SBCC 2023
I Simpósio Brasileiro da Ciência do Cimento

ANÁLISE DA RELAÇÃO CONSUMO DE CIMENTO/AGREGADO EM COMPOSIÇÕES DE MISTURAS CIMENTÍCIAS PARA IMPRESSÃO 3D.

Analysis of the Cement Consumption/Aggregate Ratio in Cement Mixture Compositions for 3D Printing

Leonardo de Souza Dias
UFPB | João Pessoa, PB | leonardodiaspb@gmail.com

José Vinícius Rodrigues Maia
IFPB | João Pessoa, PB | vinicius.maia@academico.ifpb.edu.br

Ana Mayara Silva Negreiros
IFPB | João Pessoa, PB | ana.negreiros@academico.ifpb.edu.br

Marcos Alyssandro S. dos Anjos
IFPB | João Pessoa, PB | marcos.alyssandro@gmail.com

Resumo

A tecnologia de Manufatura Aditiva, também conhecida como impressão 3D, está surgindo como uma prática promissora na indústria da construção. Esta tecnologia oferece vantagens como maior complexidade arquitetônica, redução de custos de materiais e desperdício, menor tempo de produção e maior segurança para os trabalhadores. Além de ser uma ferramenta eficaz no processo de automação da construção civil. No contexto da impressão 3D de misturas cimentícias, a relação entre Agregado Miúdo/Cimento nas composições é crucial, com estudos indicando variações de 1,0 a 1,5, o que sugere um alto consumo de cimento em comparação com relações tradicionais para concreto e argamassas. Neste cenário, este estudo investigou misturas com variações de agregados, visando a redução do consumo de cimento por metro cúbico em composições para impressão 3D. Para tanto, foram analisados parâmetros físicos e mecânicos no estado fresco e endurecido. Os resultados indicaram um comportamento ortotrópico nas propriedades de resistência à flexão, com resistências nas direções Z e Y estatisticamente equivalentes, ao passo que diferiram na direção X. Também foi observado que misturas com maiores proporções de agregados apresentaram menor resistência mecânica, sugerindo a influência do teor de agregado e da porosidade gerada.

Palavras-chave: 3DCP; Manufatura aditiva; Consumo de cimento; Materiais cimentícios.

ABSTRACT

Additive Manufacturing technology, also known as 3D printing, is emerging as a promising practice in the construction industry. This technology offers advantages such as greater architectural complexity, reduced material and waste costs, shorter production time, and increased safety for workers. It is also an effective tool in the process of automating civil construction. In the context of 3D printing of cementitious mixtures, the ratio between Fine Aggregate and Cement in compositions is crucial, with studies indicating variations from 1.0 to 1.5, which suggests high cement consumption compared to traditional ratios for concrete and mortar. In this scenario, this study investigated mixtures with varying aggregates, aiming to reduce cement consumption per cubic meter in 3D printing compositions. For this purpose, physical and mechanical parameters were analyzed in both fresh and hardened states. The results indicated an orthotropic behavior in flexural strength properties, with strengths in the Z and Y directions statistically equivalent, whereas differing in the X direction. It was also observed that mixtures with higher proportions of aggregates showed lower mechanical strength, suggesting the influence of aggregate content and generated porosity.

Keywords: 3DCP; Additive manufacturing; Consumption of cement; Cementitious materials.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de Manufatura Aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, está chamando a atenção de pesquisadores e profissionais da indústria da construção em todo o mundo. Ela é considerada uma alternativa promissora para o processo de automação do setor, trazendo benefícios como aumento da complexidade arquitetônica, redução de custos associados ao consumo de materiais e aos desperdícios, além de diminuir o tempo de produção e melhorar a segurança dos trabalhadores (ZHANG et al., 2019; DIAS, 2022).

No contexto da impressão 3D de misturas cimentícias para construção dois fatores são essenciais e indissociáveis nesse processo: as características dos materiais e as propriedades da mistura utilizada, levando em consideração as especificidades exigidas pela metodologia; e o controle dos padrões de impressão. Uma mistura muito fluida pode causar problemas na estabilidade dimensional das camadas, como deformação ou perda de forma, enquanto uma mistura com viscosidade muito alta pode dificultar a extrusão e a adesão entre as camadas, resultando em uma superfície irregular ou até falhas na extensão do filamento impresso.

Para atender a essas características, juntamente com outros requisitos reológicos que garantam uma mistura adequada para impressão, é necessário utilizar proporções mais elevadas de cimento nas composições. Essa necessidade decorre das limitações na capacidade de incorporação de agregados graúdo, bem como da quantidade relativamente reduzida de agregado miúdo tradicionalmente empregada. Alguns estudos sugerem que a relação Agregado Miúdo/Cimento (am/c) em compósitos para impressão 3D varia em torno de 1,0 a 1,5 (PHAM et al., 2020; RAHUL; SANTHANAM, 2020), já para concreto convencional e argamassas essa relação varia entre 3 a 5 com moderada à alta resistência aos 28 dias de idade (BARBOSA, 2022). Vale ainda destacar que a maioria dos estudos voltados para a redução da quantidade de cimento fazem uso de adições minerais, tais como sílica ativa, cinza volante e escória de alto forno (ZHANG et al., 2019; HASSE et al., 2020). No entanto, essa abordagem pode impactar os custos das misturas e dificultar a disseminação dessa tecnologia em países em desenvolvimento.

Muito embora a tecnologia de impressão se destaca como uma ferramenta na automação dos processos construtivos, a crescente preocupação global sobre as questões ambientais e a busca por soluções mais sustentáveis na indústria da construção estão motivando a exploração de materiais mais eficientes e ecologicamente amigáveis. Essa abordagem visa não somente preservar os recursos naturais, mas também reduzir os impactos prejudiciais ao meio ambiente.

Nesse sentido, o presente estudo busca analisar o comportamento físico e mecânico de misturas com diferentes proporções de agregados, e consequentemente uma redução no consumo de cimento por metro cúbico, em compósitos para impressão 3D. Explorando alternativas viáveis que possam reduzir o consumo de cimento, ao mesmo tempo em que mantém ou aprimora a qualidade dos compósitos utilizados na impressão 3D.

2 MÉTODO

2.1 MATERIAIS

Foram utilizados cimento Portland CP V ARI (equivalente ao OPC tipo III ASTM C 150 e CEM I – EM 197-1), com massa específica igual a 3,05 g/cm³ e diâmetro médio da partícula de 8,04; aditivo superplastificante (SP) à base de policarboxilatos; modificador de viscosidade HPMC (Hidroxipropilmetilcelulose); e areia de rio, com massa específica de 2,56 g/cm³, módulo de finura de 1,42% e diâmetro máximo de 2,36.

2.2 DEFINIÇÃO DAS MISTURAS

Para a definição das formulações foi empregado o método proposto por Dias (2022) na determinação das misturas, sendo a partir desse definidas 4 composições, conforme Tabela 1. A partir dessas relações foram ajustadas as proporções de a/c e aditivos de maneira que as misturas atinjam os parâmetros constitutivas apresentados pelo autor, determinando a relação W/Ms (água/ Material seco) igual 0,108, ou seja 10,8%, 0,89% de SP e 0,15% de HPPMC.

Tabela 1: Composições adotadas.

Mistura	Cimento (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Água (kg/m³)	SP (%)	VMA (%)	W/Md (%)	A/C (kg/kg)
1:1.5	859,2	1288,8	232,0	0,89	0,15	10,8	0,27
1:2.0	710,4	1420,9	230, 9	0,89	0,15	10,8	0,33
1:2.5	606,3	1515,8	229,2	0,89	0,15	10,8	0,38

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

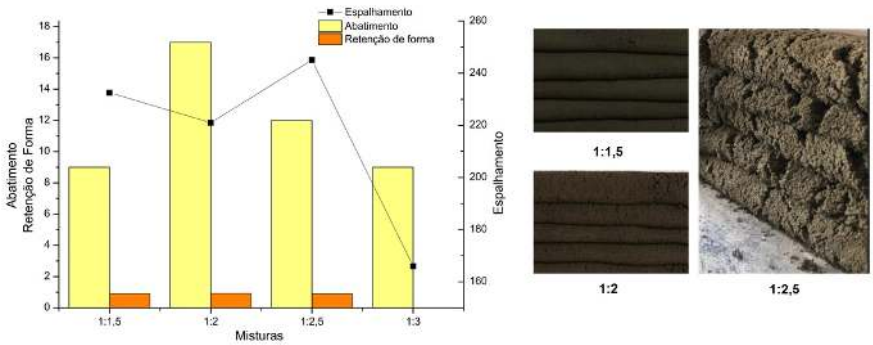
2.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS MISTURAS

Os parâmetros físicos e mecânicos selecionados para análise foram desenvolvidos nas misturas em seu estado fresco, com a verificação do espalhamento e abatimento, além de parâmetros específicos do processo de impressão, como a integridade visual do filamento impresso, e retenção de forma. Já para o estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência a compressão axial, porosidade aberta e resistência à flexão. Todos os ensaios seguiram as normas técnicas e recomendações apresentadas por Barbosa (2022) e Dias (2022).

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A Figura 1 mostra os resultados de espalhamento, abatimentos das misturas e os valores para retenção de forma das composições em análise. As misturas analisadas têm diferentes espalhamentos e abatimentos devido à influência da viscosidade com base no volume de pasta e relação agregado/aglomerante, mesmo com relações água/materiais secos iguais.

Figura 1: Caracterização das misturas em seu estado fresco.

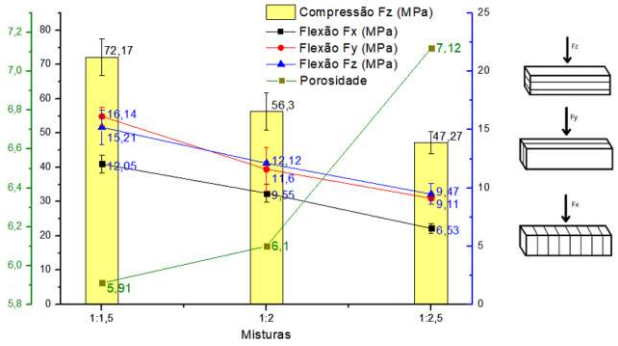


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As misturas 1:1 e 1:3 não puderam ser impressas devido à baixa mobilidade sob extrusão, mantendo relações de água/materiais secos e teores de aditivos constantes. A mistura 1:1 tinha pouca água para molhar partículas devido ao alto teor de pasta e baixa relação água/cimento, já a mistura 1:3 tinha pouca pasta para possibilitar a mobilidade das partículas por extrusão, considerando as condições do sistema de impressão. Quanto aos valores de retenção de forma (Hc) e aspecto visuais das composições, todas possuem Hc próximo a 0,9mm. A mistura 1:1,5 tem melhor acabamento sem vazios e rachaduras devido à maior relação volume de pasta por volume de agregado (Vp/Vs). A mistura 1:2.5 pode ser extrudada, mas não é ideal para impressão devido a falhas de continuidade ligadas à falta de coesão e trabalhabilidade.

A Figura 2 revela um comportamento ortotrópico nas misturas. Isso é evidenciado pelo fato de que as resistências à flexão nas direções Z e Y são estatisticamente equivalentes para uma dada mistura, enquanto diferem da resistência na direção X ($p < 0,05$). Esse padrão é observado devido à disposição dos corpos de prova próximos ao sentido de impressão, com juntas presentes ao longo da altura de impressão, resultando em um comportamento não anisotrópico. Houve uma diminuição nas médias das resistências à flexão em todas as três direções ao comparar as diferentes misturas. Isso era esperado, pois o aumento do teor de agregado e da quantidade de água leva a uma redução no consumo de cimento e a um aumento na porosidade das misturas.

Figura 2: Caracterização física e mecânica das misturas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O comportamento à compressão foi avaliado apenas na direção Z. Observou-se que, após 28 dias, a tendência é semelhante àquela observada na resistência à flexão. À medida que os consumos de cimento aumentam e as relações água/cimento diminuem, a resistência aumenta. Isso está relacionado à maior porosidade das misturas com teores mais elevados de água e menores quantidades de pasta.

4 CONCLUSÃO

O aumento do consumo de agregados e consequentemente a redução do consumo de cimento se mostrou influente no desempenho e na resposta as propriedades das misturas em seu estado fresco e endurecido e frente a sua aplicação na impressão 3D. As conclusões específicas são: A retenção de forma das misturas se manteve relativamente constante não sendo influenciada significativamente pelo consumo de agregado; As propriedades de espalhamento e abatimento não se mostrarão um parâmetro norteado para definição da capacidade de uma mistura ser classificada como imprimível; Foi observado um comportamento ortotrópico nas propriedades de resistência à flexão, com resistências nas direções Z e Y estatisticamente equivalentes para uma mesma mistura, enquanto diferindo significativamente da direção X, e; Observou-se uma redução consistente nas médias de resistência à flexão em todas as direções à medida que se comparavam as diferentes misturas, que pode ser motivada pelo aumento do teor de agregado e da quantidade de água, resultando em menor consumo de cimento e maior porosidade nas composições.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, M. D. S. Desenvolvimento de compósitos para impressão 3d com consumo de cimento reduzido. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.

DIAS, L. DE S. Metodologia de dosagem com base em relações constitutivas básicas de misturas para impressão 3d em concreto (3DCP). [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.

HASSE, J. A. et al. Increasing structuration rate of 3D printable concretes: the effect of viscosity enhancing admixtures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 4, 2020. . Disponível em: < https://www.scielo.br/j/riem/a/ZyCvWHzjcVtFDXddCgcVtJM/?lang=en>. Acesso em: 11 mar. 2016. doi:https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000400012.

PHAM, L.; TRAN, P.; SANJAYAN, J. Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance. **Construction and Building Materials**, v. 250, jun. 2020. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182030790X >. Acesso em: 10 jul. 2023. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118785.

RAHUL, A. V.; SANTHANAM, M. Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates. **Cem. Concr. Compos.**, v.109, may. 2020. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946520300627 >. Acesso em: 11 mar. 2016. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103570.

ZHANG, Y. et al. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 278–285, mar. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818330356>. Acesso em: 10 jul. 2023. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061.