



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA  
DIRETORIA GERAL DO CAMPUS JOÃO PESSOA  
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR  
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**GUSTAVO DE LIMA SEIXAS CUNHA**

**COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS  
COM VERMICULITA EM IMPRESSÃO 3D**

**JOÃO PESSOA – PB  
2025**

**GUSTAVO DE LIMA SEIXAS CUNHA**

**COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS  
COM VERMICULITA EM IMPRESSÃO 3D**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito curricular obrigatório para obtenção do título de Engenheiro(a) Civil.

Orientador: Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos  
Coorientador (se houver): Me(a) Marcella de Sena Barbosa

**JOÃO PESSOA – PB  
2025**

# FOLHA DE APROVAÇÃO

 <b>INSTITUTO FEDERAL</b> Paraíba	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba CAMPUS JOÃO PESSOA
---	--

DECISÃO 34/2025 - CBEC/UA1/UA/DDE/DG/IP/REITORIA/IFPB, de 10 de setembro de 2025.

**GUSTAVO DE LIMA SEIXAS CUNHA**

## COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES PARA IMPRESSÃO 3D

	Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba como requisito curricular para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil
--	--

Aprovado em 03 de setembro de 2025

### Banca Examinadora

**Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos (Orientador - IFPB)**

**Dr. Ulisses Targino Bezerra (Examinador Interno - IFPB)**

**Me. Marcella de Sena Barbosa (Examinadora Externa - UFRN)**

**JOÃO PESSOA**

**2025**

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcos Alyssandro Soares dos Anjos, PROFESSOR ENS BÁSICO TECN TECNOLÓGICO**, em 10/09/2025 09:39:54.
- **Ulisses Targino Bezerra, PROFESSOR ENS BÁSICO TECN TECNOLÓGICO**, em 10/09/2025 13:41:40.
- **Marcella de Sena Barbosa, PRESTADOR DE SERVIÇO**, em 10/09/2025 14:35:20.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 09/09/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código: 703543  
Verificador: 888663120  
Código de Autenticação:



**NOSSA MISSÃO:** Ofertar a educação profissional, tecnológica e humanística em todos os seus níveis e modalidades por meio do Ensino, da Pesquisa e da Extensão, na perspectiva de contribuir na formação de cidadãos para atuarem no mundo do trabalho e na construção de uma sociedade inclusiva, justa, sustentável e democrática.

**VALORES E PRINCÍPIOS:** Ética, Desenvolvimento Humano, Inovação, Qualidade e Excelência, Transparência, Respeito, Compromisso Social e Ambiental.

# COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM VERMICULITA EM IMPRESSÃO 3D

Gustavo de Lima Seixas Cunha

Unidade acadêmica 1 – Design, infraestrutura e ambiente, Instituto Federal da Paraíba (IFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil.

## Resumo

A impressão 3D de compósitos cimentícios (3DP-CC) desponta como uma tecnologia inovadora para o setor da construção civil, oferecendo vantagens como automação dos processos, redução do desperdício de materiais e possibilidade de geometrias complexas. Entretanto, a formulação de materiais adequados para o processo ainda representa um desafio, sobretudo pela necessidade de equilíbrio entre propriedades reológicas e estabilidade das camadas impressas. Neste contexto, este estudo avaliou o comportamento no estado fresco de compósitos cimentícios para 3DP-CC com substituição parcial da areia natural por vermiculita expandida (VE) em teores de 50%, 75% e 100% em volume, comparando-os a um traço de referência. Foram conduzidos ensaios de espalhamento, densidade de massa, viscosidade e retenção de forma, seguindo normas técnicas e metodologias da literatura internacional. Os resultados evidenciaram que a incorporação de VE reduziu a densidade dos compósitos e influenciou diretamente na fluidez e na retenção de forma, com destaque para o traço VE50, que apresentou desempenho balanceado entre estabilidade e trabalhabilidade. As análises indicam o potencial da vermiculita expandida como agregado leve, viabilizando misturas adequadas à impressão 3D e alinhadas aos princípios de construção digital com menor impacto ambiental.

**Palavras-chave:** impressão 3D. Compósitos cimentícios. Vermiculita expandida. Estado fresco.

## EVALUATION OF THE FRESH BEHAVIOR OF CEMENTITIOUS COMPOSITES WITH EXPANDED VERMICULITE FOR 3D PRINTING OF CONCRETE

### *Abstract*

3D printing of cementitious composites (3DP-CC) is emerging as an innovative technology for the civil construction sector, offering advantages such as process automation, reduced material waste, and the possibility of complex geometries. However, the formulation of suitable materials for the process still represents a challenge, mainly due to the need to balance rheological properties and the stability of the printed layers. In this context, this study evaluated the fresh state behavior of cementitious composites for 3DP-CC with partial replacement of natural sand by expanded vermiculite (EV) at contents of 50%, 75%, and 100% by volume, comparing them to a reference mix. Spreading, mass density, viscosity, and shape retention tests were conducted following technical standards and

methodologies from the international literature. The results showed that the incorporation of EV reduced the density of the composites and directly influenced fluidity and shape retention, with emphasis on the EV50 mix, which presented balanced performance between stability and workability. The analyses indicate the potential of expanded vermiculite as a lightweight aggregate, enabling mixtures suitable for 3D printing and aligned with the principles of digital construction with less environmental impact.

**Keywords:** 3D printing. Cementitious composites. Expanded vermiculite. Fresh-state properties.

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil tem se consolidado como uma das principais engrenagens do desenvolvimento urbano, econômico e social no mundo. No entanto, apesar de sua importância estratégica, o setor é historicamente marcado por uma baixa taxa de inovação tecnológica. Essa limitação decorre de diversos fatores, como a fragmentação da cadeia produtiva, a alta dependência de mão de obra, a dificuldade de padronização dos processos e o receio de mudanças que possam impactar prazos, custos ou desempenho técnico das obras. Tais características tornam o ambiente construtivo mais avesso à adoção de tecnologias disruptivas, especialmente em comparação com setores industriais automatizados e controláveis. Essa resistência dificulta a modernização dos métodos construtivos e a incorporação de soluções mais sustentáveis e eficientes. Paralelamente, o crescimento acelerado da atividade gera severos impactos ambientais, como o alto consumo de recursos naturais, a elevada geração de resíduos sólidos e as expressivas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Estima-se que a construção civil seja responsável por cerca de 40% do consumo global de energia e aproximadamente 8% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub>, sendo a produção de cimento uma das principais fontes emissoras, com médias que variam entre 561 kg e 622 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada produzida (Pamenter & Myers, 2021; Rocha *et al.*, 2022).

Diante dessa realidade, cresce a demanda por práticas construtivas e mais eficientes e ambientalmente responsáveis. Nesse cenário, a impressão 3D de compósitos cimentícios (*3D printing of cementitious composites – 3DP-CC*) surge como uma alternativa inovadora, com potencial de transformar o setor. A tecnologia permite a automação de processos, redução de mão de obra, eliminação de fôrmas e minimização do desperdício de materiais, além de proporcionar liberdade geométrica e customização de elementos construtivos (Wolfs *et al.*, 2018; Bos *et al.*, 2022). Apesar dessas vantagens, sua aplicação ainda enfrenta desafios técnicos, sobretudo relacionados à formulação de materiais com propriedades reológicas adequadas — como fluidez, viscosidade e tixotropia — que garantam estabilidade estrutural e aderência entre camadas (Panda *et al.*, 2019; Bedarf *et al.*, 2023).

Grande parte das misturas desenvolvidas para a tecnologia de impressão 3D na construção civil apresenta um elevado consumo de cimento Portland, frequentemente superior a 700 kg/m<sup>3</sup>, o que contraria os princípios de sustentabilidade que a própria tecnologia busca promover (Ting *et al.*, 2021; Ding *et al.*, 2020). Essa característica está associada à necessidade de garantir alta coesão, extrudabilidade e rápida resistência inicial, resultando em relações aglomerante/agregado significativamente mais altas do que nas argamassas convencionais. Além disso, o uso reduzido ou mesmo a ausência de agregados graúdos nas formulações contribui para esse desbalanceamento, ampliando o volume de pasta cimentícia e, conseqüentemente, o impacto ambiental.

Nesse contexto, destaca-se também o papel dos agregados miúdos, como a areia natural, que embora menos discutido que o cimento, apresenta relevância crescente em termos ambientais. A extração de areia está entre as atividades mais intensas de exploração mineral no mundo, gerando impactos como degradação de leitos fluviais, erosão, perda de biodiversidade e conflitos socioambientais em regiões de extração (Beiser, 2017). Assim, a redução parcial do consumo de areia por materiais alternativos em misturas para 3DP-CC torna-se uma estratégia complementar de

sustentabilidade, contribuindo para a preservação de recursos naturais e mitigando os danos ambientais associados à mineração não controlada.

Entre esses materiais, destaca-se a vermiculita expandida — um mineral micáceo formado por silicatos hidratados de magnésio, ferro e alumínio — que, ao ser submetido a altas temperaturas, sofre esfoliação e se expande significativamente. O resultado é um agregado leve com alta porosidade, baixa densidade (entre 56 kg/m<sup>3</sup> e 192 kg/m<sup>3</sup>), inércia química, propriedades de isolamento térmico e acústico. (Ugarte *et al.*, 2005; Carvalhaes, 2015; Rossignolo, 2009). A substituição parcial da areia natural por vermiculita em misturas cimentícias pode reduzir a densidade do compósito, melhorar o desempenho térmico da edificação e viabilizar a utilização de matérias-primas abundantes no Brasil, que é o terceiro maior produtor mundial do mineral.

No entanto, o uso da vermiculita em misturas destinadas à impressão 3D requer avaliações detalhadas, uma vez que a porosidade elevada pode interferir nas propriedades mecânicas e reológicas do material, como observado em estudos recentes com argamassas leves (Barbosa *et al.*, 2024). A presença de aditivos como a hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), associada à alta absorção de água da vermiculita, também pode afetar a viscosidade e a consistência da mistura ao longo do tempo, exigindo um ajuste cuidadoso da dosagem e do processo de mistura.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento no estado fresco e a retenção de forma de compósitos cimentícios para impressão 3D com substituição parcial da areia natural por vermiculita expandida em diferentes teores volumétricos (50%, 75% e 100%). A pesquisa busca analisar os efeitos da VE na extrudabilidade, na estabilidade geométrica e na viabilidade técnica das misturas, contribuindo para o desenvolvimento de formulações inovadoras e alinhadas ao contexto da construção digital.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Os materiais empregados na composição das misturas foram adquiridos de fornecedores locais, com o intuito de garantir maior representatividade regional e viabilidade prática ao estudo. Para verificar a adequação desses insumos ao processo de impressão 3D de materiais cimentícios, foram realizados ensaios específicos que permitiram identificar suas principais propriedades físicas. As análises realizadas, bem como as respectivas normas técnicas adotadas, estão organizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas dos materiais e respectivas normas técnicas.

Material	Propriedade	Norma Técnica
Agregado Miúdo	Granulometria	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Vermiculita (VE)	Massa Específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)
	Porcentagem de Finos	NBR 16973 (ABNT, 2021)
Cimento (CPV)		
Filler Calcário (FC)	Massa Específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Metacaulim (MK)		

### 2.1.1 Agregado

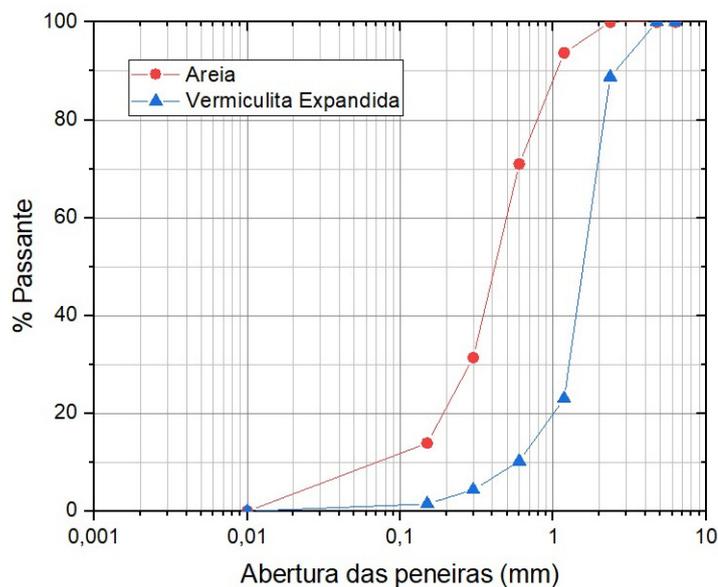
Para a caracterização dos agregados empregados nas formulações, foi adotado um protocolo experimental que seguiu rigorosamente os procedimentos normativos estabelecidos. Inicialmente, as amostras foram obtidas por meio de quarteamento, de modo a garantir a homogeneidade e a confiabilidade estatística dos materiais analisados.

No caso da areia natural, utilizada como agregado miúdo convencional, e da vermiculita expandida, inserida como agregado leve, os ensaios de caracterização buscaram avaliar propriedades físicas fundamentais para o desempenho reológico das misturas — especialmente em um contexto de impressão 3D, no qual o comportamento no estado fresco é um fator crítico.

Esses parâmetros são essenciais para o entendimento do comportamento das partículas durante o processo de extrusão e assentamento em camadas sucessivas, já que granulometrias inadequadas podem comprometer tanto a extrudabilidade quanto a adesão entre as camadas. No caso da vermiculita, por exemplo, sua estrutura lamelar expandida e alta porosidade influenciam diretamente na retenção de água e na densidade final do compósito, podendo afetar tanto a fluidez quanto a estabilidade dimensional do compósito.

A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas obtidas para os dois agregados, enquanto os resultados quantitativos de massa específica, módulo de finura e outros parâmetros físicos estão organizados nas Tabela 2.

Figura 1 – Granulometria da areia e vermiculita expandida.



Fonte: Autor, 2025.

Tabela 2 – Caracterização dos agregados.

Propriedade	Material	Valor
Massa específica ( $g/cm^3$ )	Areia	2,60

	Vermiculita	0,22
Massa Unitária solta ( $g/cm^3$ )	Areia	1,55
	Vermiculita	0,11
Módulo de Finura (%)	Areia	1,90
	Vermiculita	3,72
Diâmetro Máximo Característico (mm)	Areia	2,36
	Vermiculita	4,75
Teor de Material Pulverulento (%)	Areia	6,77
	Vermiculita	0,70

---

Fonte: Autor, 2025.

### **2.1.2 Aglomerante**

As formulações desenvolvidas utilizaram o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) como aglomerante. Sua escolha se deve à ausência de adições minerais e à rapidez de pega, características que favorecem a estabilidade das camadas extrudadas na impressão 3D dos compósitos. O material apresenta massa específica de  $3,04 g/cm^3$  e diâmetro médio das partículas de  $8,04 \mu m$ .

### **2.1.3 Aditivo**

Para garantir o desempenho adequado das misturas no estado fresco, foram incorporados dois aditivos químicos: um superplastificante à base de policarboxilatos, que melhora a fluidez com menor teor de água, e um modificador de viscosidade à base de hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), que aumenta a retenção de água e a coesão da mistura.

### **2.1.4 Adições minerais**

Foram utilizadas adições minerais como o filler calcário, massa específica de  $2,85 g/cm^3$ , e o metacaulim, massa específica de  $2,63 g/cm^3$ , que contribuem para o empacotamento das partículas e a reatividade pozolânica, respectivamente, favorecendo a sustentabilidade e o desempenho técnico do compósito.

### **2.1.5 Água de amassamento**

A água de amassamento foi potável e proveniente da rede pública, ajustada conforme as necessidades da mistura.

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Sistema de impressão, preparação e definição das misturas

A impressão dos compósitos cimentícios foi realizada por meio de uma impressora 3D desenvolvida pela empresa 3DEcohouse em conjunto com grupo de pesquisa do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), com configuração do tipo pórtico e base cartesiana. O equipamento foi projetado para operar com peças de até 1,0 m<sup>3</sup>, possuindo movimentação automatizada em seus eixos e bico extrusor circular com 40 mm de diâmetro, responsável pela deposição das camadas.

O preparo das misturas foi realizado em uma argamassadeira com controle de dupla velocidade, seguindo uma sequência padronizada de dosagem e mistura. Inicialmente, a vermiculita expandida foi submetida à pré-saturação com 60% da água de amassamento, permanecendo hidratada por um período de 1 hora. Após essa etapa, iniciou-se a homogeneização do cimento e areia.

Em seguida, incorporação de 30% da água de amassamento, posteriormente a vermiculita foi incorporada à mistura. Na etapa seguinte, o aditivo superplastificante foi colocado juntamente aos 10% finais da água. Logo mais, adiciona-se o filler calcário e posteriormente o metacaulim. Por fim, adicionou-se o aditivo modificador de viscosidade (HPMC), garantindo a completa homogeneização dos materiais.

Com base em estudos preliminares e em formulações consolidadas na literatura (Barbosa *et al.*, 2022; Nunes *et al.*, 2023), adotou-se como base a proporção 1:2,0:0,36 (cimento:areia:água, em massa). No entanto, para formular uma mistura com consumo de cimento (CC) reduzido, substituiu-se parcialmente o cimento por 40% de filler e 15% de metacaulim. A partir dessa nova composição (CC = 303,55 kg/m<sup>3</sup>), foram definidos traços experimentais nos quais se realizou a substituição parcial da areia natural por vermiculita expandida nos teores de 50%, 75% e 100%. Importante destacar que essa substituição foi feita com base em equivalência volumétrica, tendo em vista a significativa diferença de densidade entre os dois agregados.

Durante a preparação das misturas com vermiculita, foi necessário realizar ajustes graduais na relação de água/cimento. Inicialmente, manteve-se as mesmas proporções dos aditivos, e aumentou-se progressivamente a água até alcançar uma consistência visualmente adequada. Em seguida, adicionou-se o HPMC, cujo efeito redutor de consistência foi compensado por ajustes na quantidade de água. O processo de ajuste seguiu uma lógica sequencial, respeitando os limites técnicos dos aditivos e as características de impressão desejadas. A consistência ideal foi determinada com base em ensaios de espalhamento na mesa de consistência, buscando manter valores entre 200 mm e 230 mm, faixa considerada adequada para impressão no sistema utilizado (Dias, 2022). A esquematização dessas etapas é apresentada na Figura 2.

Figura 2 - Sistematização do processo de mistura das composições



Fonte: Autor, 2025.

Finalizada a preparação das misturas, os compósitos foram submetidos a ensaios no estado fresco e, posteriormente, à impressão de peças de referência para avaliação da retenção de forma. O sistema de impressão permite ajustes de altura de deposição da mistura, número de camadas e taxa de extrusão, possibilitando a avaliação prática do desempenho de cada traço testado. Essa etapa foi essencial para validar a compatibilidade das formulações com os parâmetros operacionais da impressora e com o comportamento esperado dos materiais ao longo do processo construtivo. Assim, as proporções avaliadas são destacadas pela tabela 3.

Tabela 3 – Proporções adotadas em massa

Traços	Cimento	Areia	FC	VE	MK	SP (%)	HPMC (%)	A/C
REF	1	4,44	0,89	0,00	0,33	0,90	0,15	0,82
VE50	1	2,22	0,89	0,16	0,33	0,90	0,15	1,02
VE75	1	1,11	0,89	0,23	0,33	0,90	0,15	1,07
VE100	1	0	0,89	0,31	0,33	0,90	0,15	1,26

Fonte: Autor, 2025.

## 2.2.2 Ensaios no estado fresco

### 2.2.2.1 Espalhamento

A fluidez das misturas foi avaliada por meio do ensaio de espalhamento na mesa de consistência, realizado conforme as diretrizes da ABNT NBR 13276:2016. O ensaio foi conduzido logo após a preparação das misturas, utilizando molde tronco-cônico com 100 mm de base inferior e 50 mm de topo, preenchido em três camadas sucessivas. Cada camada foi adensada com 15, 10 e 5 golpes, respectivamente, totalizando o preenchimento do molde. Após a retirada vertical do cone, a mesa foi acionada com 30 golpes em um intervalo de  $30 \pm 1$  segundos, permitindo o escoamento livre do compósito sobre a superfície metálica. O diâmetro do material espalhado foi então medido em três direções perpendiculares, sendo utilizada a média como valor representativo da consistência da mistura.

Tendo em vista as exigências específicas da impressão 3D de compósitos cimentícios este ensaio foi repetido em diferentes intervalos de tempo com o objetivo de avaliar a variação da consistência ao longo do tempo, característica diretamente ligada à tixotropia e à estabilidade reológica das compósitos cimentícios. As medições de espalhamento foram realizadas nos tempos t0 (imediatamente após mistura), t1 (10 min), t2 (20 min), t3 (30 min), t40 (40 min), t50 (50 min) e t60 (60 min) simulando o comportamento da mistura ao longo do processo de impressão em camadas contínuas (Figura 3). A análise desses resultados permitiu avaliar a manutenção da fluidez.

Figura 3 – Perda progressiva da plasticidade da composição padrão.



Fonte: Autor, 2025.

### 2.2.2.2 Densidade teórica e no estado fresco

A densidade de massa teórica das misturas foi determinada a partir da regra da mistura, conforme recomendações da NBR 13278 (ABNT, 1995). Nesse método, considera-se que cada componente sólido da argamassa (cimento, agregados e adições) contribui com um volume proporcional à sua massa e densidade real, sem a presença de vazios ou ar incorporado. Assim, a densidade teórica resulta da razão entre a soma das massas de todos os materiais constituintes (aglomerante, agregado e adições) e a soma dos respectivos volumes individuais, calculados a partir da divisão da massa pela densidade de cada componente, acrescidos do volume de água de amassamento. Esse procedimento permite obter um valor de referência que, quando comparado com a densidade no estado fresco, possibilita estimar o teor de ar incorporado à mistura e avaliar sua homogeneidade.

Já o ensaio de densidade de massa no estado fresco foi realizado com base na ABNT NBR 13278:2005, utilizando moldes cilíndricos preenchidos em três camadas, com aplicação de 20 golpes de espátula por camada e três quedas do molde a partir de uma altura de 3 cm. Após o preenchimento e o rasamento da superfície, o conjunto foi pesado, e a densidade foi calculada a partir da razão entre massa e volume do molde (Figura 4). Essa propriedade é fundamental para avaliar o impacto da substituição parcial da areia pela vermiculita expandida, além de indicar o grau de leveza do compósito produzido, o que influencia diretamente na capacidade de empilhamento das camadas e na estabilidade das peças impressas.

Figura 4 – Conjunto pesado pós ensaio.



Fonte: Autor, 2025.

### 2.2.2.3 Viscosidade

As propriedades reológicas das misturas cimentícias exercem papel fundamental na impressão 3D, influenciando diretamente na extrudabilidade, na estabilidade das camadas e na retenção de forma. Entre essas propriedades, a viscosidade é uma das mais relevantes, por estar diretamente relacionada ao comportamento da mistura sob cisalhamento e à sua capacidade de manter a forma após a extrusão. Para garantir uma caracterização precisa dessa propriedade, foram realizados ensaios com uso de um viscosímetro rotacional Rotavisc hi-vi I (IKA®), operando à temperatura controlada de 25 °C.

As medições foram realizadas em um béquer de 500 mL, utilizando uma palheta de quatro pás, com 95 mm de comprimento e 5,9 mm de diâmetro, previamente imersa na amostra. Com o intuito de minimizar os efeitos da tixotropia e induzir o material ao regime de fluxo estável, foi adotado um ciclo de histerese, composto por variações progressivas e regressivas da velocidade angular. Inicialmente, a mistura foi submetida a uma sequência de velocidades crescentes: 10 rpm, 20 rpm, 30 rpm, 40 rpm, 50 rpm, 60 rpm, 70 rpm, 80 rpm, 90 rpm, 100 rpm, 110 rpm, 120 rpm, 130 rpm, 140 rpm e 150 rpm. Em seguida, aplicou-se a mesma sequência de forma decrescente, permitindo o monitoramento da curva de fluxo e a identificação de possíveis variações reológicas associadas à estrutura interna da mistura.

Esse procedimento seguiu recomendações similares às adotadas em estudos prévios, como o de Nunes *et al.* (2023), e busca capturar a influência do comportamento tixotrópico dos compósitos. A repetição dos ciclos, com controle da temperatura e da velocidade angular, contribuiu para garantir maior confiabilidade nos valores de viscosidade obtidos, respeitando a condição de homogeneidade e dispersão dos componentes durante o ensaio.

A Figura 5 mostra o viscosímetro utilizado, bem como a palheta de quatro pás.

Figura 5 – (a) Viscosímetro rotacional Rotavisc hi-vi I (IKA®); (b) Palheta de quatro pás.



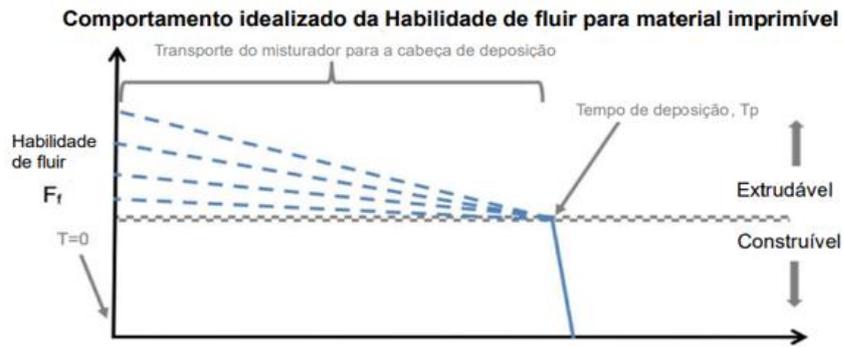
Fonte: Autor, 2025.

#### 2.2.2.4 Retenção de Forma

A retenção de forma é uma propriedade essencial em compósitos para impressão 3D, pois está diretamente ligada à capacidade do material em manter sua geometria extrudada ao longo da deposição das camadas, sem deformações excessivas. A retenção de forma considera a manutenção da forma impressa camada a camada, sob a ação do peso das subsequentes.

Segundo Soltan e Li (2018), o material ideal para impressão 3D deve apresentar fluidez adequada no momento da extrusão, edificação imediata após a deposição e endurecimento progressivo ao longo do tempo. A Figura 6 resume esse comportamento em função da evolução da fluidez entre o final da mistura e o fim da impressão.

Figura 6 - Comportamento idealizado da habilidade de fluir para material imprimível.



Fonte: Adaptado de SOLTAN; Li, 2018

No presente estudo, o ensaio de retenção de forma foi conduzido utilizando velocidades de impressão e taxa de extrusão ajustadas para cada composição analisada. Inicialmente, observou-se a continuidade, aspecto visual e deformação de uma única camada extrudada, a fim de identificar a faixa ideal de extrusão para cada mistura.

Em seguida, foi realizado o empilhamento de quatro camadas, e a retenção de forma foi quantificada por meio da relação Hc, expressa pela Equação 1:

$$HC = \frac{Hr}{Ht} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

Hr = altura real medida após o empilhamento das quatro camadas;

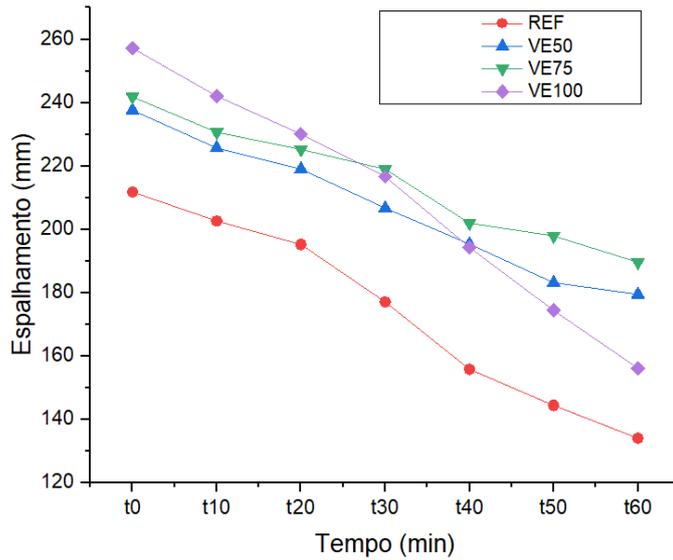
Ht = altura teórica, obtida como o produto da altura da primeira camada (H) por quatro (Ht = 4H).

Valores de Hc próximos de 1 indicam excelente retenção de forma, com mínima deformação vertical ao longo do processo. Esse ensaio permitiu comparar o desempenho entre os diferentes teores de vermiculita expandida, considerando os efeitos de sua porosidade e absorção de água na capacidade do compósito de reter sua forma impressa.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do ensaio de espalhamento são apresentados na Figura 7, evidenciando que as composições analisadas se mantêm dentro da faixa adequada para o sistema de impressão considerado. A figura também ilustra a evolução do espalhamento ao longo dos diferentes intervalos de tempo avaliados. Cabe destacar que esses parâmetros não são universalmente aplicáveis a todos os sistemas de impressão, uma vez que o desempenho final depende tanto das propriedades intrínsecas dos compósitos quanto das características operacionais da impressora utilizada.

Figura 7 – Espalhamento das composições analisadas na mesa de consistência.



Fonte: Autor, 2025.

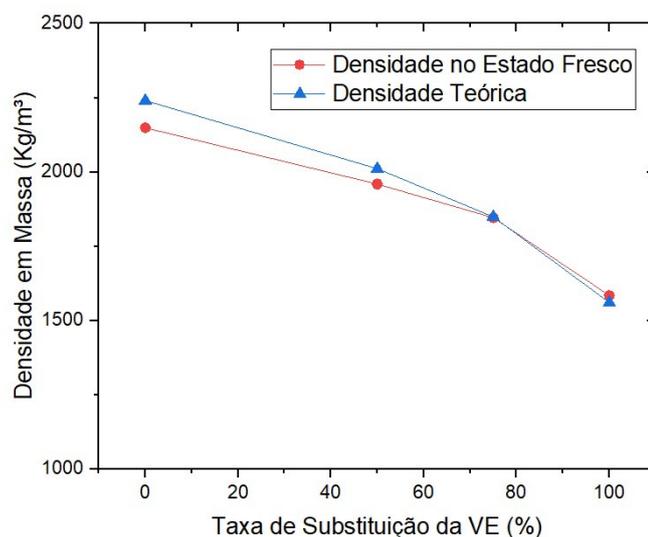
A análise dos resultados do ensaio de espalhamento evidencia o impacto significativo da substituição da areia natural por vermiculita expandida no estado fresco das misturas. Observou-se que a composição VE100 apresentou o maior índice de espalhamento entre os traços avaliados, comportamento atribuído ao aumento do teor de água necessário para atender à elevada absorção do agregado leve, mesmo após a etapa de pré-saturação. Vale destacar que a dosagem de superplastificante foi mantida constante em 0,9% para todas as formulações, reforçando que a variação na fluidez esteve diretamente relacionada ao teor de vermiculita presente. Em comparação ao traço de referência (REF), os valores de espalhamento indicaram acréscimos de aproximadamente 12,17%, 14,16% e 21,42% para VE50, VE75 e VE100, respectivamente, evidenciando uma tendência de maior abertura das misturas com o aumento da substituição volumétrica da areia.

A avaliação da evolução da consistência ao longo do tempo revelou uma perda progressiva de fluidez mais acentuada nas misturas com agregado leve. Entre os intervalos t0 e t20, as reduções de espalhamento foram de 7,84%, 8,80%, 10,99% e 10,54% para REF, VE50, VE75 e VE100, respectivamente. Esse comportamento está associado à elevada absorção da vermiculita, que promove maior absorção de água livre reduzindo a trabalhabilidade dos compósitos. Resultados semelhantes foram observados por Barbosa *et al.* (2022) e Nunes *et al.* (2023), que destacam a necessidade de ajuste fino da relação água/aglomerante e do tempo de pré-saturação em misturas destinadas à impressão 3D.

Embora tais variações já fossem esperadas em função da utilização de agregados leves, ressalta-se que os valores obtidos não podem ser generalizados como limites universais para sistemas de impressão. Isso ocorre porque o desempenho das misturas em impressão 3D depende não apenas da composição e do teor de água, mas também das características específicas da impressora utilizada, incluindo parâmetros como pressão de bombeamento, diâmetro do bico extrusor e velocidade de deposição (Buswell *et al.*, 2018; Wolfs *et al.*, 2019). Sob a perspectiva prática, misturas que apresentam perda de fluidez controlada nesse intervalo de tempo indicam maior estabilidade de manuseio e menor propensão a falhas de bombeamento, reforçando o potencial técnico das formulações avaliadas para aplicação em impressão 3D de compósitos cimentícios.

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos para a densidade de massa teórica e a densidade no estado fresco das misturas avaliadas.

Figura 8 – Comparativo entre os valores de densidade teórica e no estado fresco



Fonte: Autor, 2025.

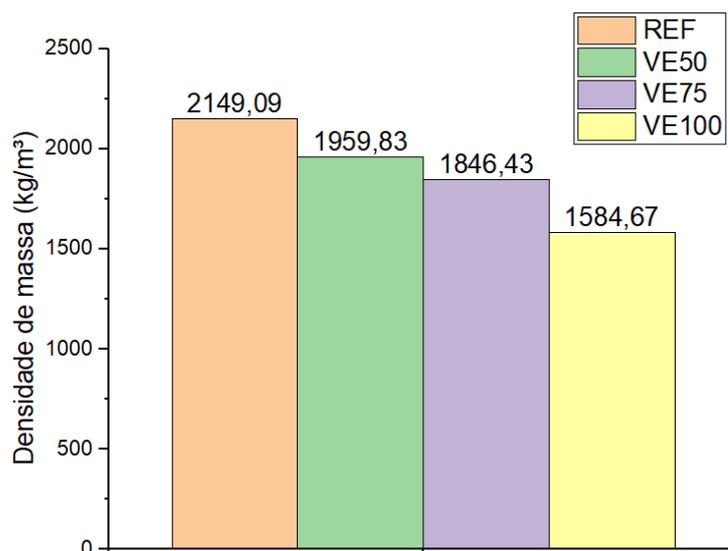
A análise dos resultados mostrou que, nos traços com maiores teores de vermiculita (VE75 e VE100), a diferença entre a densidade teórica e a densidade medida no estado fresco foi menor do que nos traços REF e VE50. Essa maior aproximação entre as curvas indica que o processo de pré-saturação da vermiculita, aliado à compensação hídrica necessária para manter a extrudabilidade, atuou reduzindo discrepâncias entre os valores obtidos. Esse efeito pode ser atribuído ao fato de que, ao serem previamente saturados, os poros da vermiculita já estavam parcialmente preenchidos de água antes do preparo das misturas, o que reduziu absorções adicionais significativas durante a homogeneização.

Tal comportamento encontra respaldo nas características intrínsecas da vermiculita, marcada por sua alta porosidade e elevada capacidade de absorção, que exigem maiores teores de água para garantir trabalhabilidade e coesão adequadas à extrudabilidade (Ugarte *et al.*, 2005; Carvalhaes, 2015). Resultados semelhantes foram reportados em estudos com argamassas leves e compósitos para impressão 3D, nos quais misturas com agregados de elevada absorção apresentaram densidades aparentes no estado fresco próximas aos valores teóricos em função da água presente na matriz. Contudo, após o processo de cura, observou-se uma redução mais acentuada da densidade, decorrente da evaporação da água não reativa (Barbosa *et al.*, 2024; Nunes *et al.*, 2023).

Dessa forma, é plausível considerar que, no estado endurecido, as misturas VE75 e VE100 apresentem quedas mais expressivas de densidade em relação aos valores medidos no fresco, uma vez que parte da água incorporada não participará das reações de hidratação, mas será perdida por evaporação. Esse fenômeno tende a ampliar a distância entre os valores teóricos e os valores efetivos de densidade endurecida (Rossignolo, 2009).

Sob a ótica metodológica, esses resultados reforçam a importância de diferenciar claramente as medições em estado fresco — influenciadas pela água de amassamento e pelas condições de pré-saturação — das medições em estado endurecido. Além disso, destaca-se a relevância de registrar de forma detalhada a quantidade de água adicionada e o procedimento de pré-saturação do agregado, fatores determinantes para a compensação observada nos ensaios (NBR 13278:1995; Barbosa *et al.*, 2024). Na sequência, os resultados obtidos para densidade de massa são destacados na Figura 9.

Figura 9 – Resultados de densidade de massa dos compósitos



Fonte: Autor, 2025.

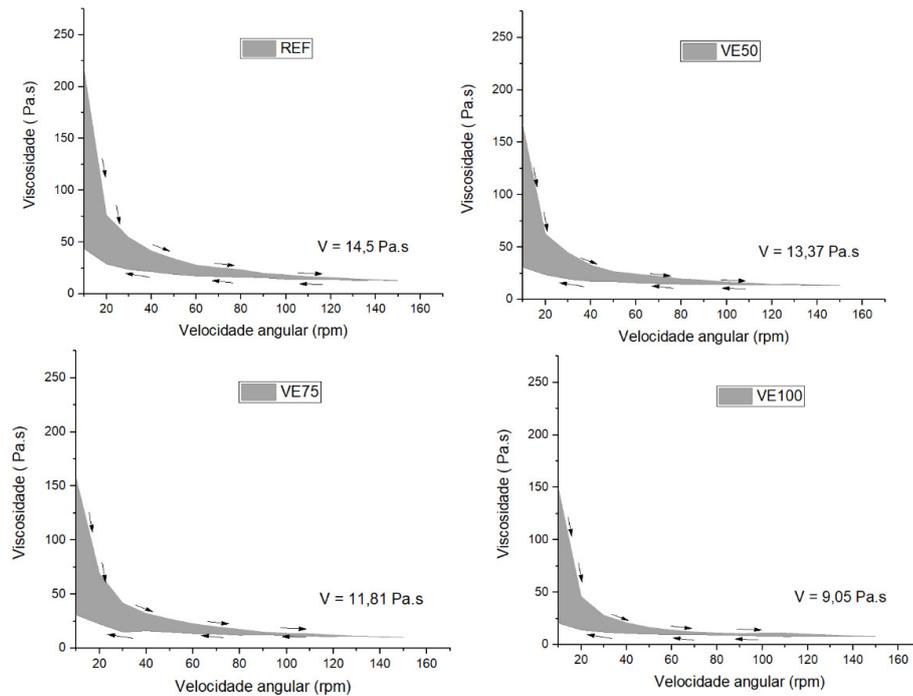
A análise da densidade de massa das misturas evidenciou uma tendência clara de redução à medida que a substituição volumétrica da areia natural por vermiculita expandida foi aumentada. Essa redução era esperada devido à baixa densidade do agregado leve, que apresenta estrutura lamelar altamente porosa e menor massa específica em comparação com a areia natural, conforme destacado por Ugarte *et al.* (2005) e Rossignolo (2009). Em relação ao traço de referência (REF), as reduções constatadas foram de 8,81%, 14,08% e 26,26% para VE50, VE75 e VE100, respectivamente, demonstrando uma relação diretamente proporcional entre o teor de vermiculita e a diminuição da densidade dos compósitos cimentícios.

A influência da vermiculita sobre essa propriedade está intimamente ligada ao seu processo de expansão térmica, que confere ao material uma massa específica aparente extremamente baixa (entre 56 kg/m³ e 192 kg/m³), além de alta capacidade de absorção de água (Carvalhoes, 2015; Barbosa *et al.*, 2024). Essa característica, quando incorporada ao compósito cimentício, não apenas reduz sua densidade, mas também impacta o comportamento reológico e a capacidade de impressão, uma vez que compósitos mais leves tendem a exigir ajustes na dosagem de aditivos e no controle do teor de água para garantir coesão e estabilidade dimensional.

Essa característica pode ser vantajosa em aplicações que demandam elementos construtivos mais leves, como componentes modulares e pré-fabricados, além de estar associada, em estudos prévios, à redução da condutividade térmica de compósitos cimentícios, o que pode contribuir indiretamente para ganhos de desempenho energético em edificações (Gencel *et al.*, 2012; Araújo, 2022). Ressalta-se, entretanto, que este estudo não realizou Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), de modo que potenciais benefícios ambientais decorrentes do uso de VE permanecem dependentes do contexto do projeto e do ciclo operacional da edificação. Assim, neste trabalho, a análise concentra-se no desempenho material, evidenciando que a substituição parcial da areia por VE é uma estratégia viável para reduzir a densidade dos compósitos sem comprometer sua aplicabilidade em processos de impressão 3D.

A Figura 10 apresenta a viscosidade dos compósitos relacionada à velocidade angular. Nota-se que as misturas são avaliadas como tixotrópicas, uma vez que a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento e, ao reduzir a rotação, a viscosidade aumenta.

Figura 10 – Viscosidade dos compósitos em relação à velocidade angular.



Fonte: Autor, 2025.

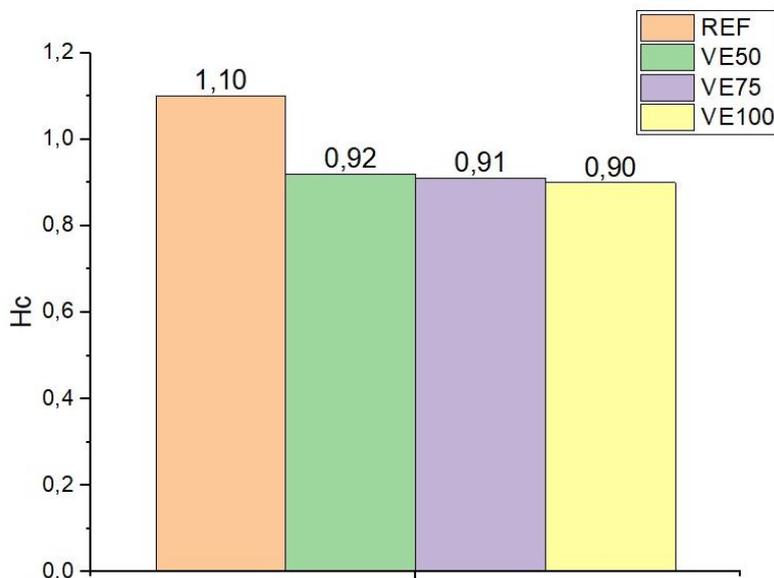
Por meio da Figura 10, observa-se que o traço de referência (REF) apresenta valores de viscosidade mais elevados em comparação aos demais compósitos, comportamento atribuído ao menor teor de água de amassamento utilizado nesta formulação, o que limitou a mobilidade das partículas e aumentou a força de atrito interno entre elas. Esse resultado está em consonância com a literatura, que destaca que relações água/cimento ( $a/c$ ) mais baixas tendem a elevar a viscosidade plástica devido ao adensamento da matriz cimentícia e a menor disponibilidade de água livre para lubrificação das partículas (Long *et al.*, 2019; Roussel & Cussigh, 2008).

Por outro lado, o traço VE100 apresentou a menor viscosidade aparente entre as misturas, resultado diretamente associado ao elevado teor de água de amassamento utilizado para viabilizar sua extrusão. Embora a vermiculita expandida possua alta porosidade e estrutura lamelar, a grande quantidade de água incorporada compensou esses efeitos, reduzindo a viscosidade do sistema. É importante destacar que os valores de viscosidade destacados nos gráficos correspondem ao comportamento das misturas no momento da impressão, ou seja, para a taxa de extrusão específica adotada nos ensaios. Esse comportamento evidencia que, para formulações com altos teores de agregados leves, ajustes significativos na água de amassamento são necessários para garantir a extrudabilidade, ainda que isso resulte em misturas com menor resistência à deformação e maior suscetibilidade a variações reológicas (TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005; ARAÚJO, 2022).

De forma geral, os resultados indicam que a substituição gradual da areia natural por vermiculita expandida demanda ajustes criteriosos na dosagem de água e aditivos para manter a extrudabilidade e o equilíbrio reológico necessários à impressão 3D. Essa tendência é corroborada por pesquisas que apontam que misturas para manufatura aditiva exigem uma faixa específica de viscosidade, suficiente para garantir coesão e retenção de forma, mas sem comprometer a bombeabilidade do material (Perrot *et al.*, 2016; Panda *et al.*, 2019). Assim, o comportamento identificado reforça o desafio do desenvolvimento de compósitos leves para 3DP-CC, nos quais a alta absorção de água dos agregados deve ser compensada por ajustes precisos na formulação para evitar instabilidades durante a impressão.

A Figura 11 destaca as relações de retenção de forma (HC) obtidas para as composições de análise.

Figura 11 – Retenção de forma dos traços avaliados



Fonte: Autor, 2025.

A análise dos resultados de retenção de forma mostrou que as misturas com vermiculita expandida (VE50, VE75 e VE100) apresentaram índices muito próximos entre si — 0,92, 0,91 e 0,90, respectivamente —, evidenciando que o aumento do teor de agregado leve não comprometeu significativamente a estabilidade geométrica das peças impressas. A composição de referência (REF), por sua maior viscosidade, apresentou melhor retenção de forma, porém as misturas leves conseguiram manter desempenho semelhante graças aos ajustes realizados nos parâmetros de impressão, como taxa de extrusão e altura de deposição. Esses resultados reforçam que, mesmo com a maior demanda de água e a natureza porosa da vermiculita, foi possível obter estabilidade satisfatória nas camadas impressas, demonstrando o potencial da utilização desse agregado leve em sistemas de impressão 3D sem perdas expressivas na fidelidade dimensional.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros adotados na impressão das peças de 3DP-CC e os valores obtidos experimentalmente para cada formulação. A definição desses valores seguiu procedimentos experimentais e cálculos teóricos. A altura de deposição foi fixada em 35 mm, equivalente ao diâmetro do bico extrusor, garantindo uniformidade na aplicação das camadas. A velocidade de impressão foi ajustada conforme a trabalhabilidade de cada mistura, definida em ensaios preliminares para assegurar fluxo estável sem falhas de deposição. A taxa de extrusão (Hz) foi determinada a partir da vazão necessária para preencher a largura de camada correspondente à velocidade de impressão, sendo ajustada experimentalmente conforme a reologia das misturas.

O número de camadas empilhadas foi padronizado em quatro para todas as formulações, permitindo avaliar a deformação acumulada. A altura da primeira camada foi aferida com paquímetro imediatamente após a deposição, possibilitando verificar o adensamento inicial causado pelo peso próprio das camadas subsequentes. A altura teórica prevista corresponde ao valor calculado pelo produto da altura de deposição pelo número de camadas. Por fim, a altura real das peças foi obtida por medição direta com régua milimetrada após a estabilização inicial, evidenciando a redução em relação ao valor teórico, efeito atribuído à deformação plástica das camadas, dependente das propriedades reológicas e do teor de vermiculita expandida em cada traço.

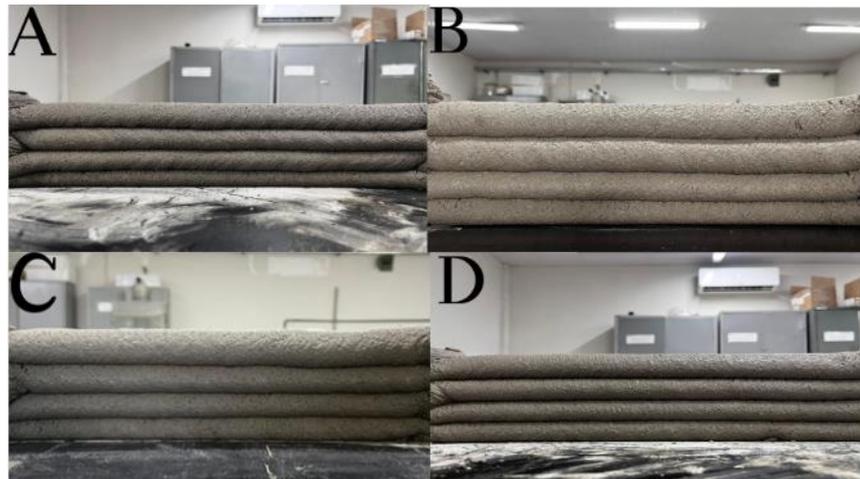
Tabela 4 – Parâmetros utilizados na impressão das peças 3DP-CC

Misturas	Altura de deposição (mm)	Velocidade de impressão (mm/min)	Taxa de extrusão (Hz)	N° de camadas empilhadas	Altura da primeira camada (mm)	Altura Teórica prevista (mm)	Altura real das peças (mm)
REF	35	2000	53	4	25	100	97
VE50	35	3000	40	4	29	116	107
VE75	35	3000	40	4	29	116	106
VE100	35	2000	40	4	27	108	97

Fonte: Autor, 2025.

Estudos prévios corroboram esses achados ao demonstrarem que materiais cimentícios com alta porosidade, baixa densidade de partículas e elevado teor de água tendem a apresentar redução no limite de escoamento e na capacidade de retenção de forma (Toutou; Roussel; Lanos, 2005; Perrot *et al.*, 2016; Araújo, 2022). Em sistemas para impressão 3D, esse fenômeno impacta diretamente a estabilidade geométrica do elemento, pois a menor resistência estrutural inicial compromete a capacidade do material de sustentar as camadas subsequentes sem apresentar colapsos parciais ou escoamentos laterais. A Figura 10 ilustra o aspecto dos elementos impressos.

Figura 12 – Elementos impressos: (a) REF, (b) VE50, (c) VE75, (d) VE100



Fonte: Autor, 2025.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Frente ao exposto, verifica-se que o presente artigo cumpriu com o objetivo inicialmente proposto ao avaliar o comportamento no estado fresco de compósitos cimentícios para impressão 3D, com substituição parcial da areia natural por vermiculita expandida (VE) em diferentes teores, analisando parâmetros como espalhamento, densidade de massa, viscosidade e retenção de forma. Os resultados obtidos permitem destacar algumas conclusões relevantes:

- A substituição da areia natural por vermiculita expandida impactou significativamente as propriedades no estado fresco. Observou-se uma redução progressiva da densidade de massa com o aumento do teor de VE, associada à baixa densidade do agregado leve e sua elevada porosidade. Embora a redução de massa própria favoreça aspectos como facilidade de

manuseio e menor sobrecarga estrutural, o ganho em sustentabilidade depende de uma avaliação mais ampla do ciclo de vida, considerando impactos ambientais da extração, beneficiamento e transporte de cada material. Assim, os resultados reforçam o potencial da vermiculita como alternativa técnica para desenvolvimento de compósitos mais leves e otimizados para manufatura aditiva, sem assumir diretamente menor impacto ambiental sem estudos complementares.

- A incorporação da vermiculita expandida aumentou a demanda de água das misturas devido à alta absorção do agregado, afetando o espalhamento e a viscosidade. Misturas com maior teor de VE apresentaram tendência a maior perda de consistência ao longo do tempo, reforçando a necessidade de ajustes na dosagem e uso de aditivos para manter a estabilidade do material durante a impressão.
- Observou-se que, embora a mistura de referência tenha apresentado maior retenção de forma em razão de sua maior viscosidade, os compósitos com vermiculita expandida mantiveram índices próximos, sem perdas significativas de estabilidade geométrica. Os resultados indicam que ajustes na relação água/cimento e nos parâmetros de impressão foram fundamentais para garantir fidelidade dimensional, mesmo com altos teores de agregado leve.
- A utilização da vermiculita como agregado leve alternativo demonstrou resultados satisfatórios. Ainda assim, os resultados evidenciam a importância de um equilíbrio entre leveza, coesão e estabilidade demandando estudos adicionais sobre aditivos e estratégias de pré-saturação do agregado para otimizar o desempenho no estado fresco.
- Dentre os compósitos analisados, a formulação VE50 destacou-se como a mistura que melhor atendeu às demandas do processo de impressão 3D, conciliando desempenho no estado fresco, estabilidade geométrica e viabilidade de extrusão. Esse traço apresentou comportamento intermediário de espalhamento e viscosidade, garantindo fluidez suficiente para bombeamento e deposição contínua sem comprometer a coesão das camadas. Além disso, manteve índices de retenção de forma próximos ao traço de referência, evidenciando que a substituição parcial de 50% da areia por vermiculita expandida não comprometeu a estabilidade estrutural imediata dos elementos impressos.
- Recomenda-se, por fim, que trabalhos futuros avancem em três direções: avaliação sistemática da densidade no estado endurecido para quantificar as perdas de massa por evaporação; análise do teor de ar incorporado por meio da comparação entre densidade teórica e fresca; e estudos complementares sobre diferentes tempos de pré-saturação e estratégias de ajuste da dosagem hídrica, visando reduzir as variações entre estados fresco e endurecido (Nunes *et al.*, 2023; Araújo, 2022). Essas medidas permitem separar com maior clareza os efeitos da compensação hídrica daqueles relacionados às propriedades estruturais da vermiculita, contribuindo para formulações mais consistentes e confiáveis em impressão 3D.

Os resultados reforçam o potencial da vermiculita expandida como um agregado leve alternativo para a tecnologia 3DP-CC, evidenciando que a adoção desse material pode promover redução significativa no consumo de areia natural e na densidade dos compósitos, sem prejudicar a qualidade do processo construtivo. Assim, este estudo contribui para ampliar a compreensão sobre o uso de agregados leves em impressão 3D de compósitos cimentícios.

## 5 AGRADECIMENTOS

O autor agradece o suporte fornecido pelo meu professor orientador, Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos, por ter me aceitado como orientando neste projeto tão inovador. À minha co-orientadora, M.Sc. Marcella de Sena Barbosa, pelas contribuições, disponibilidade, parceria, apoio e compreensão durante esta jornada. Ao Dr. Ulisses Targino Bezerra, por suas observações e colaborações tão pertinentes na avaliação do trabalho. Ao IFPB, à equipe de pesquisa do IFPB, bem como a empresa 3DECOHOUSE pela ajuda e suporte indispensáveis durante toda essa caminhada.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.
- BARBOSA, M. Desenvolvimento de compósitos cimentícios para impressão 3D. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.
- BARBOSA, M. *et al.* Avaliação de argamassas leves para impressão 3D: propriedades reológicas e construtibilidade. **Revista Matéria**, v. 29, n. 3, 2024.
- BEDARF, P.; CALVO-BARENTIN, C.; SCHULTE, D. M.; ŞENOL, A.; JEOFFROY, E.; DILLENBURGER, B. *Mineral composites: stay-in-place formwork for concrete using foam 3D printing.* **Architecture, Structures & Construction**, v. 3, p. 251–262, 11 fev. 2023.
- BEISER, V. The world in a grain: The story of sand and how it transformed civilization. **New York: Riverhead Books**, 2017.
- BOS, F. *et al.* 3D Printing Concrete: Research and Development on a Novel Technology. **Cement and Concrete Research**, v. 149, p. 106764, 2022.
- BUSWELL, R. A. *et al.* 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 37-49, 2018.
- CARVALHAES, P. C. A vermiculita expandida como agregado leve. **Revista Materiais de Construção**, v. 6, p. 34-40, 2015.
- CHEN, Y. *et al.* A novel design of printable mortar with enhanced buildability and mechanical properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 113, p. 103700, 2020.
- DING, T. *et al.* Mechanical properties of 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 119-151, 2020.
- GENCEL, O.; KOKSAL, F.; SAHIN, M.; DURGUN, M. Y.; HAGG LOBLAND, H. E.; BROSTOW, W. Modeling of Thermal Conductivity of Concrete with Vermiculite by Using Artificial Neural Networks Approaches. **Experimental Heat Transfer**, v. 26, n. 4, p. 360-383, 2013. DOI: 10.1080/08916152.2012.669810
- HUANG, Y. *et al.* Geometric stability in 3D printing of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 315, p. 125694, 2022.
- KAZEMIAN, A. *et al.* Construction-scale 3D printing: Automation and building design. **Automation in Construction**, v. 82, p. 31-47, 2017.
- LI, Z. *et al.* 3D printing of concrete: A review for material formulations and structural performance. **Automation in Construction**, v. 100, p. 1-20, 2018.
- LONG, W. J. *et al.* Rheology control of 3D printable cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 103360, 2019.
- NUNES, R. *et al.* Investigação de argamassas para impressão 3D: relações entre aditivos e extrudabilidade. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 16, n. 1, 2023.

PAMENTER, R.; MYERS, J. Cement production and CO2 emissions: An overview. **Journal of Cleaner Production**, v. 320, p. 128623, 2021.

PANDA, B. *et al.* Buildable 3D printing concrete mixture design based on particle packing. **Materials**, v. 12, n. 9, p. 1506, 2019.

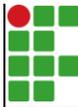
ROCHA, F. *et al.* Concrete sustainability: Emissions and environmental impacts. **Journal of Building Engineering**, v. 50, p. 104176, 2022.

ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve estrutural: Teoria e prática. São Paulo: **PINI**, 2009.

TING, C. S. *et al.* Printable concrete with optimized rheology for construction automation. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119271, 2021.

UGARTE, P. *et al.* Vermiculite: properties and applications in construction. **Construction Materials Journal**, v. 12, n. 2, p. 56-63, 2005.

WOLFS, R. J. M. *et al.* 3D printing of concrete structures: Robustness and dimensional accuracy. **Cement and Concrete Research**, v. 111, p. 356-364, 2018.

	<b>INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA</b>
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### Entrega de TCC

<b>Assunto:</b>	Entrega de TCC
<b>Assinado por:</b>	Gustavo Cunha
<b>Tipo do Documento:</b>	Anexo
<b>Situação:</b>	Finalizado
<b>Nível de Acesso:</b>	Ostensivo (Público)
<b>Tipo do Conferência:</b>	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Gustavo de Lima Seixas Cunha, DISCENTE (202022220033) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - JOÃO PESSOA**, em 14/09/2025 23:02:51.

Este documento foi armazenado no SUAP em 14/09/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1608264

Código de Autenticação: e5c17919eb

