



De 17/07/2024 a 20/07/2024
Fortaleza, Ceará.
DOI: 10.5281/zenodo.12772878

Congresso Brasileiro de Patologia das Construções

DOSAGEM DE ARGAMASSA PARA IMPRESSÃO 3D: CARACTERÍSTICAS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

Vinícius Capistrano de Paiva Veras^{1*}, Lucas Ramiro Burgos¹; Antônio Eduardo Bezerra Cabral¹; Alexandre Araújo Bertini¹

*Autor de contato: viniciuscapistrano@alu.ufc.br

¹ Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil

RESUMO

O crescente interesse na construção aditiva utilizando o método 3DCP se espalhou por diversas cidades ao redor do mundo. Por esta razão, a compatibilidade dos materiais locais com estas novas tecnologias devem ser analisadas. Inicialmente, para este trabalho optou-se pelo estudo da dosagem da argamassa de impressão utilizando cimento, areia, água e aditivos químicos (superplastificantes e modificador de viscosidade), os quais foram caracterizadas suas propriedades físicas e granulométricas. Foi utilizado um método de dosagem baseado no Método ACI (American Concrete Institute) e foram testadas 6 (seis) dosagens. Testes de fluidez e *squeeze-flow* são realizados para obter características reológicas. Posteriormente, a resistência à flexão e compressão dos corpos de prova é testada nas idades de 7 e 28 dias para compreensão do comportamento mecânico. As análises mostram que os melhores resultados de resistência mecânica são obtidos com a mistura T5 com a relação Cimento:Areia 1:3, satisfazendo os requisitos de impressão.

Palavras-chave: 3DCP; argamassa; dosagem.

ABSTRACT

The rising interest in additive construction using the 3DCP method has spread to several cities around the world. For this reason, the compatibility of local materials with these new technologies must be analyzed. Initially, for this work it was decided to study the dosage of printing mortar using cement, sand, water and chemical additives (superplasticisers and viscosity modifiers), which were characterized for their physical and granulometric properties. A dosage method based on the ACI Method (American Concrete Institute) was used and six (6) dosages were tested. Flow and squeeze flow tests were carried out to obtain rheological characteristics. Subsequently, the flexural and compressive strengths of the specimens were tested at 7 and 28 days to understand their mechanical behaviour. The analyses show that the best mechanical strength results are obtained with the mixture T5 with the Cement:Sand ratio 1:3, satisfying the printing requirements.

Keywords: 3DCP; mortar; dosage.

1. INTRODUÇÃO

No setor de construção, a impressão tridimensional de concreto (3DCP) é um dos desenvolvimentos mais inovadores dos últimos anos. Essa nova metodologia de trabalho elimina a necessidade de cofragem tradicional e reduz a quantidade de mão de obra, levando a reduções

significativas de tempo e custo. A maioria dos procedimentos de 3DCP envolve o uso de um bocal, que pode ser montado em um pórtico ou braço robótico, para depositar com precisão o material cimentício durante todo o processo de construção (BUSWELL *et al.*, 2018). É importante destacar as qualidades do material cimentício, pois, durante a fase inicial de cura, ele deve garantir que a estrutura não se deforme sem a presença de formas e que as diferentes camadas adiram corretamente umas às outras (WANGLER *et al.*, 2019).

São fundamentais para o sucesso do processo de impressão 3D do concreto a capacidade do material cimentício de ser ejetado corretamente do bocal (conhecida como extrudabilidade), a capacidade de permanecer suficientemente rígido para suportar o peso das camadas subsequentes (conhecida como construtibilidade) e as resistências mecânicas de acordo com o projeto. A dosagem de uma mistura de argamassa que atenda aos requisitos reológicos estreitos de extrudabilidade e construtibilidade é vital para a impressão 3D confiável e para a adoção generalizada dessa tecnologia no setor de construção. É necessário esclarecer que, ao longo deste trabalho, os termos concreto e argamassa serão considerados sinônimos, pois se trata de um concreto sem agregado graúdo.

O 3DCP estabelece restrições reológicas mais rígidas do que os métodos convencionais de construção de concreto para realizar a sequência de processos (bombeamento, extrusão e deposição das camadas subsequentes) (PERROT; AMZIANE, 2019). Para garantir que uma mistura de cimento seja fluida e consistente durante todo o processo de impressão e, ao mesmo tempo, tenha resistência adequada para suportar camadas sucessivas em uma idade inicial, é fundamental examinar as propriedades reológicas antes da deposição do material (PERROT; RANGEARD; PIERRE, 2016). Os requisitos reológicos não podem ser generalizados, pois devem atender aos requisitos específicos da impressora para manter uma boa extrudabilidade e capacidade de construção. A facilidade dessas propriedades na impressão 3D de concreto é frequentemente influenciada pela fluidez e pelas propriedades do cimento. Portanto, é importante considerar ambos os fatores para caracterizar com precisão a extrudabilidade e a capacidade de construção do processo 3DCP.

Neste estudo, para medir a reologia da mistura de argamassa, são usados os testes de espalhamento e o *Squeeze-Flow*, seguindo as normas brasileiras correspondentes. Embora vários estudos tenham explorado a influência das proporções da mistura no concreto extrudável e edificável, poucos tentaram sistematicamente otimizar a mistura. Apesar de vários estudos empíricos de projeto de mistura para 3DCP, não há abordagens de projeto de mistura universalmente reconhecidas e poucos desses estudos de pesquisa incorporaram a resistência do material endurecido para a otimização do projeto de mistura.

Uma crítica ao uso do método 3DCP na construção é o alto uso de cimento Portland, que é conhecido por ter um impacto significativo no meio ambiente (MOHAN *et al.*, 2021). Entretanto, o 3DCP pode se tornar sustentável com a adição de materiais cimentícios suplementares, como cinzas volantes, sílica ativa, entre outros, para substituir parcialmente o cimento na mistura (LE *et al.*, 2012). Aditivos como redutores de água de alta qualidade, resistência inicial e outros aditivos também são usados para obter a reologia desejada ou melhorar o desempenho de trabalho das misturas de 3DCP..

Os superplastificantes (SP) são frequentemente usados em misturas de 3DCP para melhorar a fluidez e reduzir a quantidade de água necessária. A maioria das misturas de 3DCP não contém agregados graúdos, o que pode aumentar a fração de empacotamento do material e melhorar seu limite elástico aparente ao escoamento, ou a quantidade de força necessária para fazê-lo fluir. No

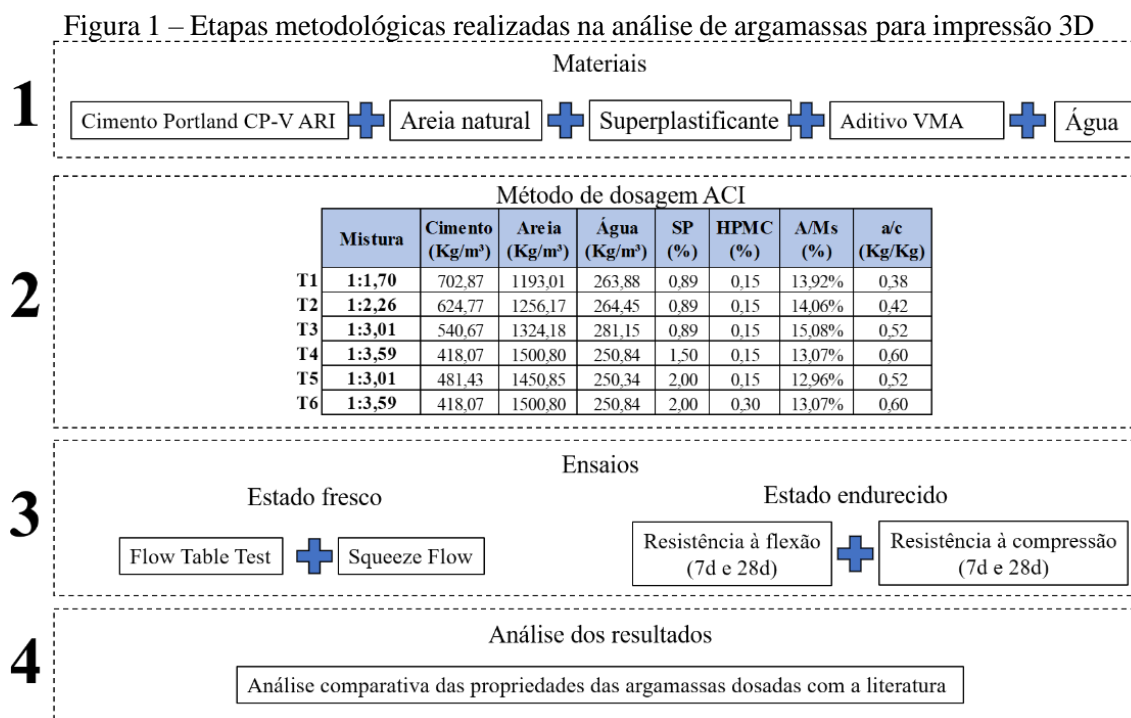
entanto, os SPs atuam reduzindo a tensão superficial da água na mistura e permitindo que as partículas fluam mais facilmente, o que pode diminuir o limite elástico aparente e neutralizar parcialmente o efeito do aumento da fração de empacotamento.

O sucesso da impressão de concreto 3D depende muito da seleção de materiais e do desenho da mistura para garantir a extrudabilidade e a capacidade de construção (ŞAHIN; MARDANI-AGHABAGLOU, 2022). Essas características são cruciais para determinar a capacidade da mistura de fluir pelo bico de impressão, manter sua forma após a extrusão e ter o necessário para suportar as camadas subsequentes durante o processo de impressão. O projeto de misturas para impressão de concreto 3D limita-se à seleção de algumas matérias-primas e à otimização de suas proporções por meio de métodos de tentativa e erro.

O objetivo da pesquisa apresentada aqui é determinar as proporções de materiais locais que podem obter uma mistura com características aceitáveis de extrudabilidade, capacidade de construção e resistência do material da argamassa endurecida. Neste trabalho, foi usado um método de dosagem baseado no método do American Concrete Institute (ACI). Atualmente, não existe um método normalizado para quantificar a extrudabilidade e a capacidade de construção de uma argamassa para impressão 3D.

2. METODOLOGIA

O trabalho foi dividido em quatro etapas. A primeira incluiu a seleção de materiais. A segunda teve como objetivo a dosagem de argamassas usando o método ACI. A terceira etapa incluiu a realização de testes no estado fresco e endurecido. No estado fresco, o índice de consistência de cada argamassa foi determinado usando o *Flow Table Test* e o *Squeeze-Flow*, e no estado endurecido, o desempenho mecânico das argamassas de impressão 3D foi analisado através dos ensaios de resistência à flexão e compressão. E uma etapa final em que os resultados obtidos foram comparados com os resultados de outras pesquisas semelhantes. As etapas são mostradas na Figura 1.



Fonte: os autores.

2.1. Materiais

Os materiais empregados na produção das argamassas para impressão 3D consistiram em: cimento Portland (CP) CP-V de alta resistência inicial, produzido e vendido na Região Metropolitana de Fortaleza; areia natural (AREIA) como agregado, também proveniente da região; como aditivos, foram utilizados o modificador de viscosidade antissegregante (VMA) Centrament VMA MC e o superplastificante (SP) MC Powerflow 3700. Os materiais foram usados para produzir todas as misturas de argamassa dosadas.

Para caracterizar os materiais utilizados, inicialmente foram realizados ensaios de granulometria a laser e de massa específica no cimento, de acordo com as normas ISO 13320 (2020) e NBR 16605 (ABNT, 2017), respectivamente. Para o agregado, foram realizados os ensaios de análise granulométrica, massa específica, absorção de água, massa unitária, índice de vazios e teor de finos, de acordo com as normas NBR 17054 (ABNT, 2022), NBR 16916 (ABNT, 2021), NBR 16916 (ABNT, 2021), NBR 16972 (ABNT, 2021), NBR 16972 (ABNT, 2021) e NBR 16973 (ABNT, 2021), respectivamente. Os resultados são mostrados no Quadro 1.

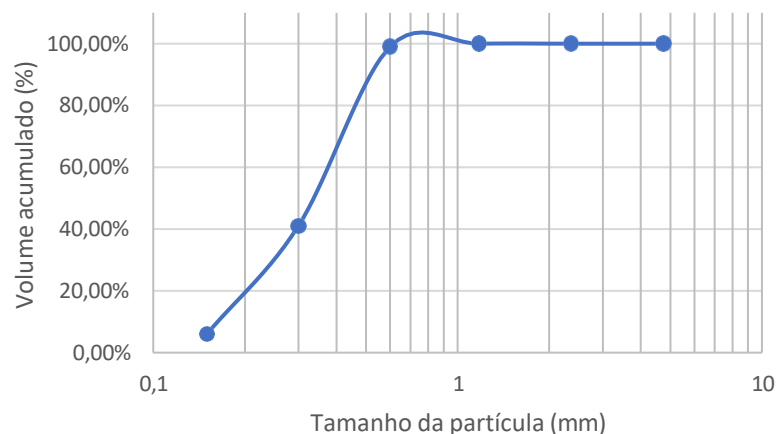
Quadro 1 – Caracterização dos materiais

Materiais	Ensaio de caracterização	Norma	Resultado
Cimento Portland CP-V-ARI	Diâmetro médio da partícula (μm)	ISO 13320 (2020)	18.84
	Massa específica (g/cm^3)	NBR 16605 (ABNT, 2017)	3.16
Areia natural	Massa específica (g/cm^3)	NBR 16916 (ABNT, 2021)	2.56
	Absorção de água por imersão (%)	NBR 16916 (ABNT, 2021)	1.01
	Massa unitária (Kg/m^3)	NBR 16972 (ABNT, 2021)	1475.00
	Índice de vazios (%)	NBR 16972 (ABNT, 2021)	40.82
	Teor de finos (%)	NBR 16973 (ABNT, 2021)	2.20

Fonte: os autores.

A análise da curva granulométrica, mostrada na Figura 2, revela que a dimensão máxima do agregado é de 0,60 mm. A maior parte do material está na faixa entre 0,10 e 0,30 mm, o que significa que o material é bastante fino. De acordo com a granulometria, o módulo de finura (MF) do material é de 1,54.

Figura 2 – Distribuição do tamanho das partículas do agregado



Fonte: os autores

2.2. Método de dosagem

O método de dosagem das proporções dos materiais escolhidos é baseado no método do American Concrete Institute (ACI). A diferença está na ausência de agregados graúdo. Todas as quantidades são determinadas por massa.

Primeiro, o tamanho máximo da partícula de areia é usado para determinar a quantidade de água e a porcentagem do conteúdo de ar natural. Uma porcentagem da quantidade de água é reduzida de acordo com a recomendação do fabricante do aditivo superplastificante (SP). Em seguida, a relação água/cimento é determinada com a ajuda do gráfico da lei de Abrams das resistências desejadas. A quantidade de água e a proporção mencionada acima são usadas para determinar a quantidade de cimento. Por fim, é determinada a quantidade de areia necessária, juntamente com água, ar natural e cimento, para completar um volume teórico total de um (1) metro cúbico. Isso é feito usando as densidades de cada material. As quantidades de aditivos químicos são determinadas como uma porcentagem da massa de cimento. Os projetos de mistura são mostrados no Quadro 2.

Quadro 2 – Projetos de mistura testados para argamassa de impressão 3D (kg/m³)

Mistura	CP	AREIA	a/c	SP	VMA
T1	703	1193	0,38	6,26	1,05
T2	588	1329	0,45	5,23	0,88
T3	481	1451	0,52	4,28	0,72
T4	418	1501	0,60	6,27	0,63
T5	481	1451	0,52	9,63	0,72
T6	418	1501	0,60	8,36	1,25

Fonte: os autores.

2.3. Ensaio no estado fresco

2.3.1. Flow Table Test

Para verificar a capacidade de construção do projeto de mistura, foi realizado o ensaio de espalhamento obtido no aparato *Flow table*, conforme os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2016), para a determinação do índice de consistência do material dosado.

Logo após a preparação da argamassa, a mesma foi utilizada para o enchimento do molde troncônico, colocando-o de modo centralizado sobre a mesa para índice de consistência. São colocadas três camadas sucessivas e aplica-se em cada uma delas, respectivamente, quinze, dez e cinco golpes com o soquete, de maneira a distribuí-las uniformemente. Em seguida, a mesa de consistência foi acionada com 30 golpes no período de 30 s, permitindo o livre espalhamento da mistura sobre a mesa. Após isso, o índice de consistência foi medido através do diâmetro médio da argamassa espalhada, sendo determinado em três direções perpendiculares (Figura 3).

Figura 3 – Ensaio de espalhamento da argamassa de impressão 3D



Fonte: os autores.

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

2.3.2. Squeeze-Flow Test

O ensaio denominado *squeeze-flow* surgiu como uma técnica promissora para a avaliação do comportamento reológico de argamassas e outros materiais de construção. O experimento é capaz de avaliar materiais com qualquer nível de consistência, sendo significativamente interessante para a caracterização de argamassas, pois a mudança geométrica inerente ao ensaio simula condições do processamento desses materiais como nas etapas de espalhamento, nivelamento e acabamento.

A reometria por *squeeze-flow* consiste na compressão de uma amostra cilíndrica de 100 mm de diâmetro e 10 mm de altura entre duas placas paralelas. Assim como na reometria rotacional, o ensaio pode ser realizado com controle por força ou por deslocamento. No primeiro caso, uma determinada força é aplicada ao material e a deformação resultante é registrada, enquanto no segundo caso o material é submetido a um deslocamento efetuado com velocidade constante e a força é medida (ENGMANN *et al.*, 2005).

De acordo com a NBR 15839 (ABNT, 2010), o ensaio deve ser executado em duas velocidades de deslocamento 0,1 mm/s e 3 mm/s, em corpos-de-prova diferentes. Eles devem ser preparados, moldados e posicionados cuidadosamente na máquina de ensaio de compressão (Figura 4). O final do ensaio ocorre quando o deslocamento da placa superior atingir 9 mm ou a carga máxima de 1 kN.

Figura 4 – *Squeeze-Flow Test*

Fonte: os autores.

2.4. Ensaios no estado endurecido

2.4.1. Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão seguiu os procedimentos da NBR 13279 (ABNT, 2005). Inicialmente, moldou-se 3 corpos-de-prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) para a realização do ensaio para a idade de 7 e 28 dias. Utilizando-se dos moldes prismáticos com uma fina camada de óleo nas faces internas, adensou-se a argamassa em duas camadas aplicando 30 quedas por camada na mesa de espalhamento por 30 segundos. Após desmoldados e curados nas idades determinadas, leva-se os corpos-de-prova à prensa (Figura 5).

Figura 5 – Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: os autores.

2.4.2. Resistência à compressão

Ainda de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), utilizou-se as metades dos três corpos-de-prova do ensaio de flexão para a determinação da resistência à compressão (Figura 6), totalizando seis corpos-de-prova para as mesmas idades (7 e 28 dias).

Figura 6 – Ensaio de resistência à compressão



Fonte: os autores.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Ensaios no estado fresco

3.1.1. Flow Table Test

Para a verificação da capacidade de construção dos projetos de mistura dosados, com base no ensaio de espalhamento realizado no aparato *Flow table*, tem-se os resultados mostrados no Quadro 3 a seguir. Analisando o quadro, é possível perceber que todos os resultados de espalhamento das argamassas estão dentro das faixas relatadas por pesquisas anteriores, descritas na seção 2.3.1 da metodologia deste trabalho. Entretanto, analisando a Figura 7, é possível observar que os melhores espalhamentos ocorreram para as argamassas T1, T2 e T5. Portanto, essas argamassas foram selecionadas para a análise da reometria através do *Squeeze-Flow Test*.

Quadro 3 – Resultados do ensaio de espalhamento da argamassa

Mistura	Média (cm)
T1 (1:1,70)	21,60
T2 (1:2,26)	22,79
T3 (1:3,01)	14,96
T4 (1:3,59)	17,69
T5 (1:3,01)	19,55
T6 (1:3,59)	17,59

Fonte: os autores.

Figura 7 – Espalhamento de argamassas T1 a T6

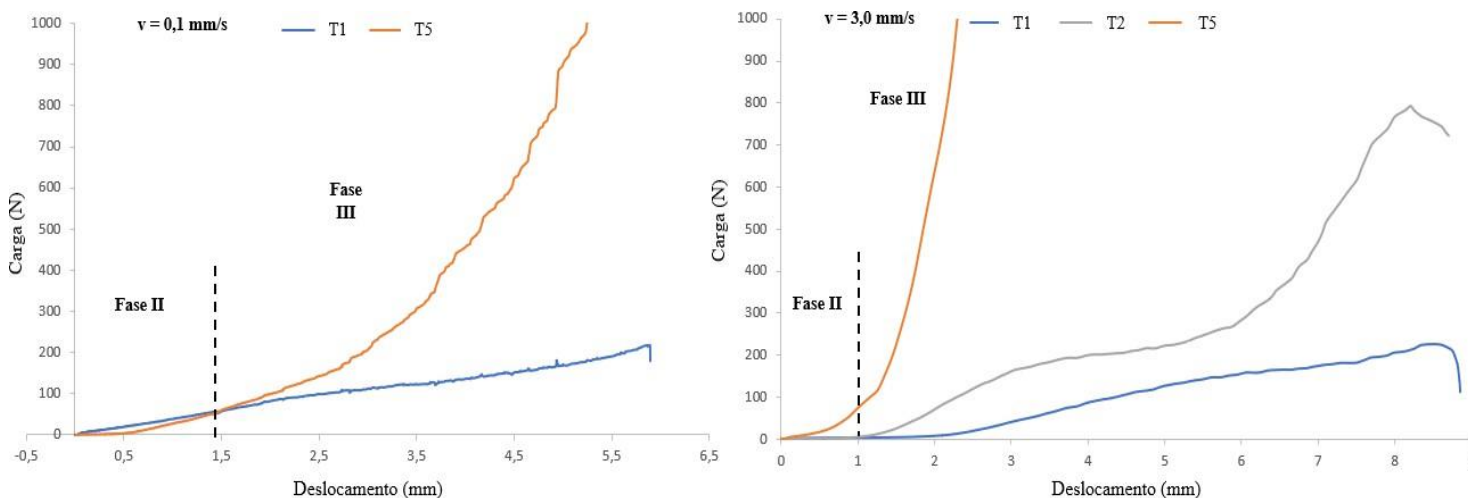


Fonte: os autores.

3.1.2. Squeeze-Flow Test

Os resultados dos testes de *Squeeze-Flow* são expressos de maneira simples e direta, como gráficos de carga vs. deslocamento e o perfil típico obtido do ensaio apresenta 3 regiões bem definidas. Na Fase I, em pequenas deformações, o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica linear e está relacionado à tensão de escoamento do material. Na Fase II, caracterizada por altos deslocamentos e pequena variação de carga, a compressão resulta em deformação radial e de cisalhamento superando as forças que mantinham o material sob comportamento elástico e, assim, o mesmo flui por deformação plástica. Na Fase III ocorre um aumento expressivo da carga necessária para prosseguir a deformação do material, que possui pouca variação.

Figura 8 – Resultados do ensaio Squeeze-Flow para as velocidades 0,1 mm/s e 3,0 mm/s



Fonte: os autores.

Através da Figura 8, é possível verificar que para a velocidade de ensaio igual a 0,1 mm/s, inicialmente, na Fase II, ambas as argamassas (T1 e T5) tiveram comportamentos semelhantes. No entanto, na Fase III, a argamassa T1 deformou mais facilmente que a argamassa T5, necessitando de uma menor carga para um maior deslocamento. Os deslocamentos máximos para as argamassas T1 e T5 foram iguais a 5,90 mm e 1,76 mm, respectivamente. Esse resultado era esperado, levando em consideração seu espalhamento, que foi superior ao da argamassa T5. Para essa velocidade não foi possível obter os dados da argamassa T2.

Na velocidade de ensaio igual a 3,0 mm/s, verifica-se um comportamento similar entre as argamassas T1 e T2 na Fase II. Na Fase III, a argamassa T5 foi a que apresentou maior resistência a deformação, necessitando de altas cargas para pouco deslocamento. Os deslocamentos máximos para as argamassas T1, T2 e T5 foram iguais a 8,86 mm, 7,48mm e 2,29 mm, respectivamente. Isso

se deu em razão desta argamassa possuir maior proporção de agregado em relação ao cimento, o que fez com que seu espalhamento fosse um pouco menor do que as demais. Portanto, em relação a reologia do material, é possível inferir que os valores de tensão de escoamento e viscosidade plástica são maiores para a argamassa T5.

3.2. Ensaio no estado endurecido

Para os testes de resistência à tração na flexão das argamassas dosadas, realizados de acordo com os procedimentos da NBR 13279 (ABNT, 2005) nas idades de 7 e 28 dias, obteve-se os resultados mostrados no Quadro 4. Os resultados obtidos mostram que o concreto com a menor relação água/cimento, ou seja, o teste T1, teve melhor desempenho em termos de resistência à flexão. Sabe-se que uma mistura com menor relação água/cimento possibilita a produção de um concreto menos poroso, que resistirá melhor às tensões de flexão e compressão porque resiste à propagação de microfissuras que se concentram nos vazios dentro do concreto. A diferença entre as resistências da amostra T5 em comparação com a T1 é proporcional, nesse caso, à diminuição da quantidade de cimento.

Quadro 4 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão da argamassa

Mistura	Resistências (MPa)	
	7 dias	28 dias
T1 (1:1,70)	11,70	11,60
T2 (1:2,26)	8,90	8,80
T3 (1:3,01)	5,80	5,40
T4 (1:3,59)	5,70	5,40
T5 (1:3,01)	7,40	7,80
T6 (1:3,59)	7,50	6,30

Fonte: os autores.

Por outro lado, para os ensaios de resistência à compressão, foram obtidos os resultados mostrados no Quadro 5 a seguir. Como no caso da resistência à flexão, o mesmo se aplica à resistência à compressão quanto à relação a/c e seus valores de resistência. O teste T1, teve o melhor desempenho em termos de resistência à compressão. Da mesma forma, a mistura de T4 e T6 apresentou o desempenho mais baixo em termos de resistência à compressão. Além do fato de que, para ambas as misturas, a relação a/c foi comparativamente maior do que nas demais dosagens, observa-se também o menor consumo de cimento dessas misturas, o que faz sentido, uma vez que a obtenção de concretos de alta resistência e durabilidade está comumente associada ao alto consumo de cimento Portland.

Quadro 5 – Resultados do ensaio de resistência à compressão da argamassa

Mistura	Resistências (MPa)	
	7 dias	28 dias
T1 (1:1,70)	43,34	50,46
T2 (1:2,26)	37,34	38,09
T3 (1:3,01)	21,45	19,29
T4 (1:3,59)	28,17	26,69
T5 (1:3,01)	32,65	36,76
T6 (1:3,59)	25,85	31,09

Fonte: os autores.

É importante observar que o SP adicionado à mistura T5 permitiu uma melhor dispersão das partículas da mistura de concreto, o que corroborou sua eficácia e resultados na resistência à compressão. As propriedades do concreto no estado endurecido são afetadas pelas propriedades no estado de escoamento. Concretos mais bem dispersos atingem resistências à compressão mais altas.

4. CONCLUSÃO

Ao analisar os resultados, foi possível observar que o espalhamento das argamassas produzidas apresentou melhores valores para T1, T2 e T5. Através da verificação do comportamento da reologia pelo *Squeeze-Flow Test*, verificou-se que a argamassa T5 respondeu melhor ao perfil característico do ensaio, com as fases bem definidas. Foi a argamassa que obteve maior resistência ao deslocamento, possuindo a melhor capacidade de construção entre as demais, parâmetro essencial para a uso na impressão 3D.

Para a utilização na impressão 3D, as propriedades no estado fresco têm mais importância que as propriedades no estado endurecido. No entanto, outro fator fundamental para a seleção da mistura T5 foi seu bom desempenho mecânico, possuindo os melhores resultados de resistência à flexão e compressão atrelado a um dos menores consumo de cimento entre as argamassas dosadas. Portanto, esses resultados tornam a argamassa T5 uma dosagem recomendada para uso na impressão 3D.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará (LMCC/UFC) pela disponibilização do espaço para a realização dos ensaios experimentais descritos no trabalho.

REFERÊNCIAS

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

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

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

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

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

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

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

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

BUSWELL, R. A. *et al.* **3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research**. *Cement and Concrete Research*, 2018.

ENGMANN, J., SERVAIS, C., BURBIDGE, A. S. **Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review**. *Journal of Non-Newtonian Fluids Mechanics* 132, p. 1-27, 2005.

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

LE, T. T. *et al.* **Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete**. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 45, n. 8, 2012.

LU, B. *et al.* **Designing spray-based 3D printable cementitious materials with fly ash cenosphere and air entraining agent**. *Construction and Building Materials*, v. 211, 2019.

MOHAN, M. K. *et al.* **Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review**. *Cement and Concrete Composites*, v. 115, 2021.

PERROT, A.; AMZIANE, S. **3D printing in concrete: General considerations and technologies**. *Em: 3D Printing of Concrete: State of the Art and Challenges of the Digital Construction Revolution*. [s.l.: s.n.].

PERROT, A.; RANGEARD, D.; PIERRE, A. **Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques**. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 49, n. 4, 2016.

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

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

ŞAHIN, H. G.; MARDANI-AGHABAGLOU, A. **Assessment of materials, design parameters and some properties of 3D printing concrete mixtures; a state-of-the-art review**. *Construction and Building Materials*, 2022.

TAY, Y. W. D.; QIAN, Y.; TAN, M. J. **Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test**. *Composites Part B: Engineering*, v. 174, 2019.

WANGLER, T. *et al.* **Digital Concrete: A Review**. *Cement and Concrete Research*, 2019.