

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE ROCHA ORNAMENTAL COMO FILLER EM ARGAMASSA PARA IMPRESSÃO 3D

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.VII-016>

Pedro Henrique Cota Drumond (*), Diôgo Silva de Oliveira, Victor Moreno Lima, Diego Dias Veloso, Márcio Henrique Angelo Charles

* Universidade Federal de Viçosa - UFV - pedrodrumond@hotmail.com

RESUMO

O resíduo de rocha ornamental é um problema para as grandes marmorarias, que necessitam despende recursos financeiros para tratar e destinar este material. Porém, a utilização deste em massas cimentícias pode modificar a reologia benéficamente, uma vez que são materiais finos e preenchem pequenos vazios na massa. Para a impressão 3D de argamassa, o resíduo se comporta como filler inerte, de forma que aprimora a trabalhabilidade, melhorando os dois principais parâmetros de impressão: a construtibilidade e a printabilidade. Outra característica benéfica do filler é a possibilidade de substituição parcial do cimento mantendo a reologia, já que para a produção do clínquer é demandado um alto gasto energético e uma enorme liberação de gás carbônico na atmosfera. Com isso, neste estudo analisa-se e compara-se o comportamento de duas argamassas com finos e uma argamassa tradicional, sendo que em uma das argamassas com alto teor de finos foi utilizado resíduo de rocha ornamental e na outra o cimento Portland para fazer este papel. Ao final do estudo concluiu-se que a argamassa com uma maior quantidade de finos apresentou uma melhora para a impressão 3D, deixando a argamassa mais coesa e a superfície mais lisa, preenchendo melhor os espaços vazios entre os grãos de areia.

PALAVRAS-CHAVE: Impressão 3D de argamassa, resíduo de rocha ornamental, filler, construtibilidade, printabilidade.

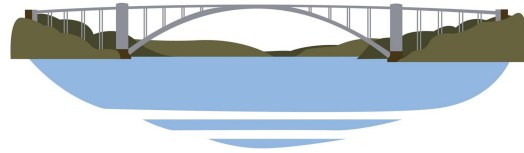
ABSTRACT

Ornamental rock waste is a problem for large marble factories, which need to spend financial resources to treat and dispose of this material. However, the use of this in cementitious materials can beneficially modify the rheology, since they are thin materials and fill small voids in the mass. For mortar 3D printing, the residue behaves as an inert filler, so it improves workability, improving the two main printing parameters: constructability and printability. Another beneficial feature of the filler is the possibility of partially replacing the cement while maintaining the rheology, since the production of clinker requires a high energy expenditure and a huge release of carbon dioxide into the atmosphere. With this, this study analyzes and compares the behavior of two mortars with fines and a traditional mortar, and in one of the mortars with a high content of fines ornamental rock waste was used and in the other Portland cement was used to play this role. At the end of the study, it was concluded that the mortar with a greater number of fines showed an improvement for 3D printing, leaving the mortar more cohesive and the surface smoother, better filling the empty spaces between the grains of sand.

KEY WORDS: 3D printing mortar, rock residues, filler, constructability, printability.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o quinto maior produtor de rochas ornamentais do mundo. Para o beneficiamento do material é necessário realizar o corte de rochas brutas em placas com o auxílio de água para refrigerar e lubrificar as lâminas. A água que sai deste processo contém material particulado e, por isso, para que seja reutilizada deve ser tratada e passar pela separação de resíduos sólidos. O sólido separado é um material fino que acarreta graves consequências ambientais (DOS REIS, 2007). Usualmente, este resíduo é destinado a aterros específicos, porém uma das alternativas para o evitar seu descarte no ambiente é utilizá-lo como agregado em argamassas e concretos a base de cimento, inclusive com efeito filler. De acordo com MELO (2020) o filler é um material tão fino quanto o cimento, com a principal diferença nos formatos dos grãos, que possuem formas mais angulares e prismáticas, enquanto o cimento possui grãos mais circulares. Sua utilização em argamassas pode trazer benefícios como melhora da resistência à tração, compressão, maior densidade aparente e melhor preenchimento dos vazios entre grãos da argamassa.



Uma parte do cimento utilizada na argamassa pode ser substituída pelo filler a fim de reduzir os impactos ambientais causados pela utilização do cimento, como o alto nível de energia demandado para a fabricação do clínquer, bem como a grande quantidade de gás carbônico despejado na atmosfera no momento da queima das rochas calcárias (DOBISZEWSKA et al., 2023).

Atualmente, a impressão 3D tem ganhado mercado em diversas áreas, especialmente para a fabricação de peças, protótipos a aviação, automobilismo e outras indústrias. Para a engenharia civil, a impressão 3D vem ganhando espaço para a confecção de maquetes residenciais e de construções de casas e objetos com argamassa ou concreto, principalmente no que engloba formas complexas (FORMIGA, 2021). Um dos tipos de impressão 3D existentes é a manufatura aditiva, que consiste em empilhar camadas de material em estado momentaneamente viscoso, de maneira que, ao solidificar, o objeto fique consolidado de forma monolítica (DAMS et al., 2023). Esta solidificação em alguns casos é muito rápida, ocorrendo em segundos, como no caso de plásticos, ou mais demorada, ocorrendo em horas, como em concretos ou argamassas. Pelo fato dos materiais cimentícios possuírem longo tempo de secagem, se faz necessário adicionar a próxima camada da impressão com o material da camada anterior em estado fresco, fazendo com que o material ainda viscoso tenha que resistir ao peso das camadas que serão impressas. Essa capacidade de empilhamento de camadas é chamada de construtibilidade e é essencial para a impressão 3D de materiais à base de cimento.

Outra característica importante para impressão 3D é a printabilidade. Esta é a análise visual de como o material está sendo conformado, sendo que para uma boa printabilidade o cordão de argamassa deve ser coeso, conciso e contínuo, sem variação em seu formato ou na quantidade de material expelido. A partir do momento em que a impressão está saindo com falhas, muitas bolhas e espaçada, define-se como uma printabilidade ruim. De acordo com RIBEIRO (2021), um fator extremamente importante para uma boa printabilidade é a granulometria do material pastoso. Além disso, o filler permite um melhor preenchimento entre partículas, ocupando espaços vazios e gerando uma melhor hidratação do cimento por retenção de água (MELO, 2020). Definir uma argamassa com uma boa printabilidade é extremamente importante para a continuidade e homogeneidade do material impresso, que garantirá uma maior resistência e um melhor acabamento final.

Diante do contexto, para melhor investigar e explorar as possibilidades tecnológicas oferecidas pela manufatura aditiva controlada por comando numérico computadorizado (CNC), em 2021, alunos da Engenharia Civil da UFV construíram e programaram uma impressora 3D de argamassa (Figura 1). Desde então, tem-se buscado formas de melhorar os principais parâmetros de impressão da argamassa, como a construtibilidade e a printabilidade.

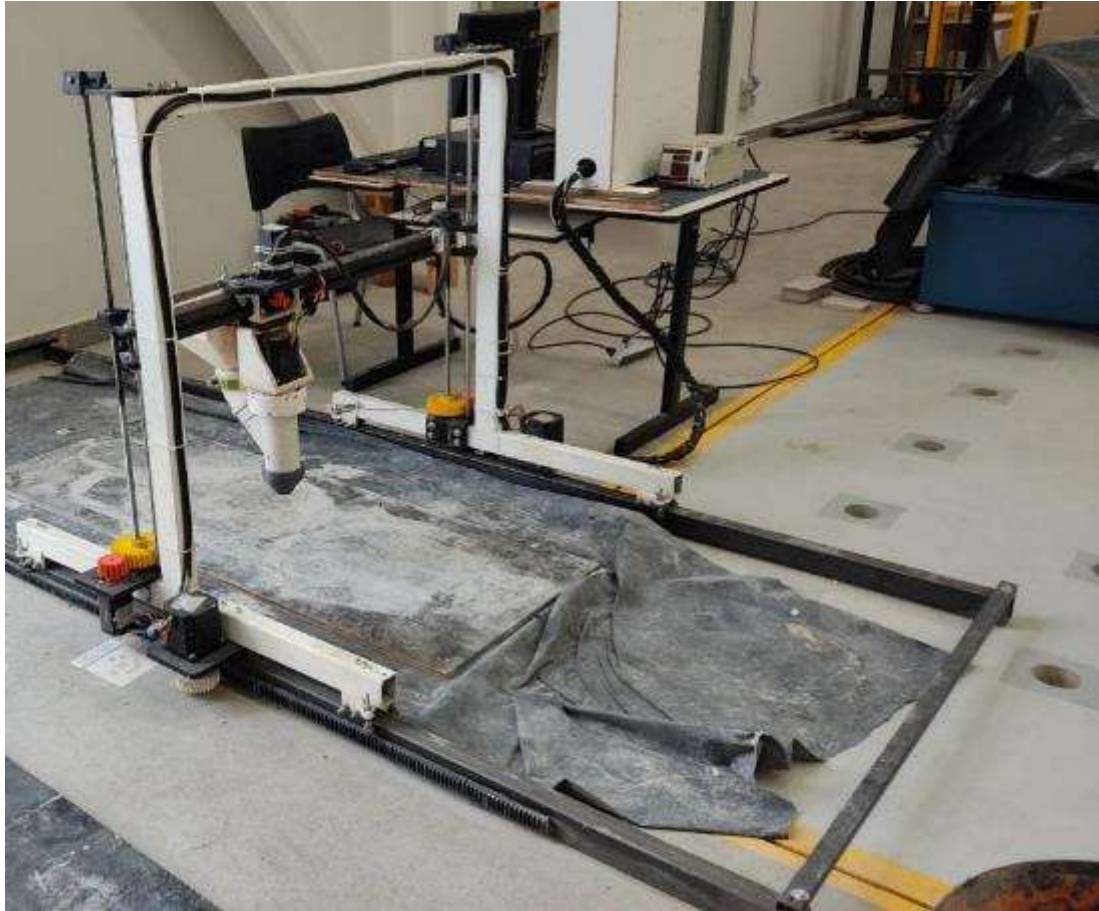
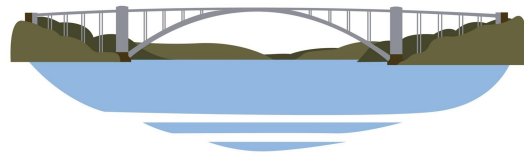


Figura 1: Impressora 3D de argamassa do laboratório de engenharia civil da UFV.

OBJETIVO

O estudo em questão tem objetivo de avaliar a performance do resíduo de rocha ornamental em uma argamassa para impressão 3D, comparando o comportamento reológico de 3 traços de argamassas: 1:1,21:2,21 (cimento, filler, areia); 1:2,21 (cimento, areia) e 1:1 (cimento areia), de forma a manter próximo a consistência determinada pelo *flow table*. A influência será determinada pela avaliação visual da printabilidade e pelo número máximo de camadas que foi possível empilhar sem o corpo de prova se deformar (construtibilidade).

METODOLOGIA

O presente estudo experimental utilizou o resíduo de rocha ornamental coletado em Cachoeiro do Itapemirim – ES como filler para argamassa para manufatura aditiva, a fim de modificar a reologia e possibilitar uma maior construtibilidade e printabilidade, ou seja, uma maior capacidade de empilhamento nas camadas na impressão 3D e camadas com cordões mais homogêneos, respectivamente.

O resíduo foi coletado em forma de lama e secado primeiramente ao ar livre, destorroado e peneirado, levado à estufa por 48 horas e moído no ensaio de abrasão de *loss angeles* por 30 minutos. Após este processo, o material foi armazenado em sacos plásticos até a sua utilização.

No total foram utilizados 5 materiais nos traços: a) cimento CPII E32 da Montes Claros; b) areia lavada; c) filler de rocha ornamental; d) aditivo modificador de viscosidade *centrament stabi 520* da MC Bauchemie e e) aditivo incorporador de ar *centrament air 200* da MC Bauchemie (Figura 2).

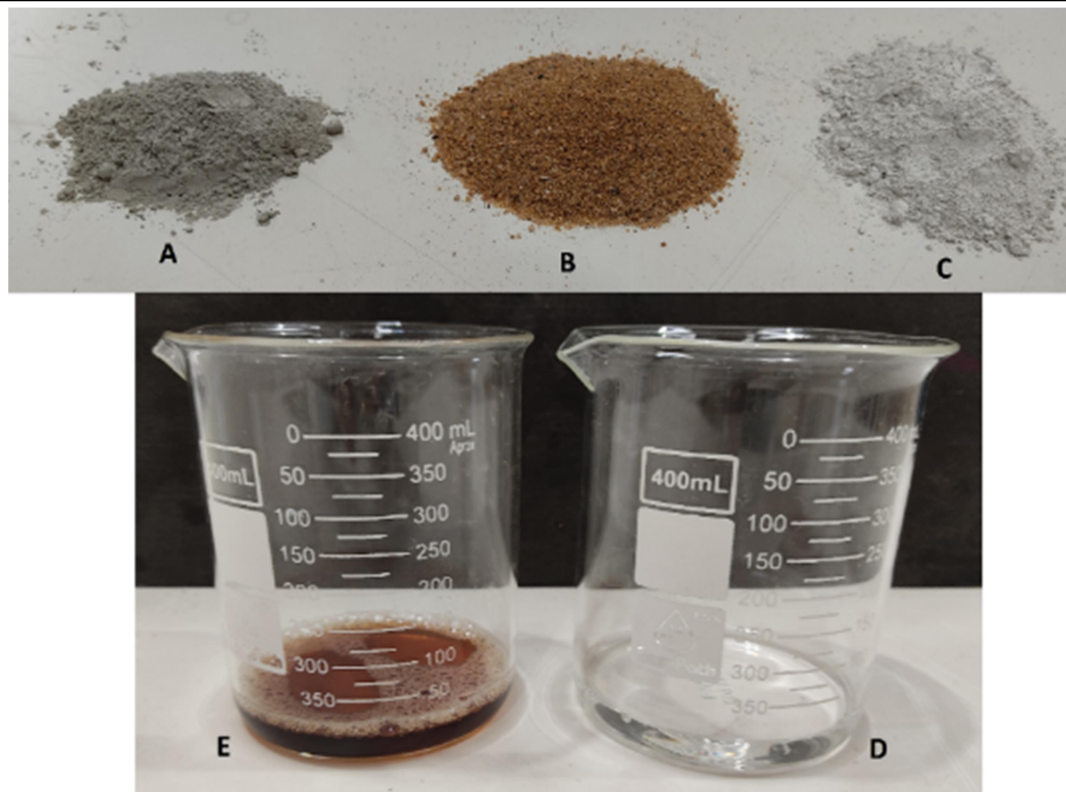


Figura 2: Materiais utilizados na confecção das argamassas.

Para avaliar de forma comparativa a construtibilidade e a extrudabilidade em aplicação da manufatura aditiva foram utilizados 3 traços diferentes, sendo estes expostos na Tabela 1. A nomenclatura dos traços seguiu a seguinte lógica: F para representar a presença do filler; N para representar um traço normal de argamassa e C para representar um traço com uma grande quantidade de cimento. A quantidade de cada material utilizado para os traços é demonstrada na Tabela 2.

Tabela 1: Traços utilizados no experimental.

Traço	Materiais			Relação água/finos
	Cimento	Areia	Filler	
F	1	2,21	1,21	0,43
N	1	2,21	-	0,43
C	1	1	-	0,35

Tabela 2: Quantidade de material utilizado em cada uma das misturas.

Traço	Materiais					
	Cimento (g)	Areia (g)	Filler (g)	Água (g)	Stabi 520 (g)	Air 200 (g)
F	6000	13230	7260	5700	28,5	28,5
N	6000	13230	-	2580	28,5	28,5
C	13260	13230	-	4640	28,5	28,5

Como intuito foi avaliar o efeito do material fino na trabalhabilidade da argamassa foi utilizado o traço de 1:1 (cimento, areia), usando o cimento como material fino, de forma que, o traço com filler possuía a mesma relação finos (cimento + filler) e areia.

Nove corpos de provas idênticos foram impressos com os mesmos parâmetros de impressão (três de cada um dos traços), para avaliar o número máximo de camadas impressas sem colapsar, a uniformidade e o aspecto geral da impressão. Para melhor avaliar o primeiro parâmetro, os corpos de prova foram impressos em formato vaso, possuindo



o fundo preenchido e as paredes compostas somente por um cordão de material impresso de forma contínua em espiral. Durante a impressão foi avaliada a printabilidade e a extrudabilidade do material. Foi realizado também o teste de consistência de argamassa (*flow table*) para garantir que todos os corpos de prova estivessem com a consistência semelhante.

Com o intuito de causar o menor impacto ambiental, economizando matéria prima (principalmente o cimento), para cada traço foi preparado a quantidade necessária para realizar a impressão de 1 corpo de prova com 18 camadas (limite alcançado em impressões anteriores). Após a finalização e determinação do colapso da impressão de cada vaso o material era retornado ao recipiente para ser novamente homogeneizado e iniciado uma nova impressão. Ao final dos testes, um novo vaso foi impresso para ser usado como vaso de plantas, de forma a não desperdiçar o material.

RESULTADOS

Após a impressão dos corpos de prova os resultados foram apresentados em uma tabela-resumo (Tabela 3), onde a extrudabilidade foi avaliada com nota de 0 a 10, de forma que 0 representa um cordão falhado, onde a impressora apresentou dificuldades na impressão, e 10 representa um cordão coeso, contínuo e sem falhas. Na Figura 3, é demonstrado o resultado obtido em cada um dos traços impressos (F, C e N) e um gráfico com o número máximo de camadas obtidas em cada traço e suas médias é apresentado na Figura 4.

Tabela 3: Resumo dos resultados obtidos na impressão dos corpos de prova.

Corpo de prova	Número máximo de camadas	Média do diâmetro (<i>flow table</i>) (mm)	Printabilidade	Figura de referência
F1	9	254	8	(Figura 5)
F2	11		9	(Figura 5)
F3	9		8	(Figura 6)
C1	9	245	7	(Figura 7)
C2	10		7	(Figura 7)
C3	10		8	(Figura 8)
N1	8	242	6	(Figura 9, Figura 10)
N2	7		6	(Figura 9, Figura 10)
N3	7		7	(Figura 9, Figura 10)

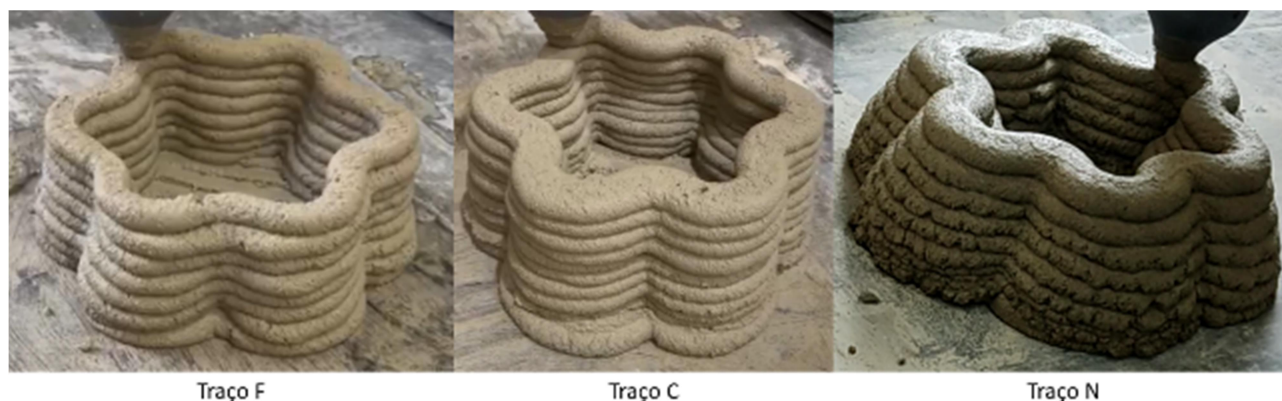


Figura 3: Resultado de impressão de cada um dos traços (F, C e N).

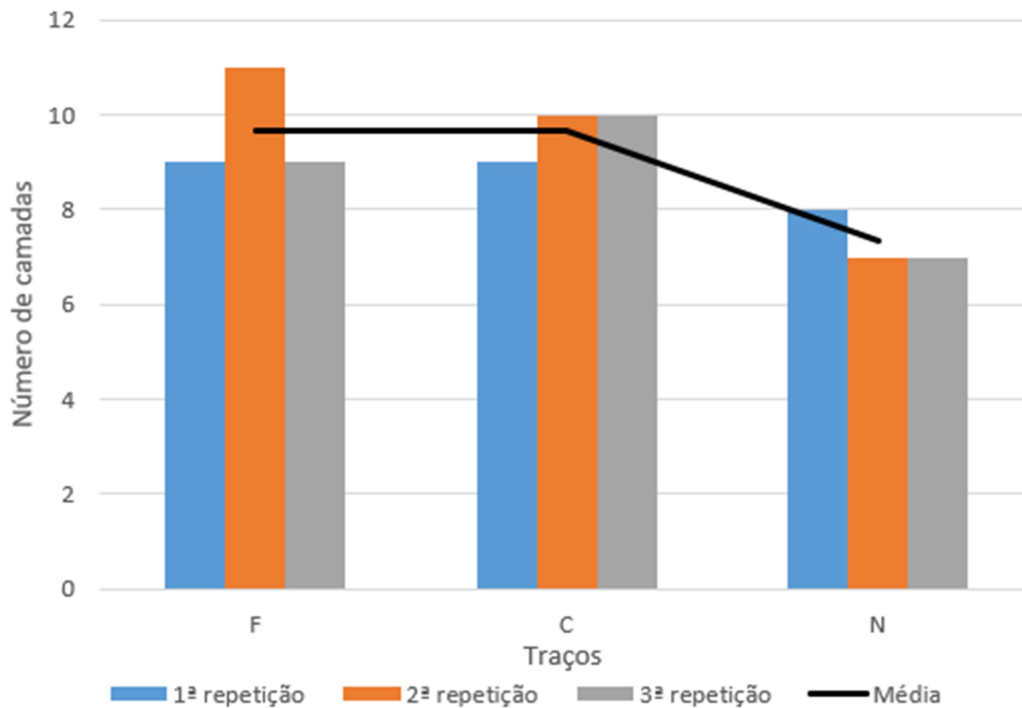
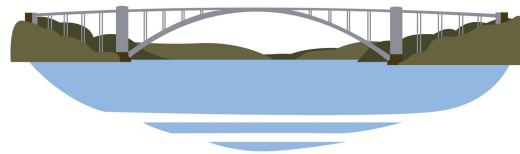


Figura 4: Número máximo e média de camadas obtidas para cada traço (F, C e N).

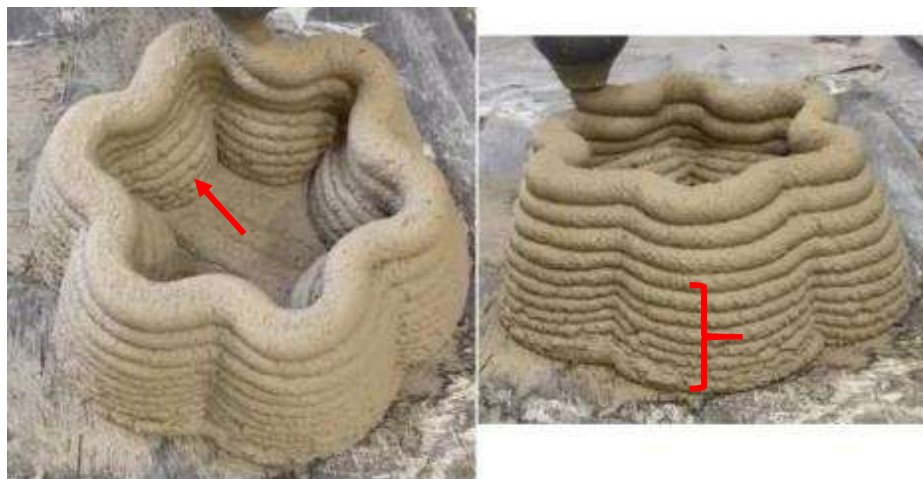


Figura 5: Traço F - colapso das camadas inferiores.

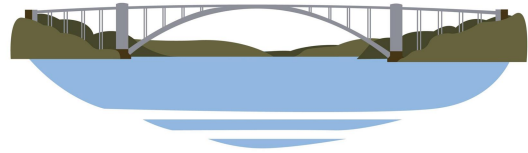


Figura 6: Traço F – colapso local no corpo de prova.



Figura 7: Traço C - colapso local no corpo de prova.

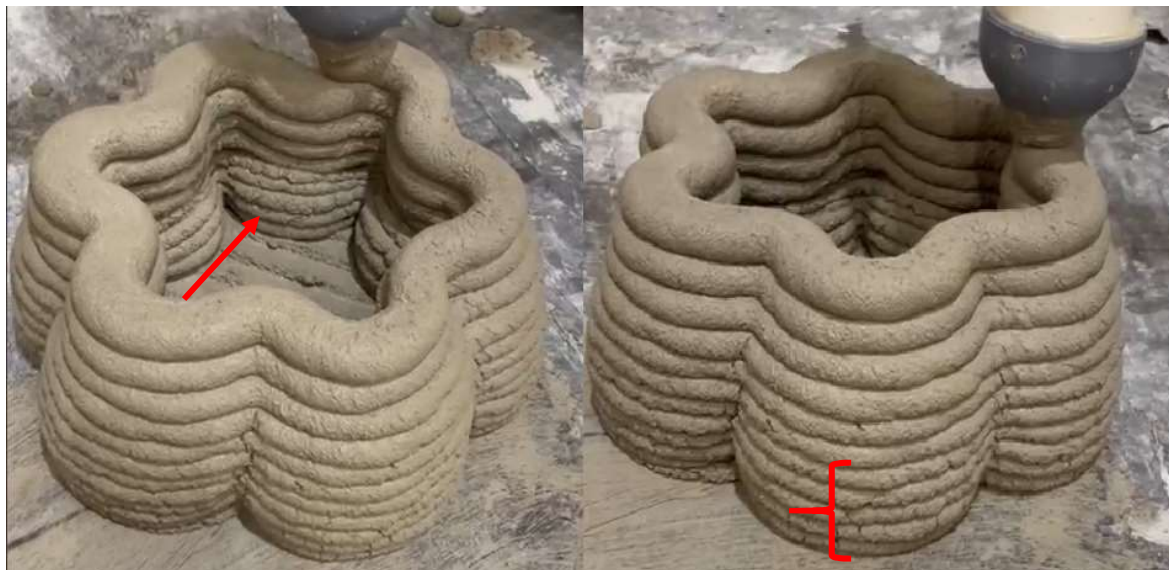


Figura 8: Traço C – esmagamento das camadas de base.

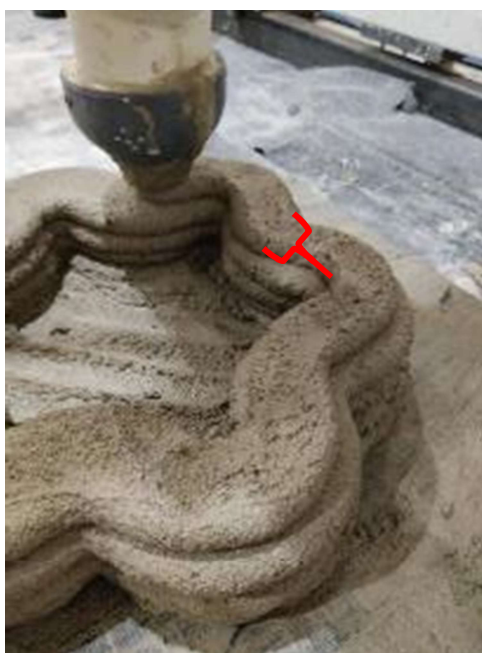


Figura 9: Traço N - variação na espessura do cordão impresso.

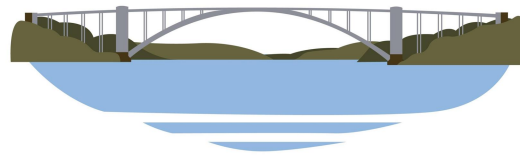


Figura 10: Traço N - plastificação da argamassa, gerando “rachaduras” na base.

Foi possível notar um ganho na construtibilidade dos corpos de prova que possuem uma maior quantidade de partículas finas (traços F e C), pois apresentaram capacidades de número máximo de camadas impressas semelhantes. De acordo com MELO (2020), o filler age na massa fisicamente preenchendo pequenos espaços vazios e aumentando o empacotamento granulométrico. A maior diferença entre os traços F e C se dá na printabilidade. O traço F apresentou cordões mais coesos e sem falhas, enquanto o traço C, com uma grande quantidade de cimento, em alguns momentos, foi difícil de ser extrudado.

Além disso, houve melhora na superfície da argamassa com a presença dos finos, apresentando uma melhor printabilidade, de forma que alguns espaços vazios entre os grãos de areia foram preenchidos e alguns problemas como a baixa plasticidade foram evitados.

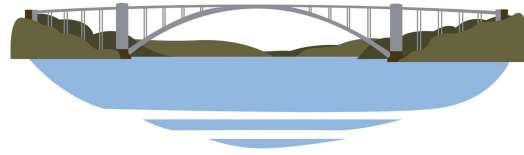
CONCLUSÃO

O resíduo de rocha ornamental, ao ser reutilizado em argamassas para a impressão 3D, teve como principais benefícios a redução do volume de resíduo destinado a aterros e a influência benéfica no comportamento das argamassas. O filler melhorou a construtibilidade e a printabilidade e reduziu a quantidade de cimento utilizado, trazendo vantagens no âmbito ambiental e financeiro. Dentre os três traços analisados, o traço, em massa, ideal foi de 1:1,21:2,21 com a relação de água/finos de 0,43 e a utilização de aditivos modificador de viscosidade e incorporador de ar em 0,5% de massa de cimento. Assim como descrito por Sequeira (2020), uma parcela desta melhora deve-se ao maior empacotamento e dispersão das partículas na argamassa, o que a torna mais estável e trabalhável. Desta forma, além da argamassa apresentar um melhor printabilidade, ela também teve melhora na construtibilidade.

Agradecimento Os autores agradecem a Universidade Federal de Viçosa pelo suporte financeiro e técnico dado ao desenvolvimento da pesquisa. Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DAMS, Barrie et al. Development of Cementitious Mortars for Aerial Additive Manufacturing. **Applied Sciences**, v. 13, n. 1, p. 641, 2023.
2. DOBISZEWSKA, Magdalena et al. Utilization of rock dust as cement replacement in cement composites: An alternative approach to sustainable mortar and concrete productions. **Journal of Building Engineering**, p. 106180, 2023.
3. DOS REIS, Alessandra Savazzini; DE ALVAREZ, Cristina Engel. **A sustentabilidade e o resíduo gerado no beneficiamento das rochas ornamentais**. 2007. Disponível em: https://lpp.ufes.br/sites/lpp.ufes.br/files/field/anexo/2007_artigo_009.pdf. Acesso em 10 mar. 2023.



4. FORMIGA, Caio Vinicius Efigenio; CARNEIRO, Marcos Lajovic. Impressão 3D para construção civil: revisão da literatura e desafios. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 13, n. 4, 2021. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/19632/209209216044>. Acesso em 10 mar. 2023.
5. MELO, Rorenychollas Ferreira. **INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**. 2020. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2020. Disponível em: http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/9378/Rorenychollas%20Ferreira%20Melo_.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 09 mar. 2023.
6. RIBEIRO, Manuel J. **A extrudabilidade das pastas cerâmicas no processo de conformação plástica**. *Técnica - Revista Técnica de Cerâmica e Vidro*, n. 7, p. 30-32, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/351480517_A_extrudabilidade_das_pastas_ceramicas_no_processo_de_conformacao_plastica. Acesso em 10 mar. 2023.
7. SEQUEIRA, Eduardo Martins; GHISLENI, Geisiele. A influência da Adição de Filler Calcário em Substituição Parcial ao Cimento em Argamassa Estabilizada de Revestimento de Paredes e Tetos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 20-38, 2020.