DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA COM METACAULIM COMO SUBSTITUTO DE CIMENTO E FILLER PARA FINS DE MANUFATURA DIGITAL ADITIVA

Sophia Fontolan Yazbek (IC) e Roberta Nunes Attili Franzin (Orientador)

Apoio:PIVIC Mackenzie

RESUMO

A manufatura digital aditiva aplicada à construção civil exige materiais capazes de conciliar extrudabilidade, estabilidade após a deposição e desempenho adequado no estado endurecido. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar argamassas para impressão 3D com substituição parcial do cimento Portland e de filler por metacaulim, analisando propriedades físicas, reológicas e mecânicas. Foram estudados um traço de referência, dois traços com substituição de 10% e 20% do cimento por metacaulim e uma formulação adicional na qual o metacaulim substituiu parte da fração fina, mantendo-se o teor de cimento. No estado fresco, foram avaliadas densidade de massa, consistência, comportamento reológico por *squeeze-flow* e extrudabilidade. No estado endurecido, foram determinados resistência à tração na flexão, resistência à compressão, velocidade de propagação ultrassônica e módulo de elasticidade dinâmico. Todas as formulações apresentaram viabilidade de extrusão nas condições experimentais adotadas. Os traços com substituição parcial do cimento apresentaram redução do desempenho mecânico em relação à referência, porém mantiveram características compatíveis com aplicações não estruturais e possibilitaram a redução do consumo de cimento. A formulação com substituição da fração fina apresentou o melhor desempenho global, com maior resistência à compressão (11,45 MPa) e velocidade ultrassônica (2779,00 m/s), além de módulo dinâmico semelhante ao traço de referência (12,43 GPa). Conclui-se que o metacaulim apresenta potencial para aplicação em argamassas destinadas à impressão 3D, sendo recomendada, em trabalhos futuros, a otimização do sistema de aditivos para reduzir a demanda de água e aprimorar o desempenho mecânico.

Palavras-chave: Argamassa para extrusão. Propriedades reológicas. Impressão 3D na construção.

ABSTRACT

Additive digital manufacturing applied to civil engineering requires materials capable of reconciling extrudability, stability after deposition, and adequate performance in the hardened state. This study aimed to develop and evaluate mortars for 3D printing with partial replacement of Portland cement and filler by metakaolin, analyzing physical, rheological, and mechanical properties. A reference mix, two mixes with 10% and 20% cement replacement by

metakaolin, and an additional formulation in which metakaolin replaced part of the fine fraction while maintaining the cement content were studied. In the fresh state, bulk density, consistency, rheological behavior by squeeze-flow, and extrudability were evaluated. In the hardened state, flexural tensile strength, compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and dynamic modulus of elasticity were determined. All formulations showed extrusion feasibility under the adopted experimental conditions. The mixes with partial cement replacement showed a reduction in mechanical performance compared to the reference but maintained characteristics compatible with non-structural applications and enabled the reduction of cement consumption. The formulation with replacement of the fine fraction showed the best overall performance, with higher compressive strength (11.45 MPa) and ultrasonic velocity (2779.00 m/s), as well as a dynamic modulus similar to the reference mix (12.43 GPa). It is concluded that metakaolin has potential for application in mortars intended for 3D printing, and optimization of the additive system is recommended in future studies to reduce water demand and improve mechanical performance.

Keywords: Extrusive mortar. Rheological properties. 3D printing in construction.

1. INTRODUÇÃO

O avanço da automação na engenharia civil vem transformando as abordagens tradicionais nos canteiros de obras, impulsionando a busca por processos mais eficientes, racionais e ambientalmente amigáveis. A manufatura digital aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, destaca-se entre essas inovações por permitir a produção automatizada de componentes estruturais e arquitetônicos, diretamente a partir de arquivos digitais tridimensionais, sobrepondo camadas sucessivas de material sem a necessidade de fôrmas (Duan *et al.,* 2022; Rahman *et al.,* 2024).

O processo baseia-se tipicamente no bombeamento e na extrusão controlada de uma mistura através de um bocal acoplado a pórticos ou braços robóticos. A deposição contínua do filamento do material segue uma trajetória pré-programada. A eliminação das fôrmas tradicionais reduz de forma direta o descarte de resíduos de madeira e otimiza o tempo de execução, ao mesmo tempo em que abre espaço para geometrias complexas antes inviabilizadas por limitações econômicas ou construtivas (Duan *et al.,* 2022).

Contudo, a viabilidade técnica da tecnologia esbarra na complexidade de formulação dos materiais. Nas aplicações tradicionais, como assentamento e revestimento, as argamassas precisam apresentar boa trabalhabilidade durante a aplicação e, depois, ganhar resistência com o endurecimento. Já na impressão 3D, o material precisa apresentar, em pouco tempo, características diferentes: ser suficientemente fluido para ser extrudado e, ao mesmo tempo, ter estabilidade para manter a forma após a deposição. Isto é, durante o percurso na tubulação e no bico extrusor, a mistura exige fluidez adequada para fluir sem obstruções nem sobrecarregar o sistema de bombeamento. Logo após sair da ponta extrusora, o material necessita de rigidez suficiente para manter sua geometria e suportar o peso próprio e das camadas *superiores*. O sucesso do processo reside no equilíbrio delicado entre a extrudabilidade e a capacidade de suporte de forma (construtibilidade) (Rahul *et al.,* 2019; Rahman *et al.,* 2024).

As propriedades no estado fresco ditam o desempenho prático do sistema. Conforme sintetizado por Rahman *et al.* (2024), os parâmetros determinantes envolvem fluidez, bombeabilidade, extrudabilidade, construtibilidade e tempo em aberto, todos governados por grandezas reológicas fundamentais, como viscosidade plástica e tensões de escoamento estática e dinâmica. O comportamento dessas variáveis é extremamente sensível a modificações na dosagem, em especial às variações na relação água/aglomerante, na curva granulométrica dos agregados e na presença de adições minerais ou aditivos químicos.

Esse dinamismo reológico foi também evidenciado por Rahul *et al.* (2019), cujos ensaios demonstraram que tanto a extrudabilidade, quanto a construtibilidade respondem

diretamente aos níveis de tensão de escoamento. Misturas muito fluidas fluem com facilidade pelo equipamento, mas colapsam sob o próprio peso logo após a deposição; por outro lado, misturas excessivamente rígidas mantêm a forma com precisão, contudo tendem a travar as linhas de alimentação. Por isso, a formulação de uma argamassa para manufatura aditiva precisa conciliar as exigências do fluxo fresco com os requisitos de resistência do estado endurecido.

Além das características de fluxo, a integridade das peças impressas depende da aderência entre camadas e do comportamento mecânico no estado endurecido. O método de deposição por extrusão gera descontinuidades e anisotropia que não existem em elementos moldados tradicionalmente. Assim, diante da ausência de normas padronizadas específicas para a caracterização de elementos cimentícios impressos, torna-se indispensável o acúmulo de dados experimentais consistentes.

Simultaneamente aos gargalos tecnológicos, a urgência em mitigar a pegada ecológica da construção civil pressiona por mudanças no consumo de cimento Portland, cuja fabricação gera volumosas emissões de CO_2 e exige alto consumo energético. A substituição parcial do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa e metacaulim entre outros, que podem contribuir para as propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas e concretos, surge como estratégia eficaz para mitigar esse impacto. Essa medida torna-se ainda mais urgente na impressão 3D, já que muitos traços imprimíveis utilizam teores elevados de aglomerantes finos para atingir o comportamento reológico desejado (Duan *et al.,* 2022).

O metacaulim (MC), foco deste estudo, destaca-se entre as adições pozolânicas pela alta reatividade e abundância nacional. Trata-se de um aluminossilicato refinado que, ao ser incorporado a matrizes cimentícias, modifica substancialmente tanto a microestrutura quanto a reologia. Sua elevada área superficial e efeito filler refinam os poros e aceleram reações pozolânicas, alterando a demanda de água e o empacotamento da mistura.

Partindo desse cenário, a integração entre a manufatura aditiva e o uso do metacaulim apresenta-se como um caminho promissor para unir inovação tecnológica e sustentabilidade. A questão central investigada reside em saber em que medida a substituição parcial do cimento Portland por metacaulim em diferentes proporções permite obter uma argamassa com boa extrudabilidade e estabilidade dimensional sem comprometer suas propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido.

Assim, o objetivo deste estudo foi desenvolver e avaliar traços de argamassa para impressão 3D contendo substituição parcial de cimento e de agregado miúdo por metacaulim, verificando sua aplicabilidade no processo de extrusão e o seu desempenho mecânico pós-

cura. O trabalho compara uma mistura de referência a formulações com substituição em massa de cimento e de filler, analisando o comportamento reológico no estado fresco e os parâmetros mecânicos no estado endurecido.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A literatura recente sobre manufatura aditiva com materiais cimentícios demonstra que a viabilidade da impressão 3D não depende exclusivamente do funcionamento do equipamento de deposição, mas da interação entre as características da mistura e as condições operacionais do sistema. Nesse contexto, o conceito de imprimibilidade é empregado para representar o conjunto de propriedades que permite ao material ser transportado, extrudado continuamente e depositado em camadas sucessivas sem perda excessiva de geometria ou colapso. Dessa forma, uma formulação considerada adequada para determinado equipamento ou configuração de impressão não necessariamente apresentará o mesmo desempenho quando submetida a condições distintas de bombeamento, velocidade de deposição, geometria do bocal ou intervalo entre camadas.

Rahman *et al.* (2024), em uma ampla revisão das propriedades frescas e reológicas de compósitos cimentícios destinados à impressão 3D, reforçam essa interdependência ao relacionarem a imprimibilidade à fluidez, bombeabilidade, extrudabilidade, construtibilidade e ao tempo em aberto. Os autores ressaltam que esses parâmetros são fortemente dependentes da composição da mistura e do método de avaliação utilizado. Como referência, a revisão identifica valores de espalhamento entre aproximadamente 160 mm e 200 mm como uma faixa frequentemente associada a condições adequadas de impressão em estudos disponíveis na literatura, embora os próprios autores ressaltem que não existe um valor universal, uma vez que as exigências variam em função dos materiais, do equipamento e do procedimento experimental.

Essa dependência entre material e processo foi demonstrada experimentalmente por Rahul *et al.* (2019), que desenvolveram misturas imprimíveis empregando cinza volante, sílica ativa, modificador de viscosidade e superplastificante. Para o traço de referência avaliado pelos autores, dosagens de superplastificante inferiores a 0,10% produziram misturas excessivamente rígidas, com bloqueio no bocal, enquanto o aumento para 0,11% reduziu excessivamente a resistência à deformação, comprometendo a construtibilidade. A dosagem de 0,10% foi a única que atendeu simultaneamente aos critérios de extrudabilidade e construtibilidade, correspondendo a uma tensão de escoamento de aproximadamente 1,6 kPa. Considerando todas as formulações consideradas imprimíveis no estudo, os valores de tensão de escoamento permaneceram aproximadamente entre 1,5 kPa e 2,5 kPa.

Os resultados de Rahul *et al.* (2019) evidenciam que o desempenho adequado não resulta da maximização de uma propriedade isolada. A mistura deve oferecer resistência suficientemente baixa durante o bombeamento e a extrusão e, simultaneamente, recuperar sua estrutura após a deposição. Essa resposta está diretamente relacionada às propriedades reológicas do material. De forma simplificada, a tensão de escoamento dinâmica e a viscosidade estão associadas à manutenção do fluxo durante o bombeamento e a passagem pelo bocal, enquanto a tensão de escoamento estática representa a resistência necessária para iniciar o movimento de uma estrutura em repouso e assume maior importância para a estabilidade das camadas depositadas. A tixotropia, por sua vez, está associada à capacidade de redução da estruturação sob cisalhamento e de recuperação estrutural quando a solicitação é interrompida. Rahman *et al.* (2024) destacam, portanto, que uma combinação adequada de tensão de escoamento dinâmica, viscosidade, tensão estática e tixotropia constitui requisito fundamental para compatibilizar bombeamento, extrusão e construtibilidade.

Entre os métodos de caracterização reológica, o *squeeze-flow* comprime uma amostra cilíndrica entre placas paralelas e relaciona força e deslocamento, permitindo identificar regiões de deformação elástica, fluxo plástico/viscoso e enrijecimento. Maiores forças em pequenos deslocamentos indicam maior resistência à deformação, enquanto maiores deslocamentos sob baixas cargas indicam maior facilidade de fluxo. O método também é sensível às condições de mistura e homogeneização (Cardoso, Pileggi e John, 2010).

Diniz (2023) aplicou o *squeeze-flow* a misturas para impressão 3D aos 15, 30 e 60 minutos e observou aumento da resistência à deformação com o tempo. A relação água/ligantes foi a variável de maior influência; nas condições do estudo, as misturas imprimíveis apresentaram aos 15 minutos patamar d e força inferior a aproximadamente 250 N, valor específico daquele sistema e não aplicável como limite universal.

Além da caracterização reológica, a dosagem exerce influência determinante sobre o comportamento observado durante a impressão. A quantidade de água interfere diretamente na lubrificação e mobilidade das partículas, enquanto os teores e as características dos agregados modificam o atrito interno, a área superficial e a quantidade de pasta necessária para promover o escoamento. A utilização de materiais finos e aditivos químicos altera, ainda, a tensão de escoamento, a viscosidade e a incorporação de ar. Como consequência, modificações aparentemente pequenas em um componente podem favorecer uma etapa do processo e simultaneamente prejudicar outra.

Nesse sentido, Diniz (2023) constatou que a relação água/ligantes foi a variável de maior influência sobre o espalhamento das misturas estudadas. O aumento de água favoreceu a fluidez e a vazão, mas produziu efeitos desfavoráveis sobre a construtibilidade e a resistência à compressão. O estudo identificou ainda que, para o equipamento empregado, valores de espalhamento inferiores a aproximadamente 161 mm estiveram associados à impossibilidade de impressão, resultado de mesma ordem de grandeza dos limites reportados por outros trabalhos. Por outro lado, o aumento excessivo da relação água/ligantes reduziu a capacidade das camadas de manter sua geometria.

A influência dos agregados foi estudada de forma específica por Martins *et al.* (2023), que avaliaram relações areia/cimento de 1,00, 1,25 e 1,50, mantendo a relação água/cimento em 0,45 e utilizando diferentes teores de superplastificante. O aumento da proporção de areia promoveu redução do abatimento e do espalhamento e elevação da tensão de escoamento estática. O superplastificante produziu comportamento oposto, aumentando o espalhamento e reduzindo a tensão de escoamento. No teste de impressão, o traço com relação areia/cimento de 1,25 e 0,20% de superplastificante apresentou bombeamento e extrusão contínuos e foi capaz de sustentar cinco camadas antes da ocorrência de colapso. Os autores também verificaram experimentalmente que teores elevados de areia podem provocar entupimento e superaquecimento do sistema de bombeamento. Os resultados mostram que o aumento da fração granular, embora possa contribuir para o aumento da resistência à deformação, não é suficiente isoladamente para garantir a construção de elementos com elevado número de camadas.

Esse conjunto de resultados evidencia a importância de analisar a dosagem como um sistema integrado. A revisão de Rahman *et al.* (2024) reforça essa interpretação ao demonstrar que materiais cimentícios suplementares, superplastificantes, modificadores de viscosidade, fibras e relações agregado/aglomerante e água/aglomerante podem produzir efeitos distintos sobre as propriedades frescas. Os autores destacam também que resultados reológicos de formulações semelhantes podem variar substancialmente conforme o equipamento de ensaio, o tempo decorrido após a adição da água e as características específicas dos materiais empregados, limitando a definição de valores universais de tensão de escoamento ou viscosidade.

Entre os materiais cimentícios suplementares, o metacaulim destaca-se pelo caráter pozolânico, elevada finura e composição rica em sílica e alumina, podendo alterar simultaneamente a água disponível, a reologia e a matriz endurecida. Michel *et al.* (2024), ao compararem diferentes adições em argamassas para impressão 3D, obtiveram com metacaulim a maior fluidez e resistência à compressão de 37,06 MPa aos 14 dias, além de boa correlação entre curvas de fluxo e tensão de escoamento.

Duan *et al.* (2022) estudaram substituições de 5% e 10% do cimento por metacaulim em compósitos para impressão 3D. Com 10%, a tensão de escoamento estática aumentou de aproximadamente 181,06 Pa para 697,90 Pa, a dinâmica de 55,28 Pa para 126,84 Pa e a viscosidade de 7,52 Pa·s para 11,22 Pa·s. Embora a fluidez tenha diminuído, a capacidade de empilhamento aumentou de 17 camadas na referência para 21 e 23 camadas com 5% e 10% de metacaulim, respectivamente.

No estado endurecido, Duan *et al.* (2022) observaram maior evolução da resistência à compressão nas misturas com metacaulim: entre 3 e 28 dias, os aumentos foram de 19,8% na referência, 52,3% com 5% e 63,1% com 10%. Na flexão, os crescimentos foram próximos entre as formulações, e os autores também registraram aumento de tensão máxima e módulo elástico em idades iniciais, atribuindo o desempenho ao efeito de preenchimento e à atividade pozolânica.

Diniz (2023) também mostrou que o efeito do metacaulim depende da interação com areia e água. O material elevou a viscosidade e a demanda de água; teores mais altos favoreceram a construção de camadas, enquanto o aumento de água elevou a vazão, mas reduziu construtibilidade e resistência. Misturas com muitos finos exigiram maior quantidade de água para recobrir as partículas, e os elementos impressos viáveis apresentaram resistências à compressão superiores a 8 MPa.

Em conjunto, os estudos mostram que o teor de metacaulim não determina isoladamente o desempenho. Duan *et al.* (2022), Michel *et al.* (2024) e Diniz (2023) evidenciam que resultados reológicos, de impressão e mecânicos dependem principalmente da interação entre metacaulim, água, agregados e aditivos; portanto, a formulação deve ser avaliada de modo integrado.

3. METODOLOGIA

O programa experimental foi conduzido nos laboratórios da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM). A pesquisa avaliou propriedades físicas, reológicas e mecânicas de quatro traços de argamassa para impressão 3D, com e sem metacaulim. Para parte dos ensaios realizados, foram adotadas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) voltadas a argamassas, em função da ausência de agregados graúdos nas dosagens e de normas específicas voltadas à impressão 3D de materiais cimentícios.

Quatro traços de argamassa foram desenvolvidos: um traço de referência, sem adição de metacaulim (T-Ref); dois com substituição parcial do cimento por metacaulim, nos teores de 10% (T-10C) e 20% (T-20C); e um com substituição de 10% da massa de parte dos agregados miúdos (filler de brita) por metacaulim, mantendo-se 100% do cimento (T-10FB).

O traço utilizado como base da pesquisa é um traço que vem sendo desenvolvido pelo grupo de pesquisa em materiais de construção da Escola de Engenharia. Neste trabalho, entretanto, foram introduzidos o metacaulim e a substituição da areia natural por areia e filler artificiais, resultantes do processo de britagem de pedra. O traço é composto basicamente de cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), areia média, filler de brita, filler calcário, aditivos e água. A Tabela 1 apresenta o consumo de cimento de cada traço, assim como o consumo de metacaulim, a relação água/cimento e a relação água/aglomerante (cimento + metacaulim). Vale ressaltar que a quantidade de água precisou ser ajustada experimentalmente para conferir a extrudabilidade adequada a cada mistura.

Tabela 1 – Características dos traços quanto ao consumo de aglomerantes e água

Traço	Cimento (kg/m^3)	Metacaulim (kg/m^3)	a/c	a/aglomerante
T-Ref	323,20	-	1,097	1,097
T-10C	290,88	32,32	1,296	1,167
T-20C	258,56	64,64	1,456	1,165
T-10FB	323,20	57,04	1,097	0,884

Fonte: Autores (2026).

O cimento empregado foi o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), da Companhia Nacional de Cimento (CNC). Os agregados miúdos utilizados foram areia média de brita, filler de brita e filler calcário (dolomítico). A areia média e filler provenientes de pedra britada foram fornecidos pela empresa Embu. A areia proveniente desse processo apresenta morfologia predominantemente angular e distribuição granulométrica relativamente controlada. A granulometria da areia média utilizada encontra-se na faixa 0,150 mm a 4,75 mm, de acordo com dados fornecidos pela empresa (Mineração Embu, 2026). O filler de brita tem granulometria extremamente reduzida, tendo seus grãos, dimensões inferiores a 0,075 mm. O filler dolomítico utilizado foi da empresa Brasil Minas, composto predominantemente por carbonatos de cálcio e magnésio e apresenta granulometria correspondente à malha 101/200 com partículas maiores que 0,075 mm e menores que 0,150 mm.

Na impressão 3D, o filler, além de preencher os microespaços entre os grãos de areia, desempenha um papel fundamental nas propriedades reológicas da argamassa. Por ser um material ultrafino, contribui para a coesão da matriz, melhora a consistência e a plasticidade da mistura, facilitando o deslizamento da massa no processo de impressão, deixando-a mais lisa e com um melhor acabamento superficial. Nas massas para impressão 3D, o alto teor de filler é necessário para garantir a bombealidade, a extrudabilidade, e a construtibilidade, como já apontado.

O metacaulim utilizado foi o HP Ultra, fornecido pela Metacaulim do Brasil e de granulometria 0,044 mm (malha 325) de acordo com a Ficha Técnica (Metacaulim do Brasil, 2026). Os aditivos utilizados foram a celulose Celotex K15 da Aditex e o lauril sulfato de sódio (LSS). A celulose contribui para retenção de água e controle da viscosidade, propriedades de interesse em misturas destinadas à extrusão. O LSS, aditivo incorporador de ar, contribuiu para o ajuste das propriedades das argamassas no estado fresco. A quantidade empregada variou entre as formulações de acordo com os ajustes realizados durante o desenvolvimento dos traços.

A água foi utilizada como água de amassamento para hidratação dos materiais cimentícios e ajuste da consistência das formulações. Sua quantidade foi definida individualmente para cada traço, considerando a demanda apresentada pelos agregados e pelo metacaulim e a necessidade de obter condições adequadas ao processo de extrusão, uma vez que não foi usado aditivo superplastificante.

Foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido para todas as argamassas estudadas. No estado fresco foram analisadas a consistência de acordo com a norma ABNT NBR 13276 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016); a densidade de massa seguindo a norma ABNT NBR 13278 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005); a viscosidade pelo método do squeeze-flow e de acordo com a norma ABNT NBR 15839 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010); além dos testes de extrusão na impressora 3D tipo pórtico desenvolvida pelo Projeto MackPesquisa n^0 221055 e localizada no laboratório de Materiais de Construção na Escola de Engenharia.

O protótipo utilizado nos testes de extrusão/impressão possui a geometria de meio-fio padronizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) desenvolvido em CAD e configurado no código G-Code para a impressora por Ceccato e Pappalardo (2025).

Para a análise das propriedades das argamassas no estado endurecido, foram moldados 12 corpos de prova prismáticos, com dimensões de 4 cm × 4 cm × 16 cm, para cada traço. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, realizados aos 7, 14 e 28 dias, conforme a norma ABNT NBR 13279 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005). Além disso, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos de 5 cm × 10 cm para o ensaio de ultrassom aos 28 dias, a fim de se analisar o módulo de elasticidade dinâmico normatizado pela ABNT NBR 15630 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008). A cura dos corpos de prova foi realizada em condições ambientes.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais foram analisados de forma comparativa entre o traço de referência e os traços com metacaulim. A discussão considera as propriedades no estado fresco, o comportamento durante a extrusão e o desempenho no estado endurecido, buscando relacionar os resultados entre si e com a literatura utilizada como fundamentação teórica.

A interpretação do estado fresco deve considerar as relações água/cimento (a/c) e água/aglomerante (a/aglomerante) da Tabela 1. A relação a/c é elevada, sobretudo em T-10C e T-20C, porque considera apenas o cimento no denominador; a relação a/aglomerante, que inclui cimento e metacaulim, representa melhor esses sistemas. A demanda de água permaneceu alta em razão da morfologia angular e da elevada fração de finos dos materiais de britagem, além da própria demanda do metacaulim. Ainda assim, esses agregados foram mantidos por valorizarem subprodutos do beneficiamento mineral e reduzirem a dependência de areia natural. Diniz (2023) também relacionou maior teor de finos à maior necessidade de água e destacou a relação água/ligantes como variável central na impressão 3D.

Como não foi utilizado superplastificante, a água foi ajustada experimentalmente até garantir a extrusão. Para trabalhos futuros, o uso de aditivos redutores de água pode diminuir a relação água/aglomerante sem comprometer a imprimibilidade. Martins *et al.* (2023) observaram aumento do espalhamento e redução da tensão de escoamento com superplastificante, obtendo bombeamento e extrusão contínuos em uma das formulações.

Os resultados de densidade de massa, apresentados na Tabela 2, constituem o primeiro parâmetro utilizado para avaliar o comportamento das misturas no estado fresco.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de Densidade de massa no estado fresco

Traço	Densidade (kg/L)
T-Ref	1,785
T-10C	1,717
T-20C	1,827
T-10FB	1,610

Fonte: Autores (2026).

A densidade não apresentou relação linear com o teor de metacaulim, indicando influência conjunta da água, do empacotamento e do ar incorporado. Vale ressaltar que uma redução da densidade também constitui um aspecto potencialmente favorável para o processo de impressão, pois resulta em menor peso próprio das camadas depositadas sobre aquelas posicionadas abaixo. Entretanto, a mesma característica que favorece a processabilidade no estado fresco apresenta uma contrapartida após o endurecimento. O LSS, que é o aditivo incorporador de ar, favorece plasticidade, moldabilidade e menor

densidade, características úteis ao bombeamento e à extrusão; entretanto, as bolhas podem permanecer como vazios após o endurecimento e comprometer resistência, rigidez e propagação ultrassônica. Diniz (2023) também apontou influência do ar incorporado sobre extrusão e construtibilidade, reforçando que a densidade deve ser interpretada em conjunto com a composição. Portanto, as diferenças de densidade observadas neste trabalho não devem ser atribuídas isoladamente ao metacaulim, mas à interação entre a adição pozolânica, a água, o sistema granular e o incorporador de ar.

A Tabela 3 mostra os resultados para o índice de consistência e permite complementar a avaliação do comportamento no estado fresco.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de Consistência

Traço	Consistência (mm)
T-Ref	199
T-10C	214
T-20C	220
T-10FB	194

Fonte: Autores (2026).

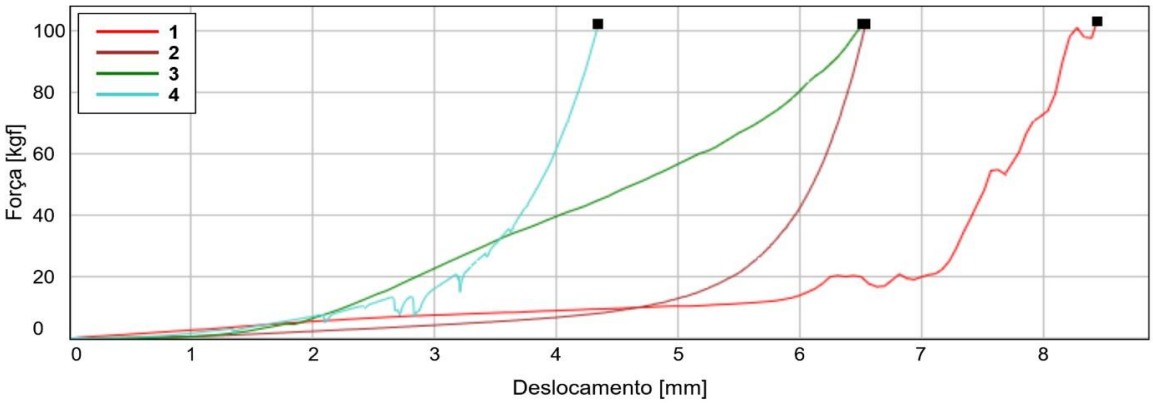
Na consistência, os traços T-10C e T-20C apresentaram maior espalhamento que o traço de referência, enquanto o traço T-10FB foi mais coeso. O comportamento observado não indica um efeito fluidificante do metacaulim. Duan *et al.* (2022) observaram redução de fluidez, e Diniz (2023) mostrou que o aumento da água favorece espalhamento e vazão.

No presente trabalho, os ajustes de água compensaram parte da coesão dos finos. O T-10FB, com menor relação água/aglomerante e manutenção integral do cimento, apresentou menor espalhamento. Ainda assim, todos os traços foram extrudados, coerentemente com Rahman *et al.* (2024), que ressalta não existir faixa universal de consistência, embora valores próximos de 160 mm a 200 mm sejam frequentes na literatura. Essa conclusão é corroborada pelos resultados do squeeze-flow, apresentados nos Gráficos 1, 2, 3 e 4 para os traços T-Ref, T-10C, T-20C e T-10FB respectivamente.

Nos Gráficos 1 a 4, o eixo horizontal representa o deslocamento e o vertical, a força necessária à compressão. Os índices 1 e 3 correspondem às duas repetições a 3,00 mm/s, enquanto 2 e 4 correspondem às repetições a 0,10 mm/s, permitindo comparar o efeito da velocidade e a repetibilidade do ensaio. Maiores deslocamentos sob menores forças indicam maior deformabilidade e facilidade de fluxo, relacionadas à trabalhabilidade; aumentos rápidos da força em pequenos deslocamentos indicam maior resistência ao escoamento e coesão, enquanto a elevação final caracteriza o enrijecimento por deformação (Cardoso, Pileggi e John, 2010). Para impressão 3D, maior deformabilidade favorece bombeamento e extrusão, ao passo que maior resistência à deformação pode favorecer a manutenção da forma. Assim,

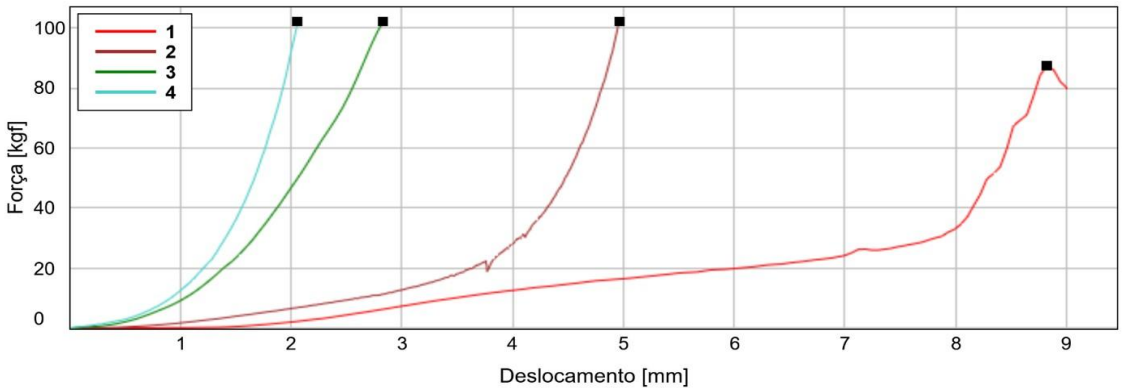
T-Ref e T-20C mostraram maior deformabilidade, enquanto T-10C e T-10FB apresentaram maior dispersão e, em algumas condições, maior resistência à deformação.

Gráfico 1 – Resultados do ensaio de Squeeze-flow para T-Ref



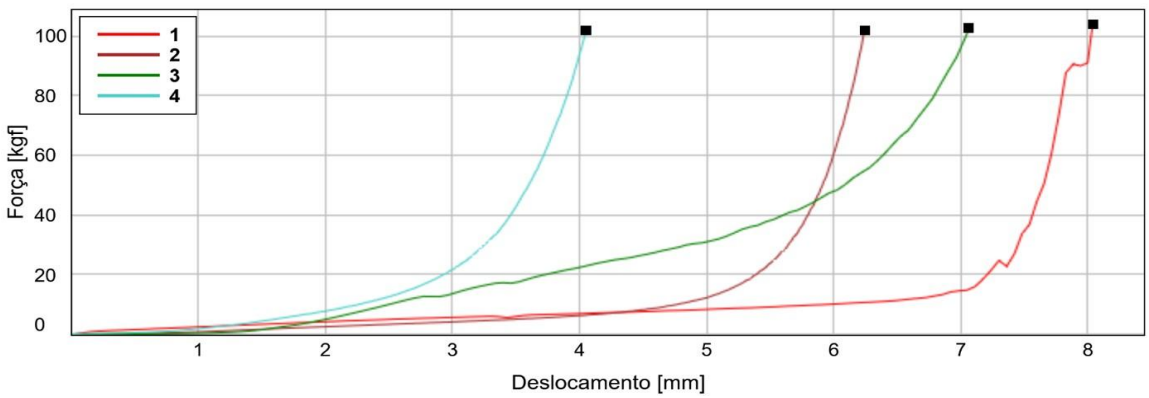
Fonte: Autores (2026).

Gráfico 2 – Resultados do ensaio de Squeeze-flow para T-10C



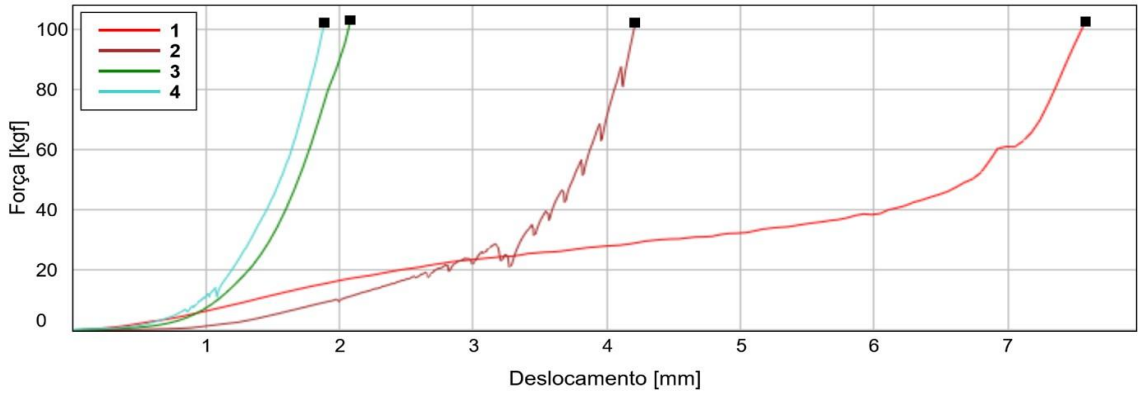
Fonte: Autores (2026).

Gráfico 3 – Resultados do ensaio de Squeeze-flow para T-20C



Fonte: Autores (2026).

Gráfico 4 – Resultados do ensaio de Squeeze-flow para T-10FB

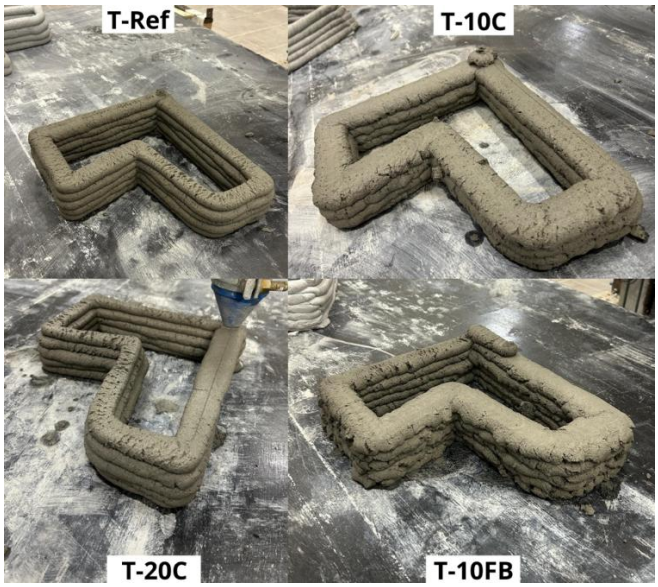


Fonte: Autores (2026).

A tendência do T-10FB é qualitativamente compatível com Duan *et al.* (2022), que observaram aumento expressivo das tensões de escoamento e da viscosidade com 10% de metacaulim, acompanhado por maior capacidade de empilhamento. Como as grandezas não são equivalentes às obtidas no *squeeze-flow*, a comparação é apenas de tendência. A dispersão observada também deve ser analisada com cautela, pois Cardoso, Pileggi e John (2010) destacam a sensibilidade do método às condições de mistura e homogeneização.

A avaliação conjunta de densidade, consistência e *squeeze-flow* mostra que a imprimibilidade resulta do equilíbrio entre ar incorporado, água, finos e metacaulim. Apesar das diferenças reológicas, todas as formulações submetidas à impressora tipo pórtico resultaram na produção de peças (Figura 2), inclusive aquelas com redução do consumo de cimento, confirmando viabilidade operacional preliminar nas condições estudadas.

Figura 2 – Peças extrudadas com os quatro traços



Fonte: Autores (2026).

A inspeção visual complementou os ensaios de bancada ao permitir avaliar continuidade do cordão, retenção geométrica e regularidade das camadas. Como não foram medidos vazão, pressão de bombeamento ou número limite de camadas, a comparação entre peças permanece qualitativa e deve ser interpretada em conjunto com os resultados reológicos.

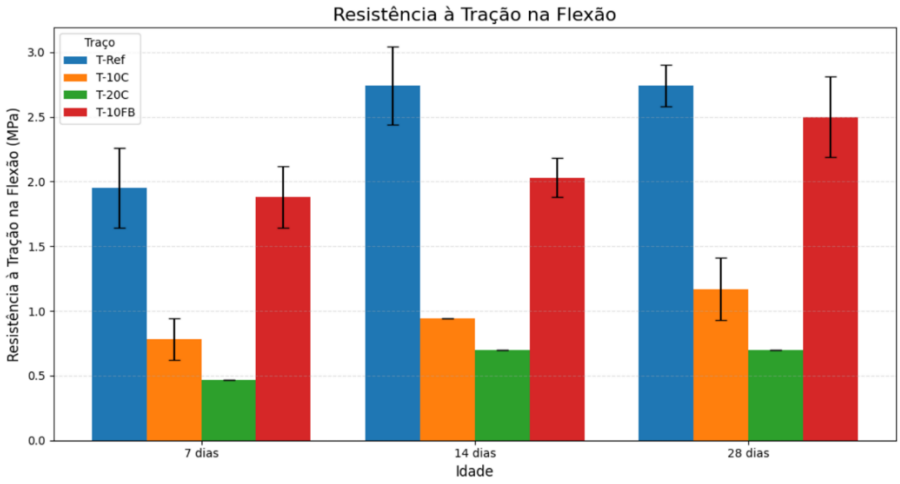
Considerando o estado endurecido, os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão são apresentados na Tabela 4 e nos Gráficos 5 e 6. Eles evidenciam dois comportamentos principais: os traços T-10C e T-20C apresentaram desempenho inferior ao de referência, enquanto o T-10FB apresenta resultados similares aos do traço de referência na resistência à tração na flexão considerando os desvios-padrão e apresentou o melhor comportamento na resistência à compressão.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de Resistência à Tração na Flexão e à Compressão

Traço	Tração na Flexão			Compressão		
	7 dias (MPa)	14 dias (MPa)	28 dias (MPa)	7 dias (MPa)	14 dias (MPa)	28 dias (MPa)
T-Ref	1,95 ± 0,31	2,74 ± 0,30	2,74 ± 0,16	7,28 ± 0,75	8,35 ± 0,09	9,16 ± 0,47
T-10C	0,78 ± 0,16	0,94 ± 0	1,17 ± 0,24	3,62 ± 0,24	4,61 ± 0,39	4,62 ± 0,37
T-20C	0,47 ± 0	0,70 ± 0	0,70 ± 0	3,33 ± 0,14	4,00 ± 0,31	4,67 ± 0,61
T-FB	1,88 ± 0,24	2,03 ± 0,15	2,50 ± 0,31	8,07 ± 0,93	9,05 ± 0,64	11,45 ± 0,83

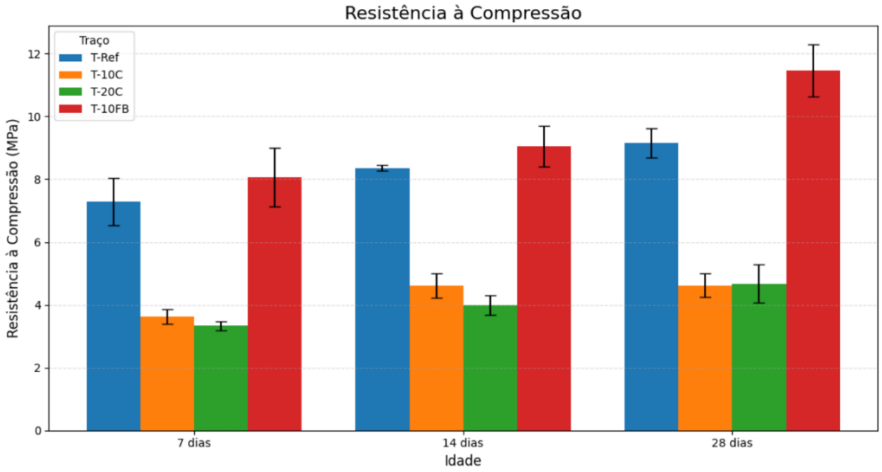
Fonte: Autores (2026).

Gráfico 5 – Resultados comparativos do ensaio de Resistência à Tração na Flexão



Fonte: Autores (2026).

Gráfico 6 – Resultados comparativos do ensaio de Resistência à Compressão



Fonte: Autores (2026).

Observa-se ainda que o aumento de 10% (T-10C) para 20% (T-20C) de metacaulim em substituição ao cimento não alterou significativamente os resultados de resistência à compressão.

O melhor desempenho do T-10FB é coerente com sua formulação: o cimento foi integralmente mantido e o metacaulim substituiu parte do filler de brita, acrescentando efeito de preenchimento e atividade pozolânica, além de apresentar menor relação água/aglomerante. Esse desempenho era esperado por não haver redução do cimento; em contrapartida, T-10C e T-20C atendem mais diretamente ao objetivo ambiental de reduzir seu consumo.

A menor resistência de T-10C e T-20C não deve ser atribuída apenas ao metacaulim substituindo o cimento. A maior disponibilidade de água necessária à extrusão e o ar incorporado pelo LSS podem aumentar a porosidade da matriz endurecida. Diniz (2023) observou comportamento semelhante, com maior relação água/ligantes favorecendo a vazão, mas reduzindo a resistência à compressão, evidenciando o compromisso entre processabilidade e desempenho mecânico.

As diferenças em relação à literatura reforçam a influência da dosagem global: Duan *et al.* (2022) observou maior desenvolvimento de resistência com 5% e 10% de substituição de cimento por metacaulim, enquanto Michel *et al.* (2024) obteve 37,06 MPa aos 14 dias com adição de metacaulim. Proporções, aditivos e relações água/aglomerante distintas impedem atribuir o comportamento mecânico somente ao teor de metacaulim.

Quanto à aplicação, os resultados de resistência à compressão isolados não são suficientes para classificar os materiais como adequados ao uso estrutural, uma vez que essa avaliação também requer ensaios de aderência entre camadas, análise da anisotropia e caracterização do desempenho das peças impressas. Entretanto, os materiais apresentam

potencial para a produção de elementos de vedação. Como referência de ordem de grandeza, a ABNT NBR 6136 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016) estabelece classes de blocos de vedação com resistência à compressão a partir de 3 MPa.

Mesmo com desempenho inferior à referência, T-10C e T-20C permaneceram em uma ordem de grandeza compatível com componentes de vedação, enquanto T-Ref e T-10FB apresentaram valores superiores. Assim, as formulações demonstram potencial para elementos de vedação e outros componentes não estruturais; para aplicações estruturais, seriam necessárias validações adicionais. A redução de resistência, portanto, não inviabiliza a proposta quando considerada a combinação entre imprimibilidade, desempenho suficiente e menor impacto ambiental.

Os resultados do ensaio de ultrassom, apresentados na Tabela 6, complementam a avaliação mecânica.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de Ultrassom

Traço	Velocidade Média (m/s)	Módulo de Elasticidade (GPa)
T-Ref	2643,78	12,48
T-10C	2392,56	9,83
T-20C	2202,44	8,86
T-FB	2779,00	12,43

Fonte: Autores (2026).

A velocidade ultrassônica e o módulo de elasticidade dinâmico acompanharam, em geral, as resistências: os traços T-10C e T-20C apresentaram menores valores que a referência, enquanto T-10FB alcançou a maior velocidade e rigidez dinâmica semelhante ao T-Ref. A tendência é compatível com a influência da porosidade, pois água excedente e ar incorporado podem gerar descontinuidades que dificultam a propagação da onda e reduzem resistência e rigidez. Nesse sentido, o LSS apresenta efeito duplo: no estado fresco favorece moldabilidade, plasticidade, menor densidade e impressão; no estado endurecido, o aumento de vazios pode contribuir para a redução das propriedades mecânicas e ultrassônicas. Essa relação reforça a necessidade de otimizar o teor de ar incorporado.

Para o módulo de elasticidade dinâmico, não foi encontrado entre os estudos utilizados procedimento diretamente equivalente à ABNT NBR 15630 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008). Duan *et al.* (2022) observou aumento de módulo elástico por metodologia distinta e em idades iniciais; portanto, os valores não são diretamente comparáveis. No presente estudo, a menor rigidez de T-10C e T-20C acompanhou as menores resistências e velocidades ultrassônicas, enquanto T-10FB permaneceu próximo à referência.

A análise integrada confirma que T-10FB apresentou o melhor desempenho mecânico por preservar todo o cimento, mas não oferece a mesma redução dos impactos ao meio ambiente dos traços T-10C e T-20C. Estes apresentaram resistência e rigidez inferiores, porém reduziram o consumo de cimento sem inviabilizar a extrusão e mostraram potencial para elementos de vedação. A otimização futura da água, do ar incorporado e do sistema de aditivos, especialmente com superplastificantes, pode melhorar o desempenho mantendo os benefícios ambientais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando que este trabalho teve como objetivos desenvolver uma argamassa para manufatura digital aditiva, com substituição parcial do cimento Portland por metacaulim, e compatibilizar as propriedades necessárias à extrusão com o desempenho físico, reológico e mecânico do material, conclui-se que os objetivos propostos foram alcançados, uma vez que foi possível desenvolver, caracterizar e comparar diferentes formulações. Além dos traços T-10C e T-20C, foi desenvolvida a formulação T-10FB, permitindo comparar diferentes formas de incorporação do metacaulim. No estado fresco, todas as formulações apresentaram condições adequadas para os testes de extrusão e produção das peças, embora tenham sido observadas diferenças relacionadas ao teor de metacaulim, à quantidade de água, aos agregados, aos finos e aos aditivos, destacando-se a elevada demanda de água. No estado endurecido, o T-10FB apresentou o melhor desempenho global, enquanto T-10C e T-20C apresentaram reduções nas propriedades mecânicas em relação à referência, sem, contudo, inviabilizar sua extrusão e produção de peças. Assim, embora essas formulações não possam ser classificadas como adequadas para aplicações estruturais apenas com base nos ensaios realizados, apresentam potencial para elementos de vedação e outros componentes não estruturais. Os resultados demonstram a viabilidade preliminar de conciliar imprimibilidade, desempenho e redução do consumo de cimento, estabelecendo uma base para o aprimoramento das formulações.

Como continuidade da pesquisa, recomenda-se reproduzir os traços contendo substituição parcial do cimento e da fração fina por metacaulim, promovendo novos ajustes no sistema de aditivos. Em especial, sugere-se avaliar a utilização de aditivos superplastificantes ou redutores de água, com o objetivo de diminuir as relações água/cimento e água/aglomerante sem comprometer a trabalhabilidade, a bombeabilidade e a extrudabilidade das misturas. Recomenda-se também estudar a otimização do teor de incorporador de ar, buscando preservar seus benefícios para a moldabilidade e para o processo de impressão sem introduzir quantidade excessiva de vazios na matriz endurecida. Adicionalmente, trabalhos futuros poderão avaliar diretamente as propriedades mecânicas

de elementos impressos, a aderência entre camadas, a capacidade de empilhamento e a durabilidade das formulações.

Dessa forma, os resultados obtidos são considerados satisfatórios para o caráter investigativo deste trabalho e demonstram que o metacaulim apresenta potencial para utilização em argamassas destinadas à manufatura digital aditiva. As limitações identificadas não inviabilizam as formulações estudadas, mas indicam caminhos objetivos para sua otimização, especialmente no que se refere ao controle da água e dos aditivos, possibilitando avançar no desenvolvimento de materiais imprimíveis com melhor equilíbrio entre desempenho técnico e sustentabilidade.

6. REFERÊNCIAS

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15630** – 2008 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

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

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

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

CARDOSO, Fabio A.; PILEGGI, Rafael G.; JOHN, Vanderley M**. Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento da Engenharia de Construção Civil, CONSITRA. 2010, 31 p. Disponível em: https://repositorio.usp.br/item/002188836 . Acesso em: 16 abr. 2026.

CECATTO, Pedro Costa. **Argamassa geopolimérica: impressão 3D com rejeito de mineração.** Orientador: Alfonso Pappalardo Junior. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2025. Disponível em: https://dspace.mackenzie.br/items/ec4a09bf-ccd4-46ee-9084-cbe21a2b309e/full . Acesso em: 13 mar. 2026.

DUAN, Zhenhua; LI, Lei; YAO, Qinye; ZOU, Shuai; SINGH, Amardeep; YANG, Haifeng. **Effect of metakaolin on the fresh and hardened properties of 3D printed cementitious composite. Construction And Building Materials.** Shanghai, v. 350, p. 128808, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128808. Acesso em: 23 mar. 2026.

DINIZ, Hugo Alessandro Almeida. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE METACAULIM E DAS RELAÇÕES AREIA/LIGANTES E ÁGUA/ LIGANTES NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS PARA IMPRESSÃO 3D**. 2023. 113 f. (Tese - Doutorado - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

MARTINS, Karenn de Cássia Magalhães et al. Dosagem de concretos para impressão 3D considerando a operacionalização da impressora e o sistema de bombeamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 64., 2023, Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis: IBRACON, 2023. p. 1-11. ISSN 2175-8182.

MICHEL, Júlia; EFFTING, Carmeane; SCHACKOW, Adilson; SAFANELLI, Nicollas; SOARES, Thalian Valente. Materiais cimentícios para impressão 3D. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UDESC, 34., 2024, Florianópolis. **Resumos [...]**. Florianópolis: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2024. p. 1-4.

METACAULIM DO BRASIL. **Metacaulim HP ULTRA:** ficha técnica e propriedades. Jundiaí, (2026). Diponível em: https://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html . Acesso em: 20 jun. 2026.

MINERAÇÃO EMBU. **Produtos.** Disponível em: https://embusa.com.br/?page_id=1719 . Acesso em: 20 de jun. 2026.

RAHUL, A.V.; SANTHANAM, Manu; MEENA, Hitesh; GHANI, Zimam. **3D printable concrete: Mixture design and test methods.** *Cement And Concrete Composites***.** Madras, p. 13-23. dez. 2018.

RAHMAN, M.; RAWAT, S.; YANG (Chunchui), R. (Chunchui); MAHIL, A.; ZHANG, Y.X. **A comprehensive review on fresh and rheological properties of 3D printable cementitious composites**. Journal of Building Engineering. v.91, 2024, 109719. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109719. Acesso em: 12 abr. 2025.

Contatos: sophia.yazbek@mackenzista.com.br ; roberta.franzin@mackenzie.com

Declaração de uso de IA: Para esse artigo, foi utilizada a Inteligência Artificial (IA) Gemini e Chat GPT para as seguintes funções: revisão gramatical e de coesão, auxílio na estruturação de parágrafos, tratamento e organização de referências.