE, Marco. Influence of Waste Tire Rubber Particles Size on the Microstructural, Mechanical, and Acoustic Insulation Properties of 3D-Printable Cement Mortars. **Civil Engineering Journal**, v. 7, n. 6, p. 937–952, 1 jun. 2021.

SANTOS, Gustavo Soares. NOVAS TECNOLOGIAS APLICADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: CONCEITOS DA INDÚSTRIA 4.0. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 8, 5 dez. 2022.

SELMO, Sílvia Maria de Souza. **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachada dos edifícios**. Dissertação (Mestrado)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 1989.

SERGIS, Vasileios; OUELLET-PLAMONDON, Claudiane M. D-optimal design of experiments applied to 3D high-performance concrete printing mix design. **Materials & Design**, v. 218, p. 110681, 1 jun. 2022.

SHOAEI, Parham *et al.* Comparative analysis of 3D printing of Portland cement mortars with hydroxypropyl methylcellulose and microfibrillated cellulose as viscosity modifying agents. **Materials & Design**, v. 244, p. 113124, 1 ago. 2024.

SIKA. **Sika Brasil constrói casa de concreto impressa em 3D no Rio Grande do Sul**. Disponível em: <<https://bra.sika.com/pt/noticias/sika-brasil-constro-i-casa-de-concreto-impressa-em-3d-no-rio-grande-do-sul.html>>. Acesso em: 25 out. 2024.

SIKA. **3D Concrete Printing**. Disponível em: <<https://www.sika.com/en/knowledge-hub/3d-concrete-printing.html>>. Acesso em: 20 maio. 2025.

SILVA, Achilles Dias Alves da. **Aproveitamento de rejeito de calcário do Cariri Cearense na formulação de argamassa**. masterThesis. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/4998>>. Acesso em: 21 maio. 2025.

SILVA, Maicon Douglas Leles da *et al.* Uma análise da manufatura aditiva aplicada ao planejamento urbano sustentável: revisão de aplicações, desafios e potencialidades. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 7, p. 328–342, 15 jul. 2021.

SILVA, Guilherme Tavares de Melo *et al.* Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão / Construction and demolition waste in concrete technology: a review. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 46883–46896, 15 jul. 2020.

SINGH, Amardeep *et al.* Utilization of antimony tailings in fiber-reinforced 3D printed concrete: A sustainable approach for construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 408, p. 133689, 8 dez. 2023.

SKIBICKI, Szymon *et al.* Early-Age Mechanical Properties of 3D-Printed Mortar with Spent Garnet. **Materials**, v. 15, n. 1, p. 100, jan. 2022a.

SKIBICKI, Szymon *et al.* The effect of using recycled PET aggregates on mechanical and durability properties of 3D printed mortar. **Construction and Building Materials**, v. 335, p. 127443, 13 jun. 2022b.

SKIBICKI, Szymon *et al.* Potential of Reusing 3D Printed Concrete (3DPC) Fine Recycled Aggregates as a Strategy towards Decreasing Cement Content in 3DPC. **Materials**, v. 17, n. 11, p. 2580, jan. 2024.

SLAVCHEVA, Galina; BRITVINA, E.; SHVEDOVA, M. FRESH PROPERTIES AND MIX DESIGN FOR 3D-PRINTABLE DECORATIVE CONCRETE. **Russian Journal of Building Construction and Architecture**, p. 72–81, 19 nov. 2021.

SOARES, Augusto Cezar Maciel *et al.* Comprehensive design methodology for 3D printing mortars. **Construction and Building Materials**, v. 401, p. 132804, 19 out. 2023.

SONEBI, M. *et al.* Effect of Red Mud, Nanoclay, and Natural Fiber on Fresh and Rheological Properties of Three-Dimensional Concrete Printing. 2021.

SOUSA, Luis Henrique Oliveira de; MORAIS, Dirceu Medeiros de; AMANCIO, Felipe Alves. EFEITO DO ADITIVO INCORPORADOR DE AR NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO. **Revista CIATEC-UPF**, v. 11, n. 2, p. 36–44, 18 jun. 2019.

SOUZA, Eduardo. **O futuro é agora: casas impressas em 3D começam a ser habitadas na Holanda**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/961076/o-futuro-e-agora-casas-impressas-em-3d-comecam-a-ser-habitadas-na-holanda>>. Acesso em: 25 out. 2024.

SPURINA, Ella *et al.* The Effects of Air-Entraining Agent on Fresh and Hardened Properties of 3D Concrete. **Journal of Composites Science**, v. 6, n. 10, p. 281, out. 2022.

SUKONTASUKKUL, Piti *et al.* Eco-friendly 3D Printing Mortar with Low Cement Content: Investigation on Printability and Mechanical Properties. **Civil Engineering Journal**, v. 10, n. 3, p. 808–823, 1 mar. 2024.

SUN, Bochao *et al.* Sustainable 3D printed mortar with CO₂ pretreated recycled fine aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 134, p. 104800, 1 nov. 2022.

TARHAN, Yeşim; ŞAHİN, Remzi. Fresh and Rheological Performances of Air-Entrained 3D Printable Mortars. **Materials**, v. 14, n. 9, p. 2409, jan. 2021.

TEGL, Randers. **3D Printing with Low-Carbon Concrete: Reducing CO₂ Emissions and Material Waste**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/979145/3d-printing-with-low-carbon-concrete-reducing-co2-emissions-and-material-waste>>. Acesso em: 25 out. 2024.

TING, Guan Heng Andrew *et al.* Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 21, n. 4, p. 994–1003, 1 jul. 2019.

TRAN, Nhi *et al.* Eco-Friendly 3D-Printed Concrete Using Steel Slag Aggregate: Buildability, Printability and Mechanical Properties. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 18, n. 1, p. 66, 22 set. 2024.

TU, Haidong *et al.* Recent advancements and future trends in 3D concrete printing using waste materials. **Developments in the Built Environment**, v. 16, p. 100187, 1 dez. 2023.

UNGUREANU, Dragoş *et al.* Microstructure and Mechanical Properties of Cost-Efficient 3D Printed Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers. **Buildings**, v. 13, n. 11, p. 2813, nov. 2023.

VAN DER PUTTEN, Jolien *et al.* Development of 3D Printable Cementitious Composites with the Incorporation of Polypropylene Fibers. **Materials**, v. 14, n. 16, p. 4474, jan. 2021.

VAN OVERMEIR, A. L. *et al.* 3D printable strain hardening cementitious composites (3DP-SHCC), tailoring fresh and hardened state properties. **Construction and Building Materials**, v. 403, p. 132924, 3 nov. 2023.

VAN OVERMEIR, Anne Linde *et al.* Design and analyses of printable strain hardening cementitious composites with optimized particle size distribution. **Construction and Building Materials**, v. 324, p. 126411, 21 mar. 2022.

VERAS, Vinícius Capistrano de Paiva *et al.* Impressão 3D e industrialização na construção: uma revisão sistemática de literatura. **WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS**, v. 4, 24 ago. 2023.

VERGARA, Luis A.; COLORADO, Henry A. Additive manufacturing of Portland cement pastes with additions of kaolin, superplastificant and calcium carbonate. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118669, 10 jul. 2020.

WANG, Bolin *et al.* Printable and Mechanical Performance of 3D Printed Concrete Employing Multiple Industrial Wastes. **Buildings**, v. 12, n. 3, p. 374, mar. 2022a.

WANG, Li *et al.* Cementitious composites blending with high belite sulfoaluminate and medium-heat Portland cements for largescale 3D printing. **Additive Manufacturing**, v. 46, p. 102189, 1 out. 2021a.

WANG, Li *et al.* Freeze-thaw resistance of 3D-printed composites with desert sand. **Cement and Concrete Composites**, v. 133, p. 104693, 1 out. 2022b.

WANG, Xiangyu; KHALIL, Abdullah; CELIK, Kemal. Three-Dimensional Printability of White Portland Cement Containing Cenospheres. 2021.

WANG, Yu *et al.* The Synergistic Effect of Ester-Ether Copolymerization Thixo-Tropic Superplasticizer and Nano-Clay on the Buildability of 3D Printable Cementitious Materials. **Materials**, v. 14, n. 16, p. 4622, jan. 2021b.

WANGLER, Timothy *et al.* Digital Concrete: Opportunities and Challenges. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 67–75, 31 out. 2016.

WENG, Yiwei *et al.* Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 600–610, 28 fev. 2018.

WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P.; SALET, T. A. M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. **Cement and Concrete Research**, v. 106, p. 103–116, 1 abr. 2018.

WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P.; SALET, T. A. M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. **Cement and Concrete Research**, v. 119, p. 132–140, 1 maio 2019.

WU, Peng *et al.* Developing a conceptual framework to improve the implementation of 3D printing technology in the construction industry. **Architectural Science Review**, v. 61, n. 3, p. 133–142, 4 maio 2018.

XIONG, Baocheng *et al.* Optimization of fiber reinforced lightweight rubber concrete mix design for 3D printing. **Journal of Building Engineering**, v. 88, p. 109105, 1 jul. 2024.

XU, Nuoyan *et al.* Tensile performance of 3D-printed Strain-Hardening Cementitious Composites (SHCC) considering material parameters, nozzle size and printing pattern. **Cement and Concrete Composites**, v. 132, p. 104601, 1 set. 2022a.

XU, Ping *et al.* Effect of nano-silica sol dosage on the properties of 3D-printed concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 80, p. 108090, 1 dez. 2023a.

XU, Wen *et al.* Study on printability of 3D printing carbon fiber reinforced eco-friendly concrete: Characterized by fluidity and consistency. **Case Studies in Construction Materials**, v. 21, p. e03589, 1 dez. 2024.

XU, Zhuoyue *et al.* Effect of FA and GGBFS on compressive strength, rheology, and printing properties of cement-based 3D printing material. **Construction and Building Materials**, v. 339, p. 127685, 11 jul. 2022b.

XU, Zhuoyue *et al.* Effects of additives on the mechanical properties, rheology, and printing properties of Pcc-based 3DPMs. **Ceramics International**, v. 49, n. 17, Part A, p. 28354–28368, 1 set. 2023b.

XU, Zhuoyue *et al.* Mix design and 3D printing correlation performance of Pcc-based 3DPM. **Composite Structures**, v. 320, p. 117229, 15 set. 2023c.

YAN, Ruizhen *et al.* Comparative evaluation of the applicability of 3D printing mortar with different waste powders. **Construction and Building Materials**, v. 443, p. 137825, 13 set. 2024.

YANG, Yekai *et al.* Mechanical anisotropy of ultra-high performance fibre-reinforced concrete for 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 125, p. 104310, 1 jan. 2022.

YE, Junhong *et al.* Development of 3D printable engineered cementitious composites with incineration bottom ash (IBA) for sustainable and digital construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 422, p. 138639, 10 out. 2023.

YU, Kequan *et al.* 3D-printable engineered cementitious composites (3DP-ECC): Fresh and hardened properties. **Cement and Concrete Research**, v. 143, p. 106388, maio 2021.

ZAFAR, Muhammad Saeed; BAKHSHI, Amir; HOJATI, Maryam. Printability and shape fidelity evaluation of self-reinforced engineered cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 408, p. 133676, 8 dez. 2023.

ZHANG, Chao *et al.* Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 103406, 1 nov. 2019a.

ZHANG, Hanghua; XIAO, Jianzhuang. Plastic shrinkage and cracking of 3D printed mortar with recycled sand. **Construction and Building Materials**, v. 302, p. 124405, 4 out. 2021.

ZHANG, Yifan; ASLANI, Farhad. Development of fibre reinforced engineered cementitious composite using polyvinyl alcohol fibre and activated carbon powder for 3D concrete printing. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124453, 11 out. 2021.

ZHANG, Yu *et al.* Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 263–271, 20 jun. 2018.

ZHANG, Yu *et al.* Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 278–285, 20 mar. 2019b.

ZHAO, Yu *et al.* The Influence of Polypropylene Fiber on the Working Performance and Mechanical Anisotropy of 3D Printing Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 19, n. 12, p. 1264–1274, 2021.

ZHOU, Longfei *et al.* Durability and hardened properties of 3D printed concrete containing bauxite tailings. **Materials Today Sustainability**, v. 25, p. 100704, 1 mar. 2024.

ZHU, Binrong *et al.* Development of 3D printable engineered cementitious composites with ultra-high tensile ductility for digital construction. **Materials & Design**, v. 181, p. 108088, 5 nov. 2019.

ZHU, LingLi *et al.* Effects of composite cementation system on rheological and working performances of fresh 3D-printable engineered cementitious composites. **Journal of Building Engineering**, v. 65, p. 105801, 15 abr. 2023.

ZHU, Ronghua *et al.* Eco-friendly 3D printed concrete with fine aggregate replacements: Fabrication, characterization and machine learning prediction. **Construction and Building Materials**, v. 413, p. 134905, 26 jan. 2024.

ZOU, Mengtong *et al.* Evaluation and control of printability and rheological properties of 3D-printed rubberized concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 80, p. 107988, 1 dez. 2023.

APÊNDICE A - Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

A seguir, apresentam-se a metodologia adotada e as informações referentes aos dados bibliométricos levantados durante a realização da Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Essa etapa teve como propósito organizar, selecionar e analisar, de forma criteriosa e estruturada, os estudos disponíveis sobre formulações de argamassas aplicadas à tecnologia de impressão 3D na construção civil.

1. METODOLOGIA DA RSL

A seguir, são apresentados os principais passos adotados para a realização desta revisão sistemática da literatura. O processo envolveu a busca e seleção de artigos relevantes, com foco na identificação das formulações mais eficientes e seus resultados.

1.1. DEFINIÇÃO DO PROTOCOLO DE PESQUISA

O primeiro passo para a realização desta revisão sistemática foi a elaboração de um protocolo que definisse os parâmetros de análise, como o objetivo da revisão, as questões de pesquisa, os critérios de inclusão e exclusão dos estudos, as bases de dados a serem utilizadas e a estratégia de busca, além dos métodos de análise e interpretação dos resultados.

O objetivo central deste protocolo foi levantar artigos científicos publicados em periódicos internacionais, em língua portuguesa ou inglesa, sobre traços de argamassas para impressão 3D, buscando dados sobre o desenvolvimento e testes de composições que possam orientar a aplicação na indústria de impressão 3D ou subsidiar o desenvolvimento de novos traços. A principal questão de pesquisa foi definida da seguinte forma: *Quais são os principais traços de argamassas para impressão 3D encontrados na literatura, e quais aditivos e adições são comumente utilizados?*

1.2. BUSCA NAS BASES DE DADOS

Para a estratégia de busca, adotou-se uma abordagem ampla nas bases de dados selecionadas para garantir que estudos pertinentes fossem identificados no processo de triagem. As bases escolhidas foram Engineering Village, ScienceDirect, Scopus e Web of

Science, devido à sua ampla cobertura em publicações científicas nas áreas de engenharia civil e materiais de construção.

A busca foi realizada em outubro de 2024 e incluiu combinações de palavras-chave como "3D printing", "mix ratio", e "mortar" e seus similares. Foram aplicados operadores booleanos "AND" e "OR" para refinar os resultados e garantir a inclusão de artigos relevantes. A *string* de busca inicial foi:

"(3D print OR additive manufacturing OR 3D extru*) AND (mortar OR cementitious materials OR concrete) AND (mix ratio OR composition OR formulation OR design)"*.

Dada a quantidade excessiva de artigos não aderentes na base Engineering Village, utilizou-se a opção de "controle de vocabulário" da base, refinando com os termos "3D printers", "3D printing", e "manufacture". Na ScienceDirect, devido às limitações no uso de operadores booleanos e palavras truncadas, foram testadas quatro variações da *string*, com a versão final definida como:

"(3D printing OR additive manufacturing OR 3D extrusion) AND (mortar OR cementitious materials OR concrete) AND (mix ratio OR composition OR design)".

As buscas foram realizadas nos campos de "título, resumo e palavras-chave", ou equivalentes, em cada base de dados, sendo filtradas para obter resultados exclusivamente de artigos publicados em periódicos.

1.3. TRIAGEM DOS ARTIGOS

Foi realizada a triagem dos artigos para selecionar apenas aqueles que atendiam aos critérios definidos. Primeiramente, foram analisados os títulos e resumos para eliminar estudos irrelevantes, utilizando os critérios de inclusão e exclusão definidos. Adicionalmente, verificou-se duplicidades entre as bases. A ferramenta Parsif.al foi utilizada para auxiliar na triagem preliminar.

Foram selecionados os artigos que atendiam pelo menos um dos critérios de inclusão estabelecidos:

1. Artigos sobre formulação ou otimização de traços de argamassa para impressão 3D.
2. Estudos que avaliam propriedades mecânicas, reológicas, trabalhabilidade e/ou parâmetros de impressão de argamassas para impressão 3D.

Paralelamente, foram excluídos os artigos que se enquadravam em um ou mais dos critérios de exclusão a seguir:

1. Não abordam especificamente impressão 3D de argamassas.
2. Focam em materiais cimentantes alternativos, sem uso de cimento Portland.
3. Tratam a argamassa de forma genérica, sem detalhar formulações.
4. Envolvem outros materiais ou hardware/software sem experimentos com argamassa.
5. Limitam-se a simulações teóricas/computacionais sem experimentação prática.
6. Focam em aplicações sem análise de composição.
7. Tratam outros métodos de manufatura aditiva, não aplicáveis a argamassas.
8. Discutem impacto energético/ambiental sem detalhes da formulação.
9. Analisam viabilidade econômica sem aspectos técnicos da argamassa.
10. Usam impressão 3D de argamassa combinada com estruturas de suporte, como cabos de aço.

Após essa triagem, procedeu-se à busca das versões completas dos estudos selecionados, passando por duas etapas adicionais de exclusão: (i) eliminação por disponibilidade, excluindo artigos sem acesso integral; e (ii) eliminação por leitura completa, descartando os que, após análise detalhada, não atendiam aos objetivos do estudo.

1.4. EXTRAÇÃO, ORGANIZAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Com os artigos selecionados, os dados foram extraídos e organizados em uma planilha estruturada para facilitar a análise. Os dados iniciais incluíram informações bibliométricas, como:

- Base de dados de origem;
- Ano de publicação;
- Instituição responsável pela pesquisa;
- País da instituição de pesquisa;
- Autores;
- Palavras-chave.

Em seguida, foram coletados dados específicos sobre o conteúdo dos artigos, tais como:

- Proporções de materiais usados na argamassa (cimento, areia, água e agregados).
- Tipos de adições (fibras, cinzas, sílica, etc.).
- Tipos de aditivos (superplastificantes, retardadores, agentes de cura, etc.).

- Propriedades avaliados (tempo de trabalhabilidade, resistência mecânica, etc.).

Cada dado foi categorizado para permitir uma análise comparativa. Realizou-se uma análise descritiva, identificando as proporções mais frequentes de materiais, adições e aditivos comuns, e variações relevantes entre os estudos. Também foi conduzida uma análise crítica, examinando as justificativas dos autores para escolhas de traços e aditivos, relacionando-as às exigências da impressão 3D, como fluidez, tempo de pega, e resistência estrutural.

Esses resultados fornecem uma visão abrangente sobre as composições de argamassa mais eficazes e amplamente adotadas para impressão 3D, com destaque para as combinações de materiais que oferecem melhor desempenho em termos de reologia e resistência mecânica.

2. RESULTADOS E DISCUÇÕES

Para organizar e facilitar a apresentação dos dados, conforme a metodologia previamente detalhada, optou-se por estruturar os resultados em três seções principais:

1. seleção dos estudos relevantes,
2. análise bibliométrica, e
3. análise dos dados relativos ao conteúdo dos estudos selecionados.

Essa divisão permite uma abordagem sistemática, onde a seleção inicial estabelece o conjunto de estudos aderentes, a análise bibliométrica oferece uma visão quantitativa e qualitativa das publicações, e a análise de conteúdo explora profundamente os achados específicos relacionados ao tema, garantindo clareza e precisão na exposição dos resultados.

2.1. SELEÇÃO DOS ESTUDOS ADERENTES

A busca realizada nas quatro bases de dados resultou em um total de 2.972 publicações, conforme detalhado na Tabela 37. Dessas, 1.153 foram identificadas como duplicatas, sendo disponibilizadas por mais de uma plataforma, e, portanto, removidas da análise. As 1.819 publicações restantes passaram por uma triagem rigorosa conforme descrito no tópico metodologia. Ao final, 153 publicações foram consideradas aderentes a esta pesquisa, enquanto 1.666 foram descartadas.

Entre as 153 publicações inicialmente selecionadas, 8 não estavam disponíveis para consulta completa e foram removidas da análise. As 145 publicações restantes foram avaliadas

integralmente. Durante esta análise, verificou-se que 24 dessas não atendiam aos critérios de inclusão, sendo excluídas pelos seguintes motivos: (i) ausência de informações claras sobre as formulações dos traços de argamassa (critério 3) ou (ii) foco em materiais diferentes de argamassa (critério 4).

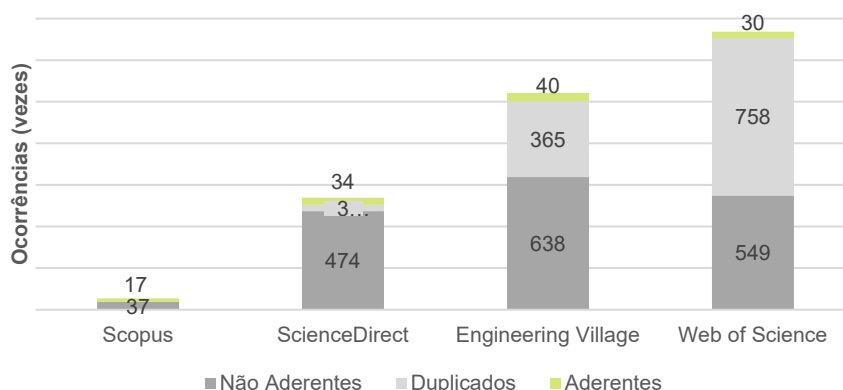
Consequentemente, 121 publicações foram consideradas aderentes e incluídas nesta revisão. A Figura 128 ilustra a distribuição final das publicações analisadas, por base de dados, classificadas como aderentes, não aderentes e duplicadas.

Tabela 37 - Quantidade de publicações identificadas em cada base de dados

Base de dados	Quantidade de publicações encontradas
Engineering Village	1.043
ScienceDirect	538
Scopus	54
Web of Science	1.337
Total	2.972

Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 128 - Distribuição de publicações nas bases de dados - não aderentes, duplicatas e aderentes



Fonte: Autoria própria, 2026

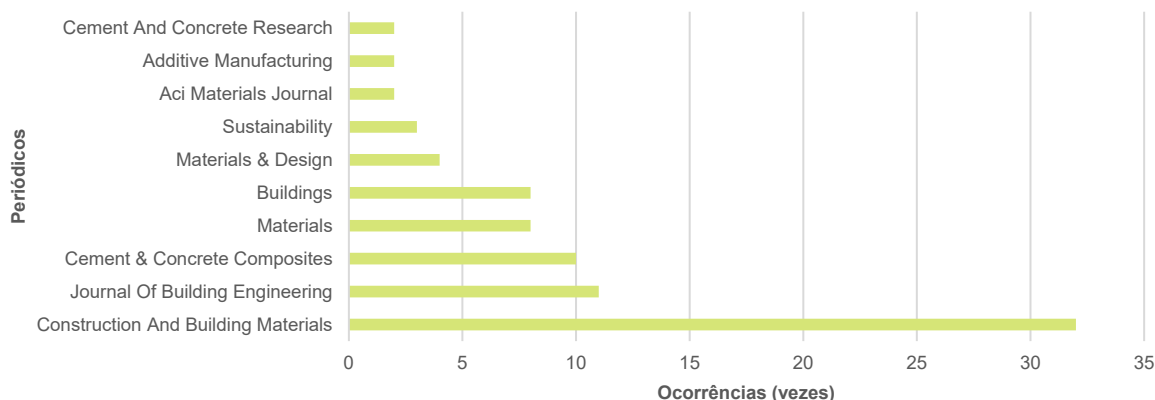
Observa-se que as bases de dados Web of Science e Engineering Village juntas representam 80% dos artigos encontrados na busca inicial. Entre os artigos relevantes, a base Engineering Village corresponde a 33% dos documentos selecionados, seguida por ScienceDirect com 28%, Web of Science com 25% e Scopus com 14%. No entanto, em termos absolutos de aderência da base, a Scopus apresentou o melhor resultado, com 32% dos arquivos selecionados, enquanto ScienceDirect teve 6%, Engineering Village 4% e Web of Science apenas 2% de aderência.

2.2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise dos dados disponíveis começou pela investigação da origem dos artigos selecionados. Observou-se que os 121 artigos foram publicados em 43 periódicos. Dentre eles, o periódico *Construction and Building Materials* destacou-se como a principal fonte de publicações, com 32 artigos, aproximadamente 26% da amostra total. Adicionalmente, os cinco periódicos com maior número de publicações responderam por 57% das publicações analisadas (69 artigos), enquanto os dez primeiros concentraram aproximadamente 68% do total (82 artigos). Os demais periódicos contribuíram com apenas uma ou duas publicações sobre o tema.

Esse padrão revela uma tendência de concentração das publicações em um número restrito de periódicos, sugerindo uma possível homogeneidade nas abordagens metodológicas e teóricas adotadas. Consequentemente, isso pode limitar a variedade de perspectivas e aprofundamentos analíticos sobre o tema. A Figura 129 apresenta os dados dos dez periódicos com maior número de publicações.

Figura 129 - Distribuição das publicações selecionadas nos 10 principais periódicos

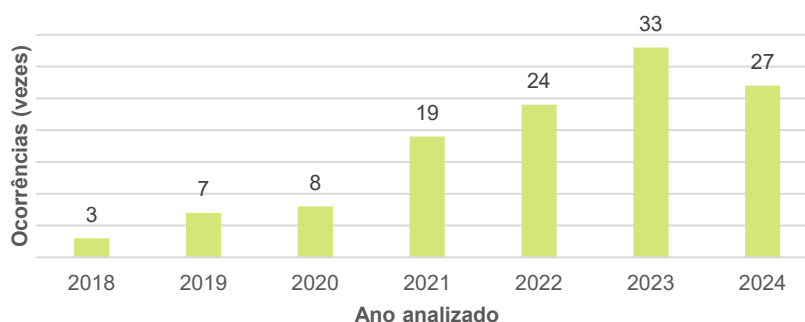


Fonte: Autoria própria, 2026

A fim de aprofundar a análise bibliométrica, procedeu-se à avaliação do ano de publicação dos artigos (Figura 130). Os estudos mais antigos datam de 2018 e incluem as contribuições de Zhang *et al.* (2018), que investigaram o uso de nanoargila no desenvolvimento de argamassas para impressão 3D, Ma *et al.* (2018), que analisaram a viabilidade do uso de resíduos de cobre em misturas cimentícias, e Ogura *et al.* (2018), que examinaram a influência de fibras em misturas destinadas à impressão 3D. Esses estudos pioneiros destacam o início das investigações científicas voltadas ao tema, estabelecendo a base para pesquisas subsequentes.

Observa-se que aproximadamente 50% das publicações analisadas foram realizadas nos últimos dois anos, evidenciando um crescimento significativo no interesse pelo tema. Nota-se que entre 2020 e 2021, o número de publicações aumentou de 8 para 19, representando um crescimento expressivo de 138%. A Figura 130 destaca essa tendência de expansão contínua, evidenciando que o campo de estudo é relativamente recente e vem atraindo um interesse crescente da comunidade acadêmica, reforçando a relevância do tema e o aumento de esforços dedicados à pesquisa na área.

Figura 130 - Evolução anual das publicações sobre misturas cimentícias para impressão 3D



Fonte: Autoria própria, 2026

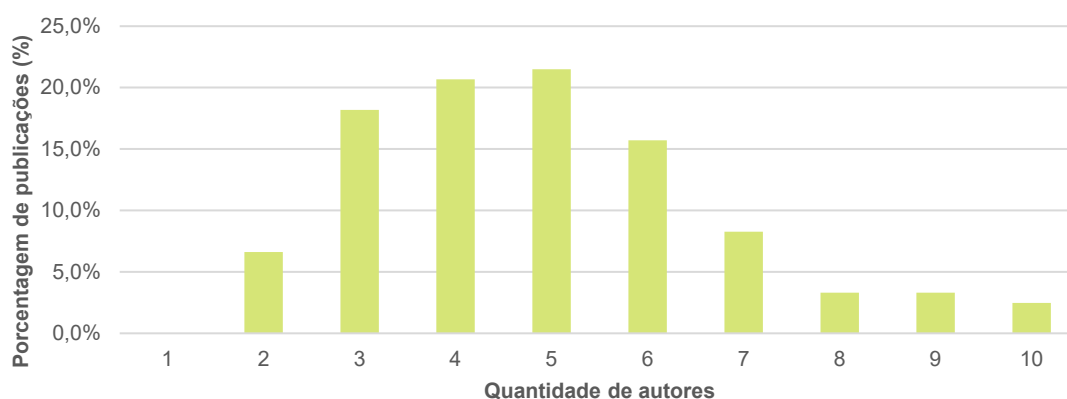
A Figura 131a apresenta a distribuição dos principais autores, em um universo total de 458 pesquisadores. Observa-se que ainda não há uma predominância significativa de autores específicos nos estudos sobre o tema. O autor Jianzhuang Xiao destaca-se com seis publicações, seguido por dois autores com cinco publicações cada. Outros cinco autores possuem quatro publicações, 15 autores têm três publicações, e 49 aparecem em duas publicações. A maioria dos autores, 382 no total, contribui com apenas uma publicação. Esses dados indicam que a pesquisa sobre o tema ainda está em fase de diversificação, sem uma concentração significativa em autores específicos, o que confirma que este é um campo de estudo emergente e com oportunidades para novas contribuições acadêmicas.

Na Figura 131b, observa-se que a maioria das publicações foi realizada por cinco autores, representando 22% do total. Publicações com quatro e três autores correspondem 20% e 18%, respectivamente, enquanto aquelas com seis autores representam 16%. As publicações com sete ou mais autores somam cerca de 17% do total, o que pode ser considerado um número expressivo. Em contrapartida, apenas 6% das publicações foram realizadas por dois autores, e não há registros de publicações de um único autor. Esses dados indicam uma forte tendência de colaboração entre os pesquisadores na área.

Figura 131 - (a) Distribuição dos primeiros autores por número de publicações; (b) Percentagem de Publicações com Base no Número de Autores



(a)



(b)

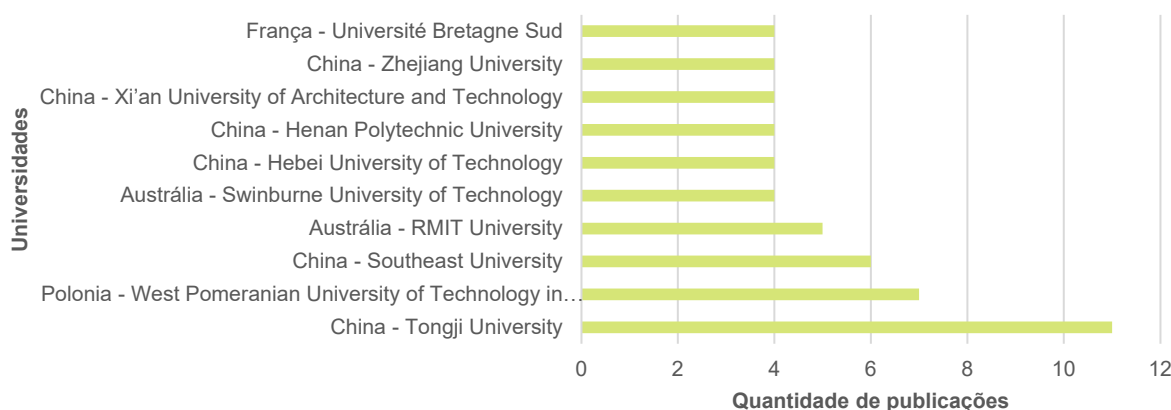
Fonte: Autoria própria, 2026

Quanto às instituições de pesquisa, observa-se uma colaboração um pouco menor que entre autores. Cerca de 39% das publicações foram realizadas por uma única instituição, 22% por duas instituições e 26% por três, representando 87% do total. A Universidade de Tongji, na China, lidera em número de publicações, com participação em 11 artigos (cerca de 9%), seguida pela West Pomeranian University of Technology em Szczecin, Polônia, com 7 artigos. Quando há cooperação institucional, observa-se uma tendência para parcerias internacionais: aproximadamente 34% dos artigos resultaram de colaborações entre instituições de diferentes países.

É relevante notar que, das dez instituições com maior número de publicações (Figura 132), seis são chinesas; ampliando para as vinte principais, onze são da China. A Figura 133 analisa as publicações por país revelando que das 121 publicações, 45 (cerca de 37%) incluem a contribuição de uma instituição chinesa. Comparando a participação total por país, verifica-se que as instituições chinesas estão envolvidas em pesquisas neste tema em uma proporção significativamente maior que as de outros países. Esses dados indicam que a China é, de

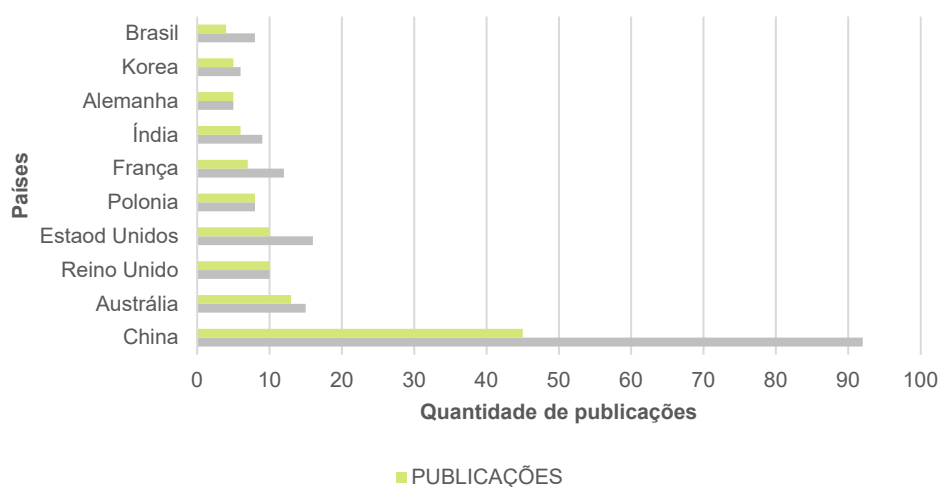
longe, o país com maior interesse na área, seguida pela Austrália, Reino Unido e Estados Unidos, com 13, 10 e 10 participações em artigos, respectivamente.

Figura 132 - Principais instituições por número de publicações



Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 133 - Publicações totais e participações de instituições por país



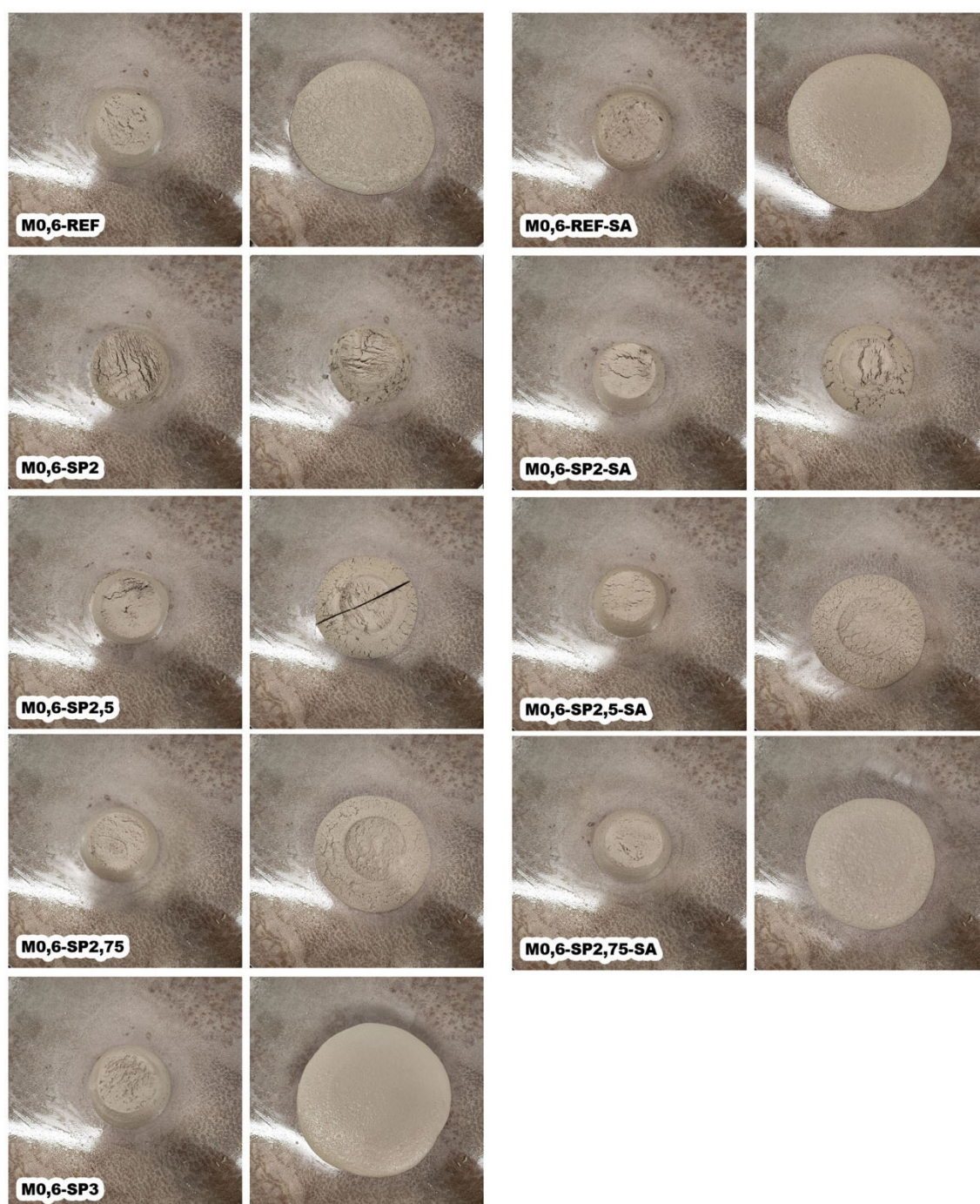
Fonte: Autoria própria, 2026

Foi realizado também um levantamento das palavras-chave utilizadas nas publicações. Identificou-se um total de 367 palavras-chave distintas, evidenciando a diversidade de abordagens e ênfases temáticas na literatura sobre impressão 3D em materiais cimentícios. Entre estas, o termo “*3D printing*” foi o mais recorrente, sendo destacado como palavra-chave principal em 20 estudos e aparecendo também como componente em outros 13 trabalhos dentro do termo “*3D concrete printing*”, que ocupou a segunda posição. Além disso, o termo também foi identificado em variações ou combinações maiores, como em expressões contendo “*print*” ou “*printed*”, indicando sua centralidade no campo de pesquisa.

APÊNDICE B - Registros Fotográficos do Ensaio de Espalhamento

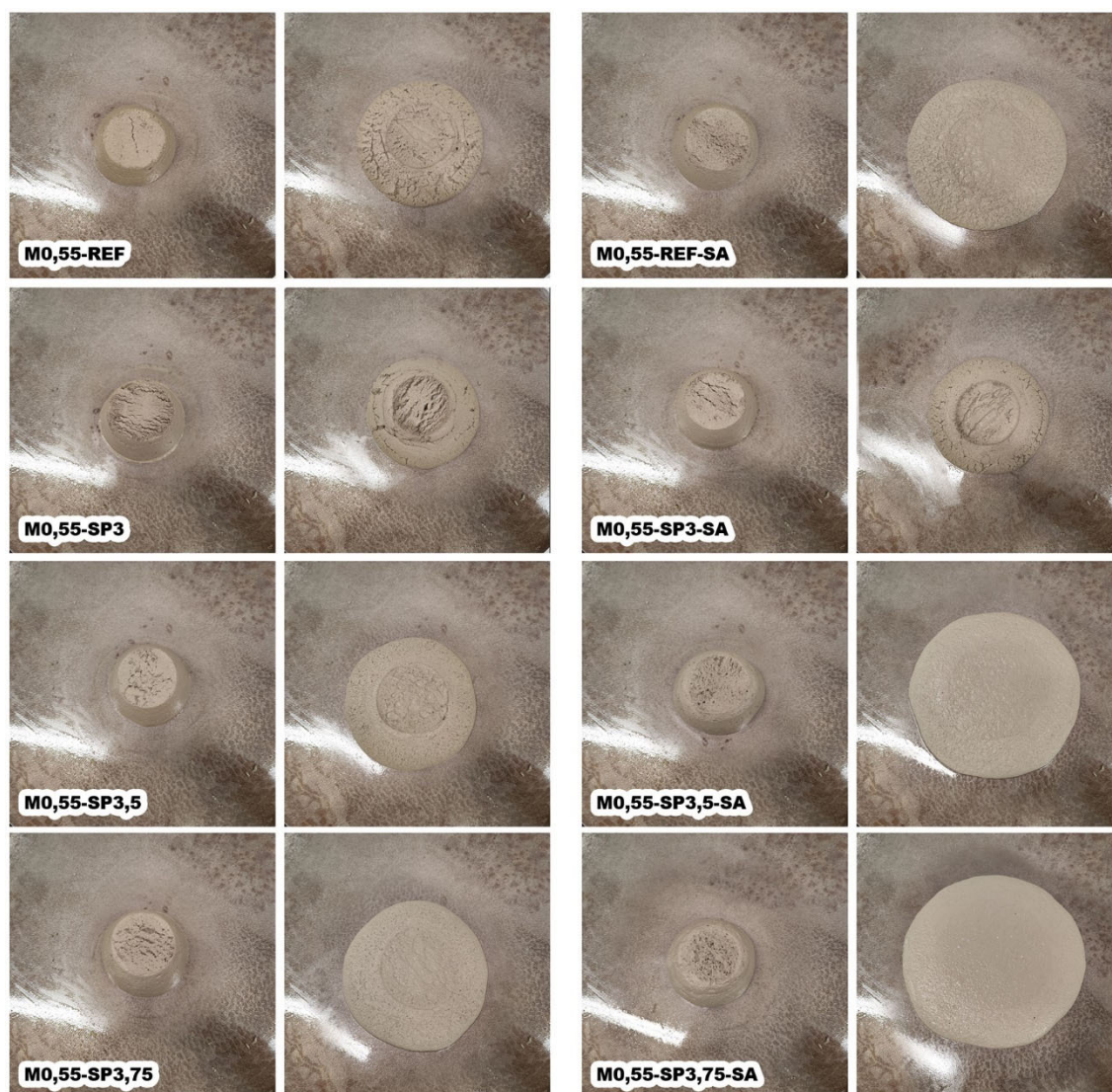
Este apêndice apresenta os registros fotográficos do ensaio de espalhamento realizados ao longo da etapa experimental, contemplando o momento imediatamente após a retirada do cone e após a aplicação das 30 pancadas.

Figura 135 - Registros fotográficos do ensaio de espalhamento das misturas com relação $a/l = 0,60$, antes e após as 30 pancadas, para sistemas com 5% e 10% de sílica ativa



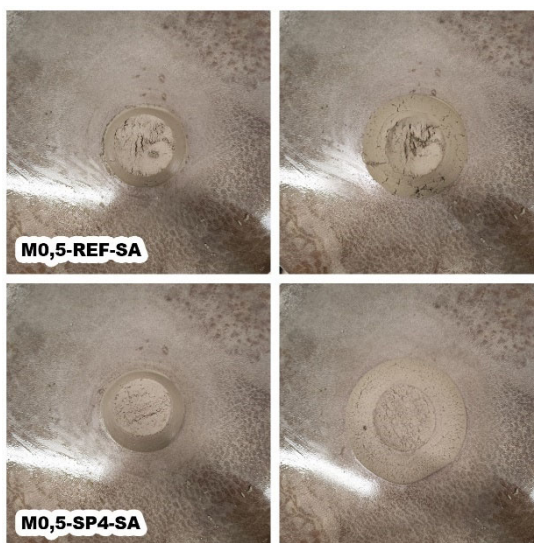
Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 136 - Registros fotográficos do ensaio de espalhamento das misturas com relação $a/l = 0,55$, antes e após as 30 pancadas, para sistemas com 5% e 10% de sílica ativa



Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 137 - Registros fotográficos do ensaio de espalhamento das misturas com relação $a/l = 0,50$, antes e após as 30 pancadas



Fonte: Autoria própria, 2026